ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

GIOVANA GOBATTO BALANCO

Emprego de espécies de baixa densidade na reabilitação de vigas de madeira

**São Carlos
2018**

GIOVANA GOBATTO BALANCO

Emprego de espécies de baixa densidade na reabilitação de vigas de madeira

Versão Original

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais.

Orientador (a): Francisco Antonio Rocco Lahr

**São Carlos
2018**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo (a) autor (a).

B171e Balanco, Giovana Gobatto
 Emprego de espécies de baixa densidade na
 reabilitação de vigas de madeira / Giovana Gobatto
 Balanco; orientador Francisco Antonio Rocco Lahr. São
 Carlos, 2018.

 Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
 em Ciência e Engenharia de Materiais e Área de
 Concentração em Desenvolvimento, Caracterização e
 Aplicação de Materiais -- Escola de Engenharia de São
 Carlos da Universidade de São Paulo, 2018.

 1. Estruturas degradadas. 2. Vigas de madeira. 3.
 Reabilitação. 4. Rigidez a flexão. 5. Parafusos auto
 atarraxantes. 6. Madeiras de baixa densidade. 7. CCB.
 I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **GIOVANA GOBATTO BALANCO**.

Título da dissertação: "Emprego de espécies de baixa densidade na reabilitação de vigas estruturais de madeira".

Data da defesa: 21/02/2018.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **Francisco Antonio Rocco Lahr**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADA

Prof. Dr. **Antonio Alves Dias**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADA

Prof. Dr. **José Benaque Rubert**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADA

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais:
Prof. Associado **Antonio José Felix de Carvalho**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**

À minha mãe, irmão, professor Rocco e Laurenn,
com todo meu amor e gratidão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aquela que é a minha base, que sempre me apoiou e incentivou a buscar meus sonhos, e não me deixou desistir diante de nenhuma dificuldade que enfrentei até hoje. A você mãe, toda a gratidão.

Ao meu irmão que é meu maior companheiro desta vida, meu melhor amigo.

À minha avó Marlene por todo o amor e cuidados dedicados a mim.

Tudo isto é para vocês e por vocês que são os grandes amores da minha vida e me inspiram a ser uma pessoa melhor a cada dia.

Ao professor Rocco, agradeço por ser além de um exemplar professor, um excelente amigo. Por todos os ensinamentos acadêmicos e de vida, por todo apoio e encorajamento.

À Laurenne que é a responsável pela minha inserção na vida acadêmica, por sempre acreditar em mim e me motivar. Agradeço também pela amizade tão forte e sincera, por me acolher, ser minha confidente e conselheira.

Ao professor André por todo apoio, por ser tão prestativo e paciente, sempre disposto a ajudar e ensinar.

Ao meu amigo de graduação Nathan que esteve comigo desde o início aprendendo a fazer pesquisas e redigir artigos, isso é fruto da nossa dedicação desde 2015.

Sem vocês nada disso seria possível. Tudo que aprendi e evolui na área acadêmica devo a vocês.

Às minhas amigas da República Tapa da Pantera (Celia Derecho, Carolina Martins, Renata Soares, Bruna Dester, Bruna Farias e Carmem Casseb) agradeço por todos os momentos ruins em que estiveram do meu lado e pelos inúmeros momentos bons que me proporcionaram. Sem vocês, este ano não poderia ter sido tão incrível.

Aos meninos da República Canta Grillo (Troco, Panceta, Forfe, Bad, Elis, Zezé, Ceta, Bronha, Chico, Risada e Folga) por toda a amizade e momentos compartilhados.

Vocês (Cantapa) fizeram com que eu me sentisse em casa. Obrigada por todo companheirismo, carinho e curtição.

Ao meu amigo Bruno Rossi por toda a ajuda nas disciplinas, por ouvir todas as minhas reclamações e mesmo assim, ser sempre positivo.

Enfim, a todos que de uma forma ou outra estiveram envolvidos na realização desde trabalho e na participação desta etapa da minha vida, os meus sinceros agradecimentos.

Muito obrigada a todos!

RESUMO

BALANCO, G. G. **Emprego de espécies de baixa densidade na reabilitação de vigas de madeira**. 59p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

A madeira foi largamente utilizada em edificações no período colonial brasileiro por sua abundância em variadas espécies e a facilidade de obtenção e adaptação aos fins previstos. Muitos destes imóveis ainda existem e abrangem a maior parte do patrimônio histórico e cultural de nossas cidades. Devido à degradação causada pelo tempo e a falta de manutenção adequada destes elementos estruturais, as edificações estão expostas ao risco de colapso. O objetivo deste trabalho foi sugerir um método de reabilitação parcial de vigas estruturais de madeira, pois se notou um problema recorrente nestes elementos em construções antigas pelo fato de acumularem umidade, serem alvos de patologias principalmente na parte superior. Para reabilitação empregamos madeiras de baixa densidade pela facilidade de compra desse material, baixo custo e principalmente por aderir muito bem a tratamento preservativo com CCB, o que garante que a estrutura estará protegida de novos ataques. Além das madeiras de baixa densidade tratadas, parafusos auto atarraxantes foram escolhidos para fazer a união entre as madeiras. Para os ensaios de flexão estática de 3 pontos foram adotados 4 diferentes tipos de parafusos variando o diâmetro e comprimento além disso, o número de parafusos inseridos nos corpos de prova também variou. Este estudo contém a análise de relação entre a quantidade de parafusos auto atarraxantes (que fazem a união das peças) e o produto de rigidez de peças mistas compostas de madeira referência (que simula a viga em estado de degradação) e madeira tratada (substituindo a porção degradada). Para a madeira referência adotou-se Eucalipto (classe C30 de resistência) e Roxinho (classe C60) e, para madeira tratada adotou-se Pinus e Caxeta (de baixa densidade, ambas da classe C20). Análises estatísticas foram utilizadas para interpretação dos resultados obtidos em laboratório. Estas análises apontaram o crescimento do produto de rigidez das vigas mistas conforme a inserção de parafusos e a partir daí foi possível expressar em formulas a correlação dos dados. Utilizou-se o teste de Tukey para apontar o melhor tratamento para cada tipo de viga mista (Pinus e Eucalipto, Roxinho e Caxeta) além do melhor parafuso a se utilizar.

Palavras-chave: Estruturas. Vigas de madeira. Reabilitação. Rigidez a flexão. Parafusos auto atarraxantes. Madeiras de baixa densidade. CCB.

ABSTRACT

BALANCO, G. G. **Use of low density species in the rehabilitation of timber beams.** 59f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

Wood was widely used in buildings in the Brazilian colonial period because of it is abundant in varied species and the ease of obtaining and adapting to intended purposes. Many of these properties still exist and cover most of historical and cultural heritage of Brazilian cities. Due to the degradation caused by the weather and lack of adequate maintenance of these structural elements, buildings are exposed to risk of collapse. The objective of this work was to suggest a method of partial rehabilitation of structural timber beams, since a recurrent problem was observed in these elements in old constructions due to accumulation of humidity, being targets of pathologies mainly in their upper part. For rehabilitation we use low density wood because of ease to purchasing this material, low cost and mainly for adhering very well to condom treatment with CCB, which ensures that the structure will be protected from further attacks. In addition to the treated low density woods, self-tapping screws were chosen to make union between woods. For tests, 4 different types of screws were used, varying diameter and length, and number of screws inserted in the specimens also varied. This study contains an analysis of relationship between the number of self-tapping screws (which make the joining of pieces) and the rigidity product of composite pieces of reference wood (which simulates beam in degraded state) and treated wood (replacing degraded portion). Eucalyptus (class C30 of resistance) and Roxinho (class C60) were used for reference wood, and Pinus and Caxeta (low density, both of class C20) were used for treated wood. Statistical analyzes were used to interpret results obtained in laboratory. These analyzes indicated growth of product of flexural stiffness according to insertion of screws and from this it was possible to express in formulas a correlation of data. Tukey test was used to indicate the best treatment for each type of mixed beam (Pinus and Eucalyptus, Roxinho and Caxeta) as well as the best screw to be used.

Keywords: Structures. Timber beams. Rehabilitation. Flexural stiffness. Self-tapping screws. Low density woods. CCB.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Madeira de árvores Coníferas, Gimnospermas (http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasklock/introduengmad/coniferaxfolhosa.pdf).	27
Figura 2: Madeira de árvores Dicotiledôneas, Angiospermas (http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasklock/introduengmad/coniferaxfolhosa.pdf).	28
Figura 3: Madeira Eucalipto (Autor).	28
Figura 4: Madeira Pinus (Autor).	30
Figura 5: Madeira Caxeta com parafusos inseridos ao longo do comprimento (Autor).	31
Figura 6: Madeira Roxinho (Autor).	32
Figura 7: Parafusos auto atarraxantes (Autor).	39
Figura 8: (a) Esquema de fixação para o Tratamento 1, peça mista com 3 parafusos ao longo do vão efetivo. (b) Esquema de fixação para o Tratamento com medidas (Autor).	40
Figura 9: (a) Esquema de ensaio de flexão três pontos. (b) Detalhes do ensaio de flexão três pontos com relógio comparador (Autor).	41
Figura 10: Esquema de fixação para o Tratamento 2, peça mista com 5 parafusos ao longo do vão efetivo (Autor).	42
Figura 11: Esquema de fixação para o Tratamento 3, peça mista com 9 parafusos ao longo do vão efetivo (Autor).	42
Figura 12: Esquema de fixação para o Tratamento 4, peça mista com 17 parafusos ao longo do vão efetivo (Autor).	42
Figura 13: (a) Foto da parte superior de vigas mistas (b) Foto lateral das vigas mistas (Autor).	43
Figura 14: Valores médios, intervalos de confiança (95% de confiabilidade) e intervalo de variação do coeficiente de variação da rigidez à flexão dos 40 tratamentos experimentais avaliados das vigas mistas Pinus - Eucalipto (Autor).	47
Figura 15: Valores médios, intervalos de confiança (95% de confiabilidade) e intervalo de variação do coeficiente de variação da rigidez à flexão dos 40 tratamentos experimentais avaliados das vigas mistas Caxeta - Roxinho (Autor).	48
Figura 16: Gráficos de interação entre fatores para as vigas mistas de Pinus-Eucalipto – d·L (a), L·%M (b) (Autor).	50
Figura 17: Variação da rigidez à flexão das vigas mistas Pinus-Eucalipto em função do número de parafusos (Autor).	51
Figura 18: Gráfico de interação entre fatores (L·Np) para as vigas mistas de Caxeta-Roxinho (Autor).	52
Figura 19: Variação da rigidez à flexão das vigas mistas Caxeta-Roxinho em função do número de parafusos (Autor).	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Corpos de prova confeccionados para ensaios	388
Tabela 2: Lista dos equipamentos utilizados nos testes preliminares.....	444
Tabela 3: Tratamentos delineados para as vigas mistas Pinus – Eucalipto.....	455
Tabela 4: Resultados o teste de Tukey dos fatores considerados significativos no modelo da Equação 4 (vigas mistas Pinus-Eucalipto)	51
Tabela 5: Resultados o teste de Tukey dos fatores considerados significativos no modelo da Equação 5 (vigas mistas Caxeta-Roxinho).....	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABRAF: Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas.

