UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

FELIPE HIDEYOSHI ICIMOTO

**Dormentes de Madeira Lamelada Colada (MLC) Reforçados com
Tecidos de Fibra de Vidro**

São Carlos

2018

FELIPE HIDEYOSHI ICIMOTO

**Dormentes de Madeira Lamelada Colada (MLC)
Reforçados com Tecidos de Fibra de Vidro**

Versão Corrigida

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

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

Orientador: Prof. Dr. Carlito Calil Júnior

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 autor

Icimoto, Felipe Hideyoshi

I15d Dormentes de madeira lamelada colada (MLC) reforçados com tecido de fibra de vidro / Felipe Hideyoshi Icimoto; orientador Carlito Calil Júnior. São Carlos, 2018.

Tese (Doutorado) - 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. Dormentes . 2. Madeira Lamelada Colada. 3. Madeira Laminada Colada. 4. Ferrovias. 5. Industrialização da madeira. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **FELIPE HIDEYOSHI ICIMOTO**.

Título da tese: "Dormentes de madeira laminada (MLC) reforçados com tecido de fibra de vidro".

Data da defesa: 28/05/2018.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **Carlito Calil Junior**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

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

APROVADO

P/ Prof. Dr. **Adriano Wagner Ballarin**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP - Botucatu)

APROVADO

Prof. Dr. **Julio Cesar Molina**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP - Itapeva)

APROVADO

P/ Prof. Dr. **Everaldo Pletz**
(Universidade Estadual de Londrina/UEL)

APROVADO

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

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

Dedico este trabalho aos meus pais
Mauricio Hiroshi Icimoto e Neuza Ferreira de Jesus Icimoto
pela educação recebida, força em todos os momentos,
amor e carinho incondicionais e incentivo sempre.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela vida, saúde e uma linda família.

À minha mãe Neuza e meu pai Mauricio pelo amor, carinho, apoio, paciência, confiança e compreensão. Todos os dias vocês estiveram em meus pensamentos mesmo à distância. Obrigado por sempre prezarem pelo meu estudo.

Aos meus Irmão Marcelo e Rafael pela amizade e união.

Ao professor Dr. Carlito Calil Júnior, pela excelente orientação. Agradeço as oportunidades concedidas, confiança depositada, conhecimentos fornecidos, pelo suporte ao que fosse necessário para realização deste trabalho, pelo grande aprendizado e crescimento científico e intelectual.

Aos professores Dr. Francisco Antônio Rocco Lahr e Dr. Antônio Alves Dias pelos ensinamentos acadêmicos e conversa sempre em momentos oportunos.

Ao professor Dr. Adriano Wagner Ballarin pela troca experiências que contribuíram para realização deste trabalho.

A Escola de Engenharia de São Carlos e a Universidade de São Paulo pela oportunidade do curso de doutorado e suporte prestados.

Aos técnicos e amigos do LaMEM, pela amizade e ajuda nos trabalhos realizados.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de doutorado e pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela oportunidade na participação do Projeto PIPE FASE I - Projeto 2013/50095-8.

A Pró-reitora de Pós-graduação da Universidade de São Paulo pelo apoio financeiro.

A indústria REWOOD pela disponibilização da indústria para produção dos dormentes deste trabalho e em especial ao diretor e amigo Dr. Carlito Calil Neto.

Enfim, a todos que de uma alguma forma estiveram envolvidos na realização desde trabalho e na participação desta etapa da minha vida.

Muito obrigado a todos!

“I took a walk in the woods and came out taller than the trees”.

Henry David Thoreau

RESUMO

ICIMOTO, F. H. Dormentes de madeira lamelada colada (MLC) reforçados com tecido de fibra de vidro. 105p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

A primeira ferrovia no Brasil foi inaugurada em abril de 1854 pelo Barão de Mauá com 14,5 km de extensão. Atualmente o país possui 27980 km de ferrovias e esse modal tem participação em 25% na matriz brasileira de transporte de carga. Um dos componentes mais importantes da superestrutura ferroviária é o dormente, que pode ser fabricado utilizando-se diversos materiais como a tradicional madeira, que tem uso histórico e consagrado para esta aplicação estrutural, além do concreto e do aço, e mais recentemente, os compósitos poliméricos. As madeiras com maior tradição no uso em dormentes provêm de espécies nativas de alta densidade com consequente elevada resistência mecânica e durabilidade natural. Porém, devido às restrições impostas à extração destas espécies nativas, houve forte redução de sua oferta, sendo forçada sua substituição por madeira de florestas plantadas de eucalipto de alta densidade como *E. citriodora*, *E. paniculata* e *E. tereticornis*. Contudo, dormentes de diferentes espécies de eucalipto, pouco adequadas para esse uso, estão apresentando muitos problemas em via. Outra madeira de florestas plantadas muito utilizada no Brasil é o pinus e uma aplicação muito nobre para este tipo de madeira é a produção de elementos estruturais em Madeira Lamelada Colada (MLC). O objetivo do presente trabalho foi o estudo teórico e experimental de dormentes de MLC confeccionados com madeiras de *Pinus spp.* tratadas com CCA, coladas com adesivo poliuretano, e reforçados com tecido bidirecional de fibra de vidro. Para tanto, realizou-se um estudo teórico e experimental a partir de ensaios estáticos e dinâmicos tendo-se em vista a necessidade de utilização de novas espécies de madeira de reflorestamento com resistência adequada a tal finalidade. Os resultados obtidos nos ensaios realizados de acordo com a normalização vigente atestaram a viabilidade técnica da utilização de dormentes em MLC de *Pinus spp.* reforçados com fibra de vidro desde que sejam realizadas as classificações visual e mecânica das lamelas, para a obtenção das propriedades de resistência e rigidez necessárias.