CCA: Arseniato de Cobre Cromatado.

CCB: Borato de Cobre Cromatado.

CIFLORESTAS: Centro de Inteligência em Florestas

CP: Corpo de Prova.

EESC: Escola de Engenharia de São Carlos.

LaMEM: Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira.

MLC: Madeira Laminada Colada.

NBR: Norma Brasileira Registrada.

PRFC: Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono.

SET: Departamento de Engenharia de Estruturas.

USP: Universidade de São Paulo.

WWF: World Wide Fund for Nature.

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	23
2.	OBJETIVOS	26
3.	REVISÃO BIBLIOGRAFICA	27
3.1.	Madeira	27
3.1.1.	Eucalipto	28
3.1.2.	Pinus	29
3.1.3.	Caxeta	30
3.1.4.	Roxinho	31
3.2.	Madeira na construção civil	32
3.3.	Propriedades físicas da madeira	33
3.4.	Propriedades mecânicas da madeira	34
3.5.	Degradação da Madeira	35
3.6.	Preservativos para madeira	36
3.7.	Considerações finais a respeito da revisão bibliográfica	37
4.	METODOLOGIA	38
4.1.	Ensaio	38
4.1.1.	Corpos de prova	38
4.1.2.	Equipamentos utilizados	44
4.2.	Análise Estatística	44
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
5.1.	Resultados	45
5.2.	Discussão	47
6.	CONCLUSÕES	54
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

1. INTRODUÇÃO

A madeira é uma matéria prima historicamente utilizada pelo homem, unida a outros materiais foi utilizada para a construção de habitações desde os primórdios da civilização. Existem registros de que a madeira, como matéria-prima na construção civil, é utilizada no mínimo desde o período neolítico, conforme análises de estruturas localizadas na Escócia (FAIRWEATHER e RALSTON, 1993; RADKAU, 2012).

A grande utilização da madeira é devido a algumas características próprias que a tornam muito atraente quando comparadas a outros materiais.

A madeira é um material acessível com variedade de comprimentos e diâmetros. Possui boa resistência mecânica à tração e à compressão mesmo possuindo peso muito baixo quando comparado a outros materiais utilizados na construção civil. Possui também, boas características de isolamento térmico e acústico. Além de ser um material muito fácil de ser trabalhado e adequado tanto manualmente quanto com máquinas, seu processamento não necessita ferramentas sofisticadas nem grande tecnologia envolvida além de utilizar baixo consumo de energia (ALMEIDA, 2010; CRUZ e NUNES, 2015; GESUALDO, 2003; HILDEBRANDT et al., 2017; SVAJLENKA et al., 2017).

No Brasil, devido ao clima e extensão territorial favoráveis, além de outros fatores, há uma vasta diversidade de espécies de madeira e essa é uma matéria prima em abundância. Por isso, no período de colonização a madeira foi muito utilizada nas construções e também, para outros fins. Assim, ainda hoje, existem construções muito antigas oriundas desse período e épocas subsequentes (BERTOLINI et al., 2013). Porém, por serem construções muito antigas e em sua maioria não terem recebido a manutenção e cuidado adequado, quando expostas a agentes de degradação não possuíam defesas e acabaram sofrendo degradação acentuada.

Segundo Cruz (2001), as características da madeira não são afetadas pela passagem do tempo, desde que esta não seja afetada pelas intempéries ou ação de agentes biológicos. Hellmeister (1982) afirma ainda que não ocorre deterioração na madeira como resultado apenas de envelhecimento. A degradação do elemento de madeira ocorre tanto por meio abiótico com o desgaste físico, químico ou mecânico, como por meios bióticos com bactérias, fungos, insetos xilófagos e perfuradores marinhos. A degradação biótica atua

como principal fator na alteração das características do elemento estrutural, podendo muitas vezes levar à ruína da composição (BERTOLINI, 2010; GONZAGA, 2006; MENDES e ALVES, 1988).

Em estruturas onde o grau de deterioração é avançado, o desempenho estrutural e vida útil dessas estruturas ficam comprometidos e este, é um problema muito recorrente e grave em construções antigas. Visando que, na maioria dos casos não se possa fazer a substituição do elemento estrutural como um todo, é necessário a aplicação de métodos alternativos para reabilitação.

Existem estudos que visam à reabilitação local de elementos estruturais em madeira, esses estudos propõem adições de diferentes materiais que completam a capacidade mecânica dos elementos estruturais danificados. Publicações mais recentes sobre este tema são citadas a seguir.

Cunha e Souza Junior (2004) reforçaram vigas nas faces inferior e superior polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC). Custódio et al. (2011) desenvolveram estudos sobre o desempenho da resina epóxi na reabilitação de estruturas de madeira. Nestes dois trabalhos o objetivo foi a reabilitação através de reforço ao longo de toda a peça estrutural.

Bertolini et al. (2013) utilizou resina epóxi bi componente para reabilitar deteriorações pontuais em peças de madeira. No caso deste trabalho, a reabilitação foi aplicada apenas em pontos específicos ao longo da peça estrutural onde se concentravam as degradações.

Pizzo et al. (2013) apresentaram um método de reabilitação parecido ao de Cruz e Mendonça (2002). Esses métodos propõem cortar os elementos estruturais em duas partes, excluindo, por exemplo, uma parte central degradada e uni-los utilizando resina e fibras sintéticas. Cruz e Mendonça (2002) utilizaram resina sintética e fibra de vidro para a restauração das peças estruturais, a fibra de vidro foi posicionada na emenda entre duas peças de madeira funcionando como reforço. No caso do estudo apresentado por Pizzo et al. (2013) as peças foram unidas por hastes de ligação de PRFC coladas com resina epóxi.

Nowak et al. (2013) usaram um procedimento semelhante ao publicado por Pizzo et al. (2013), com tiras de PRFC coladas à madeira com resina epoxi, porém, as tiras foram aplicadas nesse caso em fendas dentro da seção transversal da madeira.

Brito (2014) apresenta em seu trabalho uma completa revisão sobre tipos de inspeções e técnicas de reabilitação em estruturas e, faz dois estudos de caso. Um destes

estudos de caso é abordado com maior ênfase por Brito e Calil (2014) no trabalho onde utilizaram parafusos auto atarraxantes para reabilitar vigas de madeira laminada colada (MLC), e é interessante ser mencionado.

Baseados nestes estudos e técnicas buscamos um método de reabilitação de vigas estruturais de madeira onde a degradação está concentrada em toda a porção superior da viga e a parte inferior permanece sem degradação, mantendo a função estrutural. O intuito é que o método tenha uma execução pratica e rápida, sem deixar de ser econômico.

Deste modo, o presente trabalho pretende apresentar um método de reabilitação local em peças estruturais de madeiras através da substituição parcial destas peças. Para esta substituição foram utilizadas madeiras com classe de resistência inferior (C20) à das madeiras as quais se pretende reforçar e reabilitar (C30 e C60).

As madeiras de classe C20 foram escolhidas devido à boa permeabilidade do preservativo CCB em toda a sua extensão, garantindo que a madeira estará protegida e não sofrerá degradação por ataques de agentes biológicos (SILVA, 2008). No Brasil, são utilizados principalmente o CCA e o CCB como preservativo para madeira e o CCB foi escolhido, pois o uso do CCA esta sendo restringido em alguns países devido a sua toxicidade.

Assim, as peças mistas são compostas por elementos que simulam a área não degradada (madeiras C30 e C60) e por elementos tratados (madeiras C20) que substituem a parcela degradada da seção transversal. A união das madeiras para a composição das peças mistas foi feita utilizando parafusos auto atarraxantes que promovem a solidarização entre estas (LAHR et al., 2017; MACEDO et al., 2017).

A análise do método foi feita a partir da relação entre a quantidade de parafusos auto atarraxantes inseridos nas vigas mistas e o produto rigidez das destas vigas.

2. OBJETIVOS

Frente à contextualização apresentada na seção anterior, os objetivos do presente trabalho foram organizados conforme mostrado abaixo.

Objetivos primários:

- Sugerir um método de reabilitação parcial de vigas degradadas utilizando madeira com menor classe de resistência e parafusos auto atarraxantes;
- Buscar uma relação entre o número de parafusos utilizado e o ganho no produto de rigidez (EI);
- Comparar os valores das vigas mistas.

Objetivos secundários:

- Investigar se há diferenças nos resultados dos ensaios dos corpos de prova com retiradas diferentes (50% e 33% da altura da peça);
- Investigar se há diferenças nos resultados dos ensaios dos corpos de prova com parafusos auto atarraxantes de diferentes tamanhos (comprimento e diâmetro);
- Aumentar a base de dados sobre reabilitação em vigas de madeira.

3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

Neste item são abordadas algumas definições fundamentais para o bom entendimento e estruturação da dissertação.

3.1. Madeira

As plantas com sementes são geralmente classificadas em uma única classe conhecida como *Spermatophyta* ou *Fanerógamas*. Conforme o artigo apresentado pelo Portal Remade (2005), árvores são consideradas plantas superiores, devido a sua elevada complexidade anatômica e fisiológica. Elas são usualmente divididas em dois tipos: *Gimnospermas* e *Angiospermas*. Nos dois tipos são observadas estruturas constituídas basicamente de raiz, caule e folhas também, o sistema vascular é comum a ambos e são constituídos de conjuntos e feixes vasculares. As *Gimnospermas* e *Angiospermas* são diferenciadas principalmente pelo fato das *Gimnospermas* serem árvores com “sementes nuas”, sem o fruto que as protege, enquanto as *Angiospermas* são árvores que produzem além de flores, frutos e suas sementes estão dentro desses frutos.

Dentro destes dois grandes grupos de árvores existem subdivisões. As *Gimnospermas* têm os subgrupos: *Cicadáceas*, *Ginkgo*, *Coníferas* e *Gnetófitas* sendo que, dentre os quatro, as *Coníferas* são as únicas que produzem madeira. As *Angiospermas* se subdividem em: *Dicotiledôneas* e *Monocotiledôneas*, sendo que todas as *Angiospermas* que produzem madeira são *Dicotiledôneas*.

Figura 1: Madeira de árvores Coníferas, Gimnospermas

(<http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasklock/introduengmad/coniferaxfolhosa.pdf>).

Para Mainieri (1956), as Angiospermas são vegetais mais estruturados, mais evoluídos, diferente das Dicotiledôneas, que são eleitas como madeiras duras.

Figura 2: Madeira de árvores Dicotiledôneas, Angiospermas

(<http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasklock/introduengmad/coniferaxfolhosa.pdf>).

Neste trabalho foram utilizados quatro espécies de madeira: Eucalipto (*Eucalyptus* sp.), Pinus (*Pinus* sp.), Roxinho (*Peltogyne* sp.) e Caxeta (*Tabebuia cassinoides*), que serão abordadas individualmente a seguir.

3.1.1. Eucalipto

O Eucalipto (*Eucalyptus* sp.) pertence à classe das Dicotiledôneas. Celso Foelkel (2015) descreve a madeira produzida pelas árvores de Eucalipto como uma estrutura complexa e organizada.

Figura 3: Madeira Eucalipto (Autor).

O gênero Eucalipto possui diversas características importantes para a produção industrial, entre eles, seu rápido crescimento em relação a outras árvores de mesma classe

de resistência mecânica; adaptação a vários ambientes, possibilitando seu plantio em diversas regiões; além da grande variedade de espécies o que significa maior variabilidade de características específicas, atendendo vários segmentos madeireiros.

De acordo com a Associação Brasileira de Florestas Plantadas, a ABRAF (2013), a área de plantios de Eucalipto é 5.102.030 ha, significando um crescimento de 4,5% (228.078 ha) em relação ao ano anterior. Ainda segundo a ABRAF, dados sobre o ano de 2014 indicam que o plantio de Eucalipto ocuparam 5.560.000 ha, o que representa 71,9% do total de áreas de árvores plantadas no Brasil, e estão localizados principalmente nos Estados de Minas Gerais (25,2%), São Paulo (17,6%) e Mato Grosso do Sul (14,5%). Quando comparados os anos de 2014 e 2013 observasse um crescimento de cerca de 9% (aproximadamente 459.000 ha). Esse crescimento se deve principalmente à demanda de projetos industriais oriundos do segmento em fabricação de papel e celulose.

O cenário do desenvolvimento na produtividade do Eucalipto no Brasil é muito expressivo principalmente quando comparado ao cenário mundial. Entre 1970 e 2008 houve um crescimento médio anual de 5,7% na produção de Eucalipto, valor que representa mais do que o dobro do crescimento da América Latina na mesma produção (2,6% anual) e se destaca mais quando comparado aos 0,9% dos países desenvolvidos e 1,9% para o conjunto de países em desenvolvimento. Em 2014, o Brasil manteve mais uma vez sua liderança no ranking global de produtividade florestal. A produtividade média dos plantios brasileiros de Eucalipto atingiu 39 m³/ha.ano.

Segundo Foelkel (2015), o Brasil é o país líder em plantações de Eucalipto para finalidades industriais. Portanto, a cultura de plantio de Eucalipto é importante e vem ganhando cada vez mais espaço, devido suas características físicas e mecânicas que possibilitam seu uso para produção e desenvolvimento de diversos produtos finais.

3.1.2. Pinus

O gênero *Pinus* origina árvores da família das Coníferas, classe de plantas pertencentes ao grupo das Gimnospermas. Diferente do Eucalipto, esse é um gênero que não têm tanta flexibilidade em relação à área de plantio, a sua ocorrência é principalmente nas regiões entre polos até os trópicos, se estendendo pelos continentes europeu e asiático, e parte das Américas do Norte e Central (CIFLORESTAS, 2008).

Figura 4: Madeira Pinus (Autor).

É importante ressaltar que muitas áreas onde antes era feito o plantio de Pinus hoje dão espaço para plantio de Eucalipto, dados da ABRAF (2012), apontam que a área de plantio de Pinus em 2012 era 1.562.782 ha, equivale ao valor de 5,1% do registrado em 2011. Ainda segundo a ABRAF, dados de 2014 apontaram que o plantio de Pinus ocupava na época 1,59 milhão de ha, concentrados principalmente no Paraná (42,4%) e em Santa Catarina (34,1%). No mesmo período a produtividade média dos plantios brasileiros de Pinus foi de 31 m³/ha.ano.

A revista eletrônica CIFlorestas (2008) apresenta o Pinus e Eucalipto como gêneros de crescimento rápido, boa qualidade de madeira e fácil adaptação ao clima e ao solo das regiões sul e sudeste. Portanto, ambos têm características fundamentais para a aplicabilidade nas mais diversas áreas que necessitam da utilização de madeira, contudo a cultura de Eucalipto sobressai à cultura do Pinus.

3.1.3. Caxeta

A Caxeta ou Caixeta (*Peltogyne* sp.), assim como o Pinus, é uma madeira classificada na categoria C20 instituída pela normativa brasileira. Ela foi utilizada para que a pesquisa pudesse abranger mais espécies de madeira.

No Brasil, o plantio de Caxeta não é apontado por estudos em quantidades de hectares anuais, diferente do Eucalipto e Pinus já citados neste trabalho. Devido à falta desta informação também não é possível um comparativo de crescimento na área de plantio ou desenvolvimento do mercado que compra e vende este material. Esses aspectos se devem à grande cultura focada principalmente no plantio de Eucalipto que deixa o plantio de outras

espécies como menos relevantes para o país. Em relatórios da ABRAF, por exemplo, os dados da Caxeta são computados na categoria “outros” junto com outras diversas espécies plantadas em todo o território brasileiro.

Figura 5: Madeira Caxeta com parafusos inseridos ao longo do comprimento (Autor).

A escolha da Caxeta para este trabalho foi devido à sua boa permeabilidade de preservativo CCB e, mesmo com os dados apontados sobre seu plantio, é uma madeira facilmente encontrada no comércio madeireiro da cidade de São Carlos/SP onde a pesquisa foi desenvolvida.

3.1.4. Roxinho

O Roxinho (*Tabebuia cassinoides*) foi a madeira escolhida neste trabalho para representar a classe de resistência das madeiras C60. Esta escolha assim como a da Caxeta se basearam na facilidade de encontrar esta madeira em comércios da cidade onde a pesquisa foi executada. Esta madeira é encontrada em quase todas as matas nativas do País, sendo muito comum em diversos estados brasileiros (Amazonas, Bahia, Maranhão, Mato Grosso, Minas Gerais, Pará, entre outros).

Figura 6: Madeira Roxinho (Autor).

3.2. Madeira na construção civil

Há estudos que indicam, por meio da análise de estruturas da Escócia, que a madeira é utilizada como matéria-prima desde o período neolítico (FAIRWEATHER e RALSTON, 1993).

Apesar disso, mesmo com todo o tempo empregado no desenvolvimento de técnicas para utilização deste material na construção civil, o pensamento popular, em sua grande maioria, é de que a madeira é um material rústico, com tecnologias que não acompanharam o tempo. Esse pensamento vem sendo desmitificado pelo desenvolvimento de novos produtos derivados da madeira, com diferentes aspectos físicos, mecânicos, dimensões e formas, bem como com o desenvolvimento das regras de dimensionamento cada vez mais objetivas (CRUZ E NUNES, 2005).

Devido à grande variedade das propriedades físico-mecânicas da madeira, sua versatilidade na aplicação no campo de obra ou na própria obra é vasta. Pode ocorrer de maneira temporária, com posicionamento de estacas para locação da edificação ou compartimentos temporários com laminados colados, como refeitório, cozinha, sala de engenharia e para espaços destinados aos funcionários da empreitada, ou como forma e escoramento para moldar a própria construção. Além desta aplicação momentânea, a própria edificação pode ser composta de madeira, variando desde elementos estruturais, de fechamento e acabamento (GESUALDO, 2003).

A madeira possui diversas propriedades que a tornam muito atraente quando comparada a outros materiais. Dentre essas características, o baixo consumo de energia para seu processamento, boa resistência à tração e a compressão, as boas características de isolamento térmico, acústico e elétrico, além de ser um material muito fácil de ser

trabalhado, tanto manualmente quanto com máquinas (GESUALDO, 2003).

Além de todos esses atrativos, a madeira providência alta sustentabilidade frente a outros materiais. As florestas são responsáveis por um enorme sequestro de carbono da atmosfera, como Skog e Nicholson (1998) mencionou que cerca de 2,7 petagramas (10^{15}) de gás carbônico foram retirados do ar e estão atualmente “presos” em produtos de madeira e papel, e esse número só faz aumentar conforme o uso da madeira se mantém, em cerca de 70 teragramas (10^{12}) por ano.

Segundo Denise Hamú, secretária geral da WWF-Brasil, na publicação “Madeira: uso sustentável na construção civil”, o setor da construção civil, é o maior consumidor de madeira tropical do país. É preciso se conscientizar de que não importa apenas a qualidade e os custos da madeira, mas também a procedência, bem como se deve minimizar os desperdícios na hora de projetar, evitar cortes desnecessários, reutilizarem as peças, adequar o projeto às peças com as medidas de mercado economizando dinheiro e matéria prima.

Portanto, a madeira, como produto biodegradável, reciclável, com propriedades atraentes, tanto esteticamente como físico-mecanicamente, com contribuições à redução das mudanças climáticas com o sequestro de carbono, se mostra cada vez mais como uma alternativa imprescindível a um desenvolvimento sustentável na construção civil.

3.3. Propriedades físicas da madeira

Para utilizar a madeira como elemento estrutural, é importante conhecer suas propriedades físicas e mecânicas. Para as propriedades físicas, se destacam os seguintes fatores que influem diretamente na escolha do material: a classificação botânica, o solo e clima da região de origem da árvore, a fisiologia da árvore, a anatomia do tecido lenhoso e a variação da composição química (CALIL JUNIOR et al., 2010).

A densidade é um dos fatores mais importantes para avaliação da qualidade da madeira, devido a sua fácil determinação e por estar diretamente relacionada às demais características físicas. De acordo com Bodig e Jayne (1982), muitas das propriedades mecânicas da madeira estão relacionadas com a densidade (DIAS e LAHR, 2004).

A densidade aparente (ρ_{ap}) corresponde à medida de um certo conteúdo de umidade em “condições de uma atmosfera a 20°C de temperatura e uma umidade relativa de 65%, a umidade de equilíbrio para a madeira é 12%, conforme Bodig e Jayne (1982) que

complementam que muitas “propriedades mecânicas da madeira estão relacionadas com a densidade”.

Já para Zhang (1994) a estrutura mais complexa da madeira dificulta na relação direta entre a sua densidade e suas propriedades mecânicas. Hellmeister (1982) relaciona a densidade com “propriedades de resistências e rigidez da madeira”.

Dessa maneira, apontam a importância que a densidade apresenta no desempenho da madeira.

3.4. Propriedades mecânicas da madeira

As propriedades mecânicas que são responsáveis pela resposta da madeira quando solicitada por forças externas, se dividem em propriedades de resistência e elasticidade. Os métodos de ensaio para a determinação destas propriedades são determinados pela norma brasileira 7190/97 (CALIL JUNIOR et al., 2010).

Elasticidade é a capacidade do material de retornar à sua forma inicial, depois de retirada a ação externa que o solicitava, sem apresentar deformação residual. As propriedades elásticas são descritas por três constantes: o módulo de elasticidade longitudinal (E), o módulo de elasticidade transversal (G) e o coeficiente de Poisson (ν). Como a madeira é um material ortótropo, as propriedades de elasticidade variam de acordo com a direção das fibras em relação à direção de aplicação da força (CALIL JUNIOR et al., 2010).

A norma brasileira possui três valores de módulo de elasticidade: o módulo de elasticidade longitudinal (E_0), determinado através do ensaio de compressão paralela às fibras da madeira; o módulo de elasticidade normal (E_{90}), que pode ser representado como uma fração do módulo de elasticidade longitudinal pela seguinte expressão:

$$E_{90} = 0,05 * E_0 \text{ (Fonte: NBR 7190/97)}$$

Ou ser determinado por ensaio de laboratório; e o módulo de elasticidade na flexão (E_M), que também pode ser determinado de acordo com o método de ensaio apresentado pela norma brasileira e pode ser relacionado com o módulo de elasticidade longitudinal pelas expressões abaixo, para as coníferas:

$$E_M = 0,85 * E_0 \text{ (Fonte: NBR 7190/97)}$$

Para as dicotiledôneas:

$$E_M = 0,9 * E_0 \text{ (Fonte: NBR 7190/97)}$$

As propriedades de resistência descrevem as resistências últimas de um material quando solicitado por uma força. Dentre essas propriedades temos: compressão, tração, cisalhamento, flexão simples, torção e resistência ao choque, que descrevem a resistência dos materiais em diferentes condições de aplicação desta força (CALIL JUNIOR et al., 2010).

As propriedades de resistência da madeira também diferem segundo os três eixos principais, embora com valores muito próximos nas direções tangenciais e radiais. Por isso, as propriedades de resistência são analisadas segundo duas direções: paralela e normal às fibras (CALIL JUNIOR et al., 2010).

A compressão pode ser normal, paralela ou inclinada em relação às fibras. Quando a peça é solicitada por compressão paralela às fibras, as forças agem paralelamente à direção do comprimento das células. Desta forma as células, em conjunto, conferem uma grande resistência à madeira na compressão.

A tração em uma peça de madeira pode ocorrer em duas direções diferentes: tração paralela ou perpendicular às fibras de madeira.

Cisalhamento são três tipos que podem ocorrer na peça de madeira: a ação age no sentido perpendicular às fibras (cisalhamento vertical), os outros dois tipos de cisalhamento fazem referência à força aplicada no sentido longitudinal às fibras (cisalhamento horizontal) e à força aplicada perpendicular às linhas dos anéis de crescimento. O caso mais crítico é o do cisalhamento horizontal que leva à ruptura pelo escorregamento entre as células da madeira (CALIL JUNIOR et al., 2010).

3.5. Degradação da Madeira

As características da madeira não são afetadas pela passagem do tempo, desde que esta não seja afetada pelas intempéries ou ação de agentes biológicos (CRUZ, 2001).

A degradação do elemento madeira ocorre tanto por meio abiótico com o desgaste físico, químico ou mecânico, ou por meios bióticos como bactérias, fungos, insetos xilófagos e perfuradores marinhos (MENDES e ALVES, 1988). A falta de mão de obra capacitada para execução de obras em estruturas de madeira, aliada a corriqueira inexistência de manutenção preventiva, corroboram com o processo de degradação deste elemento, aumentando a recusa em utilizá-lo na construção civil.

Os maiores agentes degradadores da madeira são os bióticos, sendo relevante para

este fator a presença de umidade (BERTOLINI, 2010). A degradação biótica atua como principal fator na alteração das características do elemento estrutural, podendo muitas vezes levar à ruína da composição. Devido a estes serem os principais agentes degradadores, eles tiveram maior ênfase neste trabalho.

Os agentes da degradação abiótica geralmente propiciam aos agentes bióticos maior facilidade no consumo dos elementos. O desgaste mecânico se dá devido ao movimento e interação entre as peças e o meio, e quando aliado a um tipo de podridão, acelera o processo de decaimento, como é o caso de dormentes, escadas, pontes, entre outros. O desgaste físico é ocasionado por fogo, chuva, radiação solar, vento, umidade. Mais uma vez, estes trazem inchamentos e contrações, rachaduras e defeitos, aumentando, assim, os riscos de ataque de organismos xilófagos. A degradação química se dá quando o elemento estrutural entra em contato com substâncias como ácidos, bases fortes, óxido de ferro, dióxido de enxofre, sais de sódio e outros. Desgaste mais comum em galpões industriais, porém, pode ocorrer em regiões comerciais e residenciais, quando utilizado em estruturas construtivas mistas ou pintadas com tintas inadequadas para a madeira (MENDES e ALVES, 1988).

Portanto, a preservação dos elementos estruturais é imprescindível para garantir a longevidade do conjunto.

3.6. Preservativos para madeira

Para a madeira, toda substância química que provoca o envenenamento dos nutrientes celulares, tornando-a resistente a ataque de agentes xilófagos, é denominado como elemento preservativo da madeira. Assim, um bom preservativo deve apresentar uma boa toxidez, não ser volátil, não se decompor, boa permanência na madeira, não reagir com outros elementos para evitar degradação de estruturas mistas (ferro, aço, etc.), não ser inflamável, não pode alterar as características físico-mecânicas da madeira, e não apresentar risco à saúde de animais domésticos e ao homem.

Tais preservativos podem ser óleo solúveis, como creosoto e o pentaclorofenol, bem como hidrossolúveis. No Brasil, utilizasse principalmente os preservativos hidrossolúveis CCA e CCB no tratamento de madeiras. Ambos são compostos por cromo e cobre e o que os diferencia é o terceiro elemento da composição que no caso do CCA é o arsênio e no do CCB é o boro. Neste trabalho o CCB foi utilizado, pois o CCA têm toxidez mais acentuada e sua

utilização está em desuso em alguns países, tendo a tendência a ser cada vez menos utilizado. No CCB o Cobre age como fungicida, evitando a proliferação de fungos e o apodrecimento da madeira tratada e o Ácido Bórico como bactericida, evitando o ataque de insetos Xilófagos como a Broca, Cupins e Carunchos.

Para aplicação, os preservativos podem ser pulverizados ou pincelados sobre os elementos, ou as próprias peças mergulhadas em toneis com preservativo, sendo estes os métodos de aplicação sem pressão (MENDES e ALVES, 1988). Para maior eficácia, existe outro método com aplicação de pressão, onde a seiva é substituída pelo preservativo, esse tratamento é feito em autoclaves com a impregnação da madeira com o preservativo químico através da pressão elevada. Ambos preservativos (CCA e CCB) são produzidos e comercializados para esse fim e por serem composto por substâncias tóxicas exigem uma aplicação dentro de um sistema industrial fechado para que não haja contato direto de pessoas com o produto. Com a impregnação concluída, os compostos do preservativo reagem quimicamente e passam a ser insolúveis. A madeira se torna toxica aos organismos que a utilizam como fonte de alimento desta forma garante de maneira eficaz que esta madeira não será foco de ataques biológicos (WILKINSON, J. G. 1979).

3.7. Considerações finais a respeito da revisão bibliográfica

As estruturas de madeira são atacadas por diversos agentes de degradação quando não tem o devido tratamento e manutenção, isso compromete seu desempenho estrutural e vida útil. Também foi possível observar a importância da madeira e a sua vasta aplicação no setor da construção civil, tendo o Brasil, diversas estruturas feitas deste material compondo o patrimônio histórico cultural do país.

Foram abordadas as madeiras objeto de estudo neste trabalho e as propriedades físicas e mecânicas da madeira de um modo geral para que fosse possível o desenvolvimento do estudo, que faz análise do comportamento mecânico de peças estruturais de madeira.

O método proposto por este trabalho não foi reproduzido por nenhum outro autor, garantindo a originalidade da pesquisa e justificando a ausência de comparação entre os resultados aqui obtidos com resultados de outros autores. Todos os detalhes de preparação de corpos de prova e execução dos ensaios estão expostos e minuciosamente explicados no próximo tópico.

4. METODOLOGIA

Esta pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM), do Departamento de Engenharia de Estruturas (SET) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP).

4.1. Ensaios

O trabalho em laboratório constituiu em ensaiar peças mistas de Eucalipto com Pinus e Roxinho com Caxeta unidas através de parafusos auto atarraxantes.

4.1.1. Corpos de prova

Na tabela abaixo a “madeira referência” indica a madeira da viga original, ou seja, as madeiras de Eucalipto e Roxinho simulam as vigas instaladas na construção que foram expostas ao longo do tempo a patologias. Para simular a degradação sofrida (parte comprometida estruturalmente) foram retiradas as porções de 50% e 33% das alturas das peças, ou seja, as peças que inicialmente tinham 5 cm de altura (segundo os padrões estabelecidos pela NBR 7190 para ensaios de flexão) ficaram com 2,5 cm e 3,4 cm de altura respectivamente. Essas peças foram ensaiadas e denominadas como Tratamento 0. Vale ressaltar que o Eucalipto é classificado como classe de resistência C30 e o Roxinho C60.

Tabela 1: Corpos de prova confeccionados para ensaios

Madeira ref. + madeira tratada	Eucalipto + Pinus				Roxinho + Caxeta			
Porção da altura que corresponde a cada uma das madeiras	50% + 50% (2,5cm + 2,5cm)		67% + 33% (3,4cm + 1,6cm)		50% + 50% (2,5cm + 2,5cm)		67% + 33% (3,4cm + 1,6cm)	
Comp. do parafuso (em cm)	4		5		4		5	
Diâmetro do parafuso (em cm)	0,4	0,6	0,4	0,6	0,4	0,6	0,4	0,6
Quantidade de corpos de prova mistos	4	4	4	4	4	4	4	4
	4	4	4	4	4	4	4	4

Fonte: Autor

A “madeira tratada” indica a madeira escolhida para fazer a substituição da parte degradada, ou seja, reforçar a viga original que está comprometida. O Pinus e a Caxeta foram as madeiras da classe de resistência C20 (inferior à madeira referência) escolhidas por apresentarem densidade entre 450 e 500 kg/m³ e são altamente receptivas de tratamentos químicos devido a sua boa permeabilidade possibilitando assim, que o tratamento preservativo CCB (borato de cobre cromatado) penetre ao longo de toda a seção da peça (BALLONI, 2009; SILVA, 2007). Como este trabalho se aplica a situações onde a viga é exposta a um ambiente com muitos agentes patológicos, a boa permeabilidade do tratamento se faz fundamental para o sucesso do trabalho, garantindo que a viga não volte a degradar de maneira tão rápida e intensa após a reabilitação aqui proposta (GALLIO et al., 2017; SILVA et al., 2008; SOUZA e DEMENIGHI, 2017). Os corpos de prova da madeira tratada foram confeccionados para complementar a altura perdida (degradada) pela madeira referência na intenção de reforçá-la.

Como já mencionado, a altura final dos corpos de prova mistos é de 5 cm conforme a NBR 7190:1997 E NBR 7190:2011 estabelece para ensaios de flexão. A largura e comprimento dos CPs também seguem essa norma e são 5 cm e 115 cm, respectivamente. Vale mencionar que todas as madeiras foram ensaiadas apresentando teor de umidade próximo de 12%.

Para a fixação entre os corpos de prova os parafusos auto atarraxantes (Figura 7) foram fixados por etapas e estas serão descritas a seguir.

Figura 7: Parafusos auto atarraxantes (Autor).

Inicialmente foram fixados três parafusos. As distâncias dos primeiros parafusos seguem critério estabelecido pela norma NBR 7190 que visa deixar livre a região de apoio

durante os ensaios de flexão a três pontos. A norma pede que seja respeitado um espaçamento de 5 cm a partir da borda do corpo de prova e também determina um espaçamento de 4 vezes o diâmetro do parafuso entre os parafusos, que no caso da Figura abaixo o parafuso exemplo tem 0,6 cm de diâmetro, resultando em 2,4 cm. Assim, os dois parafusos iniciais foram fixados a 7,4 cm da extremidade. O terceiro parafuso foi fixado no centro do vão gerado pelos dois primeiros parafusos.

(a)

(b)

Figura 8: (a) Esquema de fixação para o Tratamento 1, peça mista com 3 parafusos ao longo do vão efetivo. (b) Esquema de fixação para o Tratamento com medidas (Autor).

Na Figura 8b, a parte em vermelho representa a madeira referência e, a parte em azul a madeira tratada. A fixação das duas peças faz com que haja a solidarização dos materiais.

Para que fosse possível determinar o número de parafusos mais adequado a cada um dos casos, foi determinado a inserção de três parafusos iniciais e posteriormente seriam inseridos parafusos sempre ao centro dos já fixados, resultando em cinco fases de fixação de parafusos, às quais serão chamados de tratamentos 1, 2, 3, 4 e 5.

Após a fixação do Tratamento 1, ilustrado na Figura 8, foram realizados ensaios de flexão estática de três pontos em cada um dos corpos de prova mistos, conforme Figura 9. Os ensaios seguiram a NBR7190:1997. Pela Figura 9a é possível observar a peça apoiada em dois pontos (nas duas extremidades), o atuador hidráulico e o relógio comparador posicionados no meio do vão destas vigas/ corpos de prova. Enquanto o atuador hidráulico aplica pressão gradativa sobre a viga, o relógio comparador mede o deslocamento gerado por essa carga aplicada. O teste é bem simples de ser realizado e ao medir o deslocamento e

a carga em pontos específicos do carregamento é possível traçar uma curva tensão x deformação e observar o comportamento das vigas.

É importante ressaltar que em vigas deterioradas onde se aplica este método de reabilitação, a deterioração se encontra na parte superior da viga, portanto o Pinus e a Caxeta (madeiras tratadas) foram sempre posicionado na parte superior (na região comprimida). Vale ressaltar também, que para os ensaios de flexão estática de três pontos foram realizados respeitando uma flecha máxima de 5.25 mm ($L/200$), para assegurar o ensaio dentro do regime elástico e garantir que não houvesse comprometimento das peças (deformações plásticas ou fissurações) para os ensaios posteriores.

(a)

(b)

Figura 9: (a) Esquema de ensaio de flexão três pontos. (b) Detalhes do ensaio de flexão três pontos com relógio comparador (Autor).

Após o ensaio do Tratamento 1 foram inseridos mais dois parafusos ao centro dos vãos gerados pelos três primeiros parafusos, resultando em cinco parafusos equidistantes. Assim, temos o Tratamento 2 representado na Figura abaixo.

Figura 10: Esquema de fixação para o Tratamento 2, peça mista com 5 parafusos ao longo do vão efetivo (Autor).

Foram ensaiadas as peças com o Tratamento 2 e logo em seguida, foram fixados mais quatro parafusos auto atarraxantes nas vigas mistas, sempre conferindo um acréscimo de um parafuso para cada espaço livre entre os parafusos já instalados no tratamento anterior. O Tratamento 3, portanto, é representado pelo esquema abaixo com nove parafusos.

Figura 11: Esquema de fixação para o Tratamento 3, peça mista com 9 parafusos ao longo do vão efetivo (Autor).

Por fim, mais nove parafusos foram inseridos ao centro do vão gerado pelos parafusos instalados no tratamento anterior, resultando no Tratamento 4 com dezessete parafusos.

Figura 12: Esquema de fixação para o Tratamento 4, peça mista com 17 parafusos ao longo do vão efetivo (Autor).

O tratamento 4 foi o último a ser realizado para os parafusos de 0,6 cm de diâmetro pois, a inserção de parafusos além destes causaria fissuração da madeira, o que atrapalha o desempenho mecânico da peça mista, se opondo ao objetivo do trabalho. No caso dos

parafusos de 0,4 cm ainda houve mais uma inserção de parafusos no vão dos anteriores, resultando em 33 parafusos totais, Tratamento 5. As vigas mistas com substituição de 50% e inserção de 33 parafusos estão apresentadas na Figura 13 como exemplo do aspecto final das vigas mistas.

Figura 13: (a) Foto da parte superior de vigas mistas (b) Foto lateral das vigas mistas (Autor).

Como todo corpo de prova misto utiliza duas madeiras diferentes unidas pelos parafusos, foram utilizados 64 corpos de prova das “madeiras referência” (32 de Eucalipto e 32 de Roxinho) e 64 corpos de prova das “madeiras tratadas” (32 de Pinus e 32 de Caxeta) resultando em 64 corpos de prova mistos.

Os 64 corpos de prova foram ensaiados cinco vezes (Tratamentos 0, 1, 2, 3, 4) cada. Os 32 corpos de prova que utilizaram parafusos de 0,4 cm de diâmetro foram ensaiados mais uma vez cada. Portanto, para os testes preliminares foram necessários 352 ensaios de flexão três pontos.

Foram utilizadas diversas variáveis para os ensaios a fim de tentar sanar algumas dúvidas iniciais, como: Estatisticamente, há diferenças nos resultados dos corpos de prova com diferentes quantidades (50-50% e 67-33%) de cada uma das madeiras? Estatisticamente, há diferenças nos resultados dos corpos de prova com diferentes tamanhos de parafusos? Existe um número ideal de parafusos a se utilizar na fixação das peças mistas? Quando há madeiras de classes de resistência diferentes (C30 e C60), a diferença no ganho do produto de rigidez é muito expressiva?

4.1.2. Equipamentos utilizados

A relação completa dos equipamentos utilizados durante toda a etapa de testes preliminares está listada na tabela abaixo.

Tabela 2: Lista dos equipamentos utilizados nos testes preliminares

Equipamento	Finalidade
Desengrossadeira Invicta com faca de 40 cm	Aplanar as peças de madeira
Serra Invicta SCI 160	Cortar os corpos de prova nas medidas desejadas
Paquímetro digital Starret universal 150mm	Medição dos corpos de prova
Parafusadeira / Furadeira de impacto Dewalt	Fixar os parafusos nos corpos de prova
Máquina universal de ensaio AMSLER com capacidade de 250 kN	Ensaio de flexão estática de três pontos

Fonte: Autor

4.2. Análise Estatística

Modelos de regressão multivariáveis foram utilizados para modelar e investigar a influência dos fatores e das interações nos valores da rigidez à flexão ($E \cdot I$) das vigas mistas. Estes modelos foram avaliados pela análise de variância (ANOVA), ao nível de 5% de significância. Dos fatores acusados significativos nos modelos, o teste de Tukey foi utilizado com o propósito do agrupamento dos níveis desses fatores.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Resultados

Para os resultados foi feita uma análise estatística envolvendo todos os ensaios realizados nos corpos de prova.

Os fatores investigados nas vigas mistas Pinus – Eucalipto e Caxeta – Roxinho consistiram no diâmetro (d) e no comprimento (L) dos parafusos, nas frações de madeira substituídas (%M) e no número de parafusos (Np) utilizados. A combinação dos níveis dos quatro fatores resultou em 40 tratamentos experimentais (Tr) delineados para a análise das vigas mistas Pinus – Eucalipto e outros 40 tratamentos para as vigas mistas Caxeta – Roxinho, ambos explicados na Tabela 3.

Tabela 3: Tratamentos delineados para as vigas mistas

Tr	Np	%M	d (mm)	L (mm)
1	3	0.50	4	50
2				35
3			6	50
4				35
5		0.33	4	50
6				35
7			6	50
8				35
9	5	0.50	4	50
10				35
11			6	50
12				35
13		0.33	4	50
14				35
15			6	50
16				35

17	9	0.50	4	50
18				35
19			6	50
20				35
21		0.33	4	50
22				35
23			6	50
24				35
25	17	0.50	4	50
26				35
27			6	50
28				35
29		0.33	4	50
30				35
31			6	50
32				35
33	33	0.50	4	50
34				35
35			6	50
36				35
37		0.33	4	50
38				35
39			6	50
40				35

Fonte: Autor

Para cada tratamento foram testadas 4 vigas na flexão estática, o que totalizou a execução de 320 experimentos ao todo.

Modelos de regressão multivariáveis (Equação 1) avaliados pela análise de variância (ANOVA), ao nível de 5% de significância, foram utilizados para modelar (estabelecimento da relação entre a rigidez à flexão e as quatro variáveis ou fatores idealizados) e investigar a influência dos fatores e das interações nos valores da rigidez à flexão (E-I) das vigas mistas. Pelas hipóteses da ANOVA, P-valor (Probabilidade P) inferior ao nível e significância (0,05) implica que o modelo e os seus termos são considerados significativos, e não significativos em caso contrário ($P\text{-valor} \geq 0,05$).

$$\begin{aligned}
EI = & \beta_0 + \beta_1 \cdot d + \beta_2 \cdot L + \beta_3 \cdot \%M + \beta_4 \cdot Np + \beta_5 \cdot d \cdot L + \beta_6 \cdot d \cdot \%M + \beta_7 \cdot d \cdot Np + \beta_8 \cdot L \cdot \%M + \beta_9 \cdot L \cdot Np \\
& + \beta_{10} \cdot \%M \cdot Np + \beta_{11} \cdot d \cdot L \cdot \%M + \beta_{12} \cdot d \cdot L \cdot Np + \beta_{13} \cdot d \cdot \%M \cdot Np + \beta_{14} \cdot L \cdot \%M \cdot Np \\
& + \beta_{15} \cdot d \cdot L \cdot \%M \cdot Np + \varepsilon
\end{aligned}
\quad (1)$$

Da Equação 1, β_i consiste nos coeficientes obtidos pelo método dos mínimos quadrados e ε é o erro aleatório, sendo a qualidade do ajuste medida pelo coeficiente de determinação R^2 .

Dos fatores acusados significativos nos modelos, o teste de Tukey foi utilizado com o propósito do agrupamento dos níveis desses fatores. Do teste de Tukey, A denota o grupo de maior valor médio, B o segundo maior valor médio e assim sucessivamente, e letras iguais implicam em tratamentos com médias estatisticamente equivalentes.

5.2. Discussão

As Figuras 14 e 15 ilustram os valores médios da rigidez à flexão (E·I), o intervalo de confiança da média (95% de confiabilidade) e os intervalos de variação dos coeficientes de variação (Cv) dos 40 tratamentos (Tr) obtidos das vigas mistas Pinus-Eucalipto e Caxeta-Roxinho, respectivamente.

Figura 14: Valores médios, intervalos de confiança (95% de confiabilidade) e intervalo de variação do coeficiente de variação da rigidez à flexão dos 40 tratamentos experimentais avaliados das vigas mistas Pinus - Eucalipto (Autor).

Figura 15: Valores médios, intervalos de confiança (95% de confiabilidade) e intervalo de variação do coeficiente de variação da rigidez à flexão dos 40 tratamentos experimentais avaliados das vigas mistas Caxeta - Roxinho (Autor).

As Figuras 14 e 15 demonstram que há diferenças expressivas entre os gráficos formados pelos resultados das vigas mistas de Eucalipto-Pinus e os gráficos das vigas mistas de Caxeta-Roxinho, comprovando que madeiras de diferentes classes de resistência sofrem influências diferentes quando submetidas ao método de reabilitação aqui proposto. Isto reforça a necessidade de estudo específico para cada classe de resistência existente na norma brasileira, para que o método possa ser aplicado na prática de modo eficaz e seguro.

A Equações 2 e 3 apresentam o modelos de regressão para a estimativa da rigidez à flexão obtido para as vigas mistas Pinus-Eucalipto e Caxeta-Roxinho, respectivamente, onde estão sublinhados os termos considerados significativos pela ANOVA ($P\text{-valor} < 0,05$).

$$\begin{aligned}
 EI \text{ (MN}\cdot\text{m}^2\text{)} = & 1.83 + 1.45 \cdot d + 0.081 \cdot \underline{L} + 7.4 \cdot \underline{\%M} - 0.015 \cdot \underline{Np} - 0.0353 \cdot \underline{d \cdot L} - 4.41 \cdot d \cdot \%M \\
 & + 0.0071 \cdot d \cdot Np - 0.343 \cdot \underline{L \cdot \%M} + 0.0008 \cdot L \cdot Np + 0.28 \cdot \%M \cdot Np + 0.1064 \cdot d \cdot L \cdot \%M \\
 & - 0.00009 \cdot d \cdot L \cdot Np - 0.048 \cdot d \cdot \%M \cdot Np - 0.0049 \cdot L \cdot \%M \cdot Np + 0.00092 \cdot d \cdot L \cdot \%M \cdot Np
 \end{aligned} \quad (2)$$

$$R^2 = 80,79\%$$

$$\begin{aligned}
EI \text{ (GN}\cdot\text{m}^2\text{)} = & 2.28 + 0.035 \cdot d + 0.033 \cdot L - 3.0 \cdot \%M + 0.123 \cdot Np - 0.00025 \cdot d \cdot L - \\
& 0.038 \cdot d \cdot \%M + 0.00173 \cdot d \cdot Np - 0.031 \cdot L \cdot \%M - 0.0018 \cdot L \cdot Np - 0.07 \cdot \%M \cdot Np \\
& + 0.00025 \cdot d \cdot L \cdot \%M - 0.000026 \cdot d \cdot L \cdot Np - 0.0014 \cdot d \cdot \%M \cdot Np + 0.0016 \cdot L \cdot \%M \cdot Np \\
& + 0.000024 \cdot d \cdot L \cdot \%M \cdot Np
\end{aligned} \tag{3}$$

$$R^2 = 86,28\%$$

Desprezando os termos não significativos nos modelos das Equações 2 e 3, essas são reduzidas às Equações 4 e 5, respectivamente.

$$\begin{aligned}
EI \text{ (MN}\cdot\text{m}^2\text{)} = & 10.66 - 0.388 \cdot d - 0.1380 \cdot L - 14.02 \cdot \%M + 0.04868 \cdot Np + 0.00931 \cdot d \cdot L \\
& + 0.1845 \cdot L \cdot \%M
\end{aligned} \tag{4}$$

$$R^2 = 80,03\%$$

$$\begin{aligned}
EI \text{ (GN}\cdot\text{m}^2\text{)} = & 3.575 + 0.01815 \cdot d + 0.01302 \cdot L - 5.984 \cdot \%M + 0.1501 \cdot Np - 0.001969 \cdot L \cdot Np
\end{aligned} \tag{5}$$

$$R^2 = 84,76\%$$

Cabe ressaltar que nos modelos reduzidos, o valor do coeficiente de determinação R^2 foi levemente reduzido quando comparado com os modelos completos, evidenciando a pequena significância dos termos considerados não significativos pela ANOVA, e boa qualidade dos modelos é notada pelos valores do R^2 ambos superiores a 80%, o que implica em erros nas estimativas da rigidez à flexão da ordem de 16 e 20%.

Na Equação 2 é possível observar que o fator diâmetro do parafuso (d) não foi significativo, entretanto, o mesmo foi considerado no modelo reduzido pela dependência entre L (comprimento do parafuso) e o diâmetro.

Na Equação 4, aumentos no comprimento do parafuso e no teor de madeira de *Pinus* implicam em reduções dos valores da rigidez à flexão, enquanto que o aumento no número de parafusos aumenta os valores dessa propriedade assim como esperado. Os efeitos de interação dos fatores significativos desse modelo são apresentados na Figura 16.

Figura 16: Gráficos de interação entre fatores para as vigas mistas de Pinus-Eucalipto – d·L (a), L·%M (b) (Autor).

Nas vigas fabricadas com parafusos de 50mm de comprimento, o aumento no diâmetro (de 4 para 6mm) proporcionou aumentos nos valores da $E \cdot I$, efeito contrário foi obtido nas vigas feitas com parafusos de 35mm de comprimento, em que o aumento no diâmetro implicou na redução do valor dessa propriedade. Isto demonstra que a influência do diâmetro do parafuso é maior em relação ao seu comprimento.

Nas vigas fabricadas com 33% de substituição da madeira o aumento no comprimento dos parafusos (de 35mm para 50mm) proporcionou uma queda nos valores da $E \cdot I$, enquanto para as vigas fabricadas com 50% de substituição, os valores de $E \cdot I$ foram mantidos mesmo com a variação nos comprimentos dos parafusos. As madeiras utilizadas como “madeira referência” são de alta densidade. Pela Figura 16b, é possível verificar que quanto maior a altura destas peças com alta densidade, mais estas sofrem a influência do comprimento de penetração do parafuso.

Ainda da Equação 4, o menor valor ($E \cdot I = 1,819 \text{ MN} \cdot \text{m}^2$) da rigidez na flexão das vigas mistas Pinus-Eucalipto foi proveniente da combinação $d=4\text{mm}$ (ou qualquer outro), $L=50\text{mm}$, $\%M=50\%$ e $N_p=3$, e o maior valor ($E \cdot I = 4,691 \text{ MN} \cdot \text{m}^2$) foi obtido da combinação $d=4$ (qualquer), $L=35$, $\%M=33\%$ e $N_p=33$. A Tabela 4 apresenta os resultados do teste de Tukey dos fatores $\%M$ e N_p considerados significativos no modelo da Equação 4.

Tabela 4: Resultados do teste de Tukey dos fatores considerados significativos no modelo da Equação 4 (vigas mistas Pinus-Eucalipto)

%M (%)				Np		
33	50	3	5	9	17	33
A	B	C	C	C	B	A

Fonte: Autor

Da Tabela 4, o aumento no teor de madeira de Pinus implica na redução dos valores da rigidez à flexão, 3, 5 ou 9 parafusos implicam equivalentemente nos menores valores da E-I e 33 parafusos resultam nos maiores valores dessa propriedade, em média 29% superior a rigidez à flexão das vigas feitas com 17 parafusos. A Figura 17 ilustra a variação média da E-I em função do número de parafusos.

Figura 17: Variação da rigidez à flexão das vigas mistas Pinus-Eucalipto em função do número de parafusos (Autor).

A Figura 17 apresenta a curva de crescimento da rigidez à flexão das vigas mistas de Pinus e Eucalipto. Esta curva demonstra o crescimento evidente entre 17 parafusos e 9, 5 e 3, bem como o grande salto que há no produto de rigidez quando comparado o tratamento com 33 parafusos e os anteriores.

Da Equação 5, aumentos nos valores do comprimento e do diâmetro dos parafusos assim como no aumento do número de parafusos implicam em aumentos nos valores da rigidez à flexão, enquanto que o aumento no teor de madeira de Caxeta implica em reduções dessa propriedade. O efeito de interação entre o comprimento e o número de parafusos é apresentado na Figura 18.

Figura 18: Gráfico de interação entre fatores (L·Np) para as vigas mistas de Caxeta-Roxinho (Autor).

Da Equação 5, o menor valor ($E \cdot I = 2,044 \text{ GN} \cdot \text{m}^2$) da rigidez na flexão das vigas mistas Caxeta-Roxinho foi proveniente da combinação $d=4\text{mm}$, $L=40\text{mm}$, $\%M=50\%$ de madeira de Caxeta e $N_p=3$, e o maior valor ($E \cdot I = 5,564 \text{ GN} \cdot \text{m}^2$) foi obtido da combinação $d=6$, $L=40$, $\%M=33\%$ e $N_p=33$. A Tabela 5 apresenta os resultados do teste de Tukey dos fatores considerados significativos pela ANOVA.

Tabela 5: Resultados o teste de Tukey dos fatores considerados significativos no modelo da Equação 5 (vigas mistas Caxeta-Roxinho)

d (mm)		L (mm)		%M (%)		Np				
4	6	40	50	33	50	3	5	9	17	33
B	A	B	A	A	B	D	D	C	B	A

Fonte: Autor

Da Tabela 5, aumentos no diâmetro e no comprimento dos parafusos resultam em aumentos no valor da rigidez à flexão das vigas mistas Caxeta-Roxinho, e aumento no teor de madeira de Caxeta implica na redução dessa propriedade. Do número de parafusos, 3 ou 5 conduzem a resultados equivalentes da $E \cdot I$, e 33 resulta no maior resultado, significativamente superior ao uso de 17 parafusos (aumento de 18% na $E \cdot I$ em relação as vigas fabricadas com 17 parafusos). A Figura 19 ilustra a variação média da $E \cdot I$ em função do número de parafusos.

Figura 19: Variação da rigidez à flexão das vigas mistas Caxeta-Roxinho em função do número de parafusos (Autor).

A Figura 19 apresenta a curva de crescimento da rigidez à flexão das vigas mistas de Caxeta e Roxinho. A curva expressa o crescimento evidente entre 9, 5 e 3 parafusos, bem como a maior inclinação produzida entre 9, 17 e 33 parafusos, o que demonstra o maior crescimento no produto de rigidez.

Os resultados obtidos em todos os ensaios realizados neste estudo foram comparados apenas entre si devido a ausência de possibilidade de comparação com a literatura. Conforme já mencionado neste texto, este método não foi reproduzido por nenhum outro autor por ser original e idealizado para este estudo, se diferenciando bastante de outros métodos de reabilitação já propostos assim, não há resultados na literatura da área que possam ser quantitativamente comparados.

6. CONCLUSÕES

O método de reabilitação de vigas degradadas utilizando madeiras de baixa densidade (classe de resistência C20) e parafusos auto atarraxantes proposto nesse trabalho se mostrou fácil de ser executado em laboratório. As madeiras e parafusos adotados neste trabalho conferem um baixo custo à reabilitação além de serem materiais comuns e por isso, serem fáceis de encontrar para a compra. As madeiras de baixa densidade além de garantir as facilidades citadas e o reforço para a estrutura asseguram um maior tempo de proteção contra agentes de degradação, pois estas madeiras absorvem muito bem ao tratamento preservativo com CCB. Assim, a reabilitação auxilia na recuperação e na preservação de estruturas antigas que muitas vezes fazem parte do patrimônio histórico cultural do país.

Nesta pesquisa duas composições entre madeira referência (degradada) e madeira tratada (nova, para reforço) foram utilizadas, 50% - 50% e 67% referência – 33% tratada. As composições podem ser aplicadas na prática em dois casos diferentes. No primeiro caso, apenas uma camada “superficial” está danificada e foram substituídos 33% da altura da viga. O segundo se aplica a casos de degradação mais avançada onde a deterioração foi intensa e a substituição passa a ser de metade da altura da viga. Em ambos os casos o método se mostrou eficiente surtindo um ganho significativo no produto de rigidez das vigas mesmo com a inserção do número mínimo de parafusos (3).

Para as vigas de Eucalipto-Pinus os ganhos nos produtos de rigidez com a inserção de 3, 5 e 9 parafusos foram considerados estatisticamente equivalentes, classificados no teste de Tukey como “C”, enquanto a relação do ganho no EI com a inserção de 17 parafusos foi considerado “B” e para 33 parafusos foi considerado “A”.

As vigas compostas por Roxinho-Caxeta apresentaram ganhos muito baixos no produto de rigidez com a inserção de 3 e 5 parafusos quando comparados aos demais tratamentos (com mais parafusos) e a classificação no teste de Tukey foi “D”. As vigas com 9 parafusos fixados ficaram agrupadas como “C” no teste de Tukey, as com 17 parafusos como “B” e 33 parafusos como “A”. Esses agrupamentos indicaram que a interação entre o ganho no produto de rigidez e a inserção de parafusos foi crescente e linear. Para estas vigas de Roxinho-Caxeta foi possível também classificar no teste de Tukey os diâmetros e comprimentos dos parafusos, apontamento interessante para indicar que a adoção de um certo parafuso surte efeito consideravelmente melhor que a adoção de outro. Os parafusos

com $d=4\text{mm}$ e $L=40\text{mm}$ foram agrupados como “B” enquanto os com $d=6\text{mm}$ e $L=50\text{mm}$ foram agrupados como “A”.

Foi possível observar as diferenças dos resultados obtidos entre as vigas mistas de Eucalipto-Pinus e Roxinho-Caxeta, confirmando que quando o método de reabilitação proposto é aplicado em diferentes classes de resistência de madeira há uma resposta diferente, um comportamento característico para cada classe. Partindo deste ponto, se torna interessante uma continuidade na aplicação deste método na classe de resistência que aqui não foi abordada e investigada. A NBR 7190/1997 classifica as dicotiledôneas em quatro classes: C20, C30, C40, C60. A classe de resistência C40, intermediária entre as aqui utilizadas (C30 e C60) pode se tornar objeto de futuras pesquisas que ajudem a compreender o comportamento apresentado por todas as madeiras quando reforçadas e reabilitadas com madeiras de baixa densidade (C20).

A aplicação do método em peças de dimensões estruturais também se faz interessante para confirmar que os resultados obtidos nos corpos de prova se reproduzem nas peças de maiores dimensões, sendo assim outra sugestão para o prosseguimento do trabalho em futuras pesquisas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, P. A. O. **Madeira como material estrutural**. São Paulo, 2010. Disponível em: <<http://www.lem.ep.usp.br/>>. Acesso em: 24 Nov. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de Estruturas de Madeira. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de Estruturas de Madeira. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FLORESTAS PLANTAS. **Anuário Estatístico ABRAF 2012**: ano base 2011. Brasília, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FLORESTAS PLANTAS. **Anuário Estatístico ABRAF 2013**: ano base 2012. Brasília, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FLORESTAS PLANTAS. **Anuário Estatístico ABRAF 2014**: ano base 2013. Brasília, 2014.

BALLONI, C. J. V. **Caracterização física e química da madeira de Pinus elliotti**. Itapeva, 2009.

BERTOLINI, L. **Materiais de Construção**: patologia/reabilitação/prevenção. 414 p. Tradução Leda Maria Marques Dias Beck. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

BERTOLINI, M. S.; MACEDO, L. B.; ALMEIDA, D. H.; ICIMOTO, F. H.; ROCCO LAHR, F. A. Restoration of Structural Timber Elements Using Epoxy Resin: Analysis of Mechanical Properties. **Advanced Materials Research** (Online), v. 778, p. 582-587, 2013.

BODIG, J.; JAYNE, B. **Mechanics of wood and wood composites**. Nova York: Van Nostr and Reinhold Company Inc., 712p. 1982.

BRITO, L. D. **Patologia em estruturas de madeira**: metodologia de inspeção e técnicas de reabilitação. 2014. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

BRITO, L. D.; CALIL JUNIOR, C. Proposta de técnicas de reabilitação e de reforços de vigas de madeira laminada colada (MLC) com parafusos auto atarraxantes. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira, 14., 2014, Natal. **Anais...** Natal: UFRN, 2014.

CALIL JUNIOR, C.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira**. 3. ed. Barueri, São Paulo: Manole, 2010. 160 p.

CENTRO DE INTELIGENCIA EM FLORESTAS. **Pinus**. Viçosa, 2008.

CRUZ, H. Patologia, avaliação e conservação de estruturas de madeira. In: Curso Livre Internacional de Património, 2., 2001, Santarém. **Anais...** Santarém: Associação Portuguesa dos Municípios com centro histórico, Fórum UNESCO Portugal, 2001.

CRUZ, H.; NUNES, L. A madeira como material de construção. Lisboa: Núcleo de Estruturas de madeira, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2005.

CRUZ, H.; NUNES, L. **A madeira como material de construção**. Lisboa: Núcleo de Estruturas de Madeira, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2015.

CRUZ, I. P.; MENDONÇA, M. Comportamiento de las ligaciones madeira- resinas sintéticas e fibra de vidrio na restauração de peças estruturais. **Tecnologia y Construccion**, v.18, n.1, p. 37-43, 2002.

CUNHA, J.; SOUZA JUNIOR, D. A. Structural evaluation of wood pieces reinforced by carbon fibers. **Journal of Civil Engineering**, University of Minho, v. 20, p. 71-81, 2004.

CUSTÓDIO, J.; BROUGHTON, J.; CRUZ, H. Rehabilitation of timber structures: preparation and environmental service condition effects on the bulk performance of epoxy adhesives.

Construction and Building Materials, v. 25, p. 3570-3582, 2011.

DIAS, F. M.; LAHR, F. A. R. Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente. **Scientia Forestalis**, v.65, p. 102-113, 2004.

FAIRWEATHER, A. D.; RALSTON, I. B. M. The Neolithic timber hall at Balbridie, Grampian Region, Scotland: the building, the date, the plant macrofossils. **Antiquity**, v. 67, n. 255, p. 313-323, 1993.

FOELKEL, C. Qualidade da madeira do Eucalipto: Reflexões acerca da utilização da densidade básica como indicador de qualidade da madeira no setor de base florestal. In:_____. **Eucalyptus Online Book**. 2015. cap. 41, p. 1-199.

GALLIO, E.; GATTO, D. A.; LAZAROTTO, M.; BELTRAME, R. (2017). Eficiência de preservantes fungicidas em madeiras de duas espécies florestais submetidas à deterioração por fungo. **Nativa**, v. 5, n. 6, p. 434-439, 2017.

GESUALDO, F. A. R. **Notas de aula de Estruturas de madeira**. Uberlândia: FECIV/UFU, 2003.

GONZAGA, A. L. **Madeira: Uso e Conservação**. Brasília, DF: IPHAN/MONUMENTA, 2006. 246p.

HELLMEISTER, J. C. **Sobre a determinação das características físicas da madeira**. 1982. 161p. São Carlos, Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

HILDEBRANDT, J.; HAGEMANN, N.; THRAN, D. The contribution of wood-based construction materials for leveraging a low carbon building sector in Europe. **Sustainable cities and society**, v. 34, p. 405-418, 2017.

LAHR, F. A. R.; MACEDO, L. B.; BALANCO, G. G.; SANTOS, N. A.; CHRISTOFORO, A. L. Reparação em vigas de Eucalyptus usando peças de Pinus tratado com CCB. **Revista portuguesa de engenharia de estruturas**, v. 3, p. 29-36, 2017.

MACEDO, L. B.; BALANCO, G. G.; SANTOS, N. A.; MARINI, L. J.; ARROYO, F. N.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Structural Pieces Rehabilitation with Self-Tapping Screws. **International Journal of Materials Engineering**, v. 7, n. 5, p. 83-87, 2017. DOI: 10.5923/j.ijme.20170705.01

MAINIERI, C. **Identificação das principais madeiras de comércio no Brasil**. São Paulo, IPT, Boletim 31, 62p, 1956.

MENDES, A. de S.; ALVES, M. V. S. **A degradação da madeira e sua preservação**. Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal, Brasília . Dept. de Pesquisa. Laboratório de Produtos Florestais, cap. 2, 1988.

NOWAK, T. P.; JASIENKO, J.; CZEPIZAK, D. Experimental tests and numerical analysis of historic bent timber elements reinforced with CFRP strips. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 197-206, 2013.

PIZZO, B.; GAVIOLI, M.; LAURIOLA, M. P. Evaluation of a design approach to the on-site structural repair of decayed old timber end beams. **Engineering Structures**, v. 48, p. 611–622, 2013.

RADKAU, J. 2012. **Wood**: a history. Tradução Patrick Camiller. Malden, Polity Press, 2012.

REVISTA ÁRVORE. **Influência da idade na resistência natural da madeira de Eucalipto Grandis ao ataque de cupim de madeira seca**. Viçosa - Mg: Desconhecida, v. 28, n. 4, 2004.

REVISTA DA MADEIRA - REMADE. **Madeiras tropicais para uso estrutural**. 2005.

SILVA, J. P. A. G. **Especificações de tratamento de preservação para elementos de madeira**. 2008. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto.

SILVA, M. R. **Determinação da permeabilidade em madeiras brasileiras de florestas**

plantadas. 2007. São Carlos, Dissertação de Mestrado, Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos.

SILVA, M. R.; MACHADO, G. O.; CALIL, J. C.; DEINER, L. J. Permeability measurements of Brazilian *Pinus elliottii*. **Wood Research**, Bratislava, v. 53, n. 3, p. 47-56, 2008.

SKOG, K. E.; NICHOLSON, G. A. Carbon cycling through wood products: the role of wood and paper products in carbon sequestration. **Forest Products Journal**, v. 48, n. 7/8, p. 75, 1998.

SOUZA, R. V.; DEMENIGHI, A. L. Tratamentos preservantes naturais de madeiras de floresta plantada para a construção civil. **Mix sustentável**, ed. 5, v. 3, n. 1, 2017.

SVAJLENKA, J.; KOZLOVSKÁ, M.; SPISÁKOVÁ, M. The benefits of modern method of construction based on wood in the context of sustainability. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 14, n. 8, p. 1591-1602, 2017.

WILKINSON, J. G. **Industrial Timber preservation**. London: Associates Business Press. 1979.

ZHANG, S. Y. Mechanical properties in relation to specific gravity in 342 chinese woods. **Wood and Fiber Science**, v. 26, p. 512-526, 1994.