Palavras-chave: Ferrovia. Dormentes. Madeira Lamelada Colada. Madeira Laminada Colada. Industrialização da Madeira. Pinus

ABSTRACT

ICIMOTO, F. H. Glulam sleepers reinforced with fiber glass fabric. 105p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

Brazil's first railroad was inaugurated in April, 1854 by Barão de Mauá with 14.5 km of extension. Currently the country has 27980 km of railways, and this transportation modal has 25% participation in the Brazilian freight transport matrix. One of the most important elements of railway superstructure is the sleeper (or tie), which can be manufactured from several materials, such as the traditional wood, that has historical and well-established use for this structural application, as well as concrete, steel, and recently, polymer composites. The classic sleeper is made by timber from native species of high density with consequent high mechanical strength and natural durability. However, due to the restrictions imposed on the extraction of these native species, there was a strong reduction in their supply, being forced to replace them with timber from high density eucalyptus planted forests such as *E. citriodora*, *E. paniculata* and *E. tereticornis*. Therefore, sleepers from different eucalyptus species, that are not suitable for this use, are presenting many problems on railroad. Another wood from planted forests widely used in Brazil is the pinus, and a very noble application for this kind of wood is the production of structural elements in Glued Laminated Timber (Glulam). The aim of this work was the theoretical and experimental study based on static and dynamic tests of Glulam sleepers manufactured using *Pinus spp.* treated with CCA, glued with polyurethane adhesive, and reinforced with bidirectional fiberglass fabric. For that, a theoretical and experimental study was carried out from static and dynamic tests, considering the potential use of new reforestation species of wood with suitable strength to this purpose. The results show technical feasibility in the use of Glulam sleepers made with *Pinus spp.* reinforced with fiberglass provided that visual and mechanical classifications of the timber are realized, in order to obtain the required strength and stiffness properties.

Keywords: Railway. Sleepers. Ties. Glulam. Glued laminated timber. Industrialization of wood. Pinus

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Matrizes de transportes de cargas no Brasil.....	31
Figura 2: Principais cargas transportadas por trens no Brasil	32
Figura 3: Investimento chinês em ferrovias no 12th quinquenário (2012 a 2016).....	32
Figura 4: Elementos da superestrutura ferroviária	33
Figura 5: Vista geral de um trecho de via, com destaque para os dormentes.....	33
Figura 6: Esquema de classificação para vários tipos de compósitos	40
Figura 7: Dimensões e desenho de dormente otimizado: (a) Dimensões longitudinais e da seção transversal; (b) Dormente otimizado em perspectiva; (c) <i>Layout</i> dos painéis sanduiche no centro do dormente	45
Figura 8: Dormente encapsulado com <i>roving</i> de fibra de vidro	46
Figura 9: Dormentes de AEL da ponte <i>New Meadows</i>	47
Figura 10: Disposição das lamelas de dormentes de AEL	48
Figura 11: Rachas longitudinais nos dormentes de AEL	48
Figura 12: (a) Vista de topo do dormente; (b) Lamelas em termos do MOE.....	49
Figura 13: Configuração adotada para os ensaios	52
Figura 14: Lote de madeira.....	52
Figura 15: Faces da madeira e incidência de nós de face, centro e canto	53
Figura 16: Classificação mecânica por vibração transversal	54
Figura 17: Disposição de montagem pela classificação visual.....	55
Figura 18: Corte do tecido de fibra de vidro	56
Figura 19: Armazenamento do tecido	56
Figura 20: Posicionamento do reforço na seção transversal do dormente	57
Figura 21: Lamelas separadas por grupos de classificação visual e mecânica.....	59
Figura 22: (a): Início do processo de aplainamento S4S; (b) Regularização da peça	60
Figura 23: (a) Final do aplainamento; (b) Retirada das lamelas da plaina.	60
Figura 24: Separação das lamelas.....	60
Figura 25: Montagem prévia das lamelas para composição dos dormentes.....	61
Figura 26: Posicionamento das lamelas para colagem	61
Figura 27: Aplicação de cola nas lamelas.	62
Figura 28: Prensagem dos dormentes	62
Figura 29: Dormentes recém-retirados da prensa.....	63
Figura 30: Dormente no final do processo produtivo.....	63

Figura 31: Esquema de ensaio de flexão	65
Figura 32: Realização do ensaio de flexão	65
Figura 33: Esquema de retirada dos corpos de prova	66
Figura 34: Esquema de ensaio de compressão normal - placa	67
Figura 35: Corpo de prova de compressão normal – placa	67
Figura 36: (a) Ensaio de compressão normal – placa; (b) Apoio do transdutor.....	68
Figura 37: Esquema de ensaio de arrancamento normal de tirefão	69
Figura 38: Realização do ensaio de arrancamento normal	69
Figura 39: Corpo de prova de arrancamento normal de tirefão ao final do ensaio	70
Figura 40: Esquema de ensaio de arrancamento lateral	70
Figura 41: Ensaio de arrancamento lateral	71
Figura 42: Corpo de prova de arrancamento lateral de tirefão ao final dos ensaios.....	71
Figura 43: Esquema de ensaio para a determinação da dureza Janka	72
Figura 44: Ensaio de dureza Janka na direção normal às fibras	72
Figura 45: (a) Amostras em autoclave; (b) Estufa de secagem	73
Figura 46: (a) Amostras no início; (b) Amostra ao final do ensaio de delaminação.....	74
Figura 47: Dispositivo de cisalhamento na linha de cola para vigas de MLC	75
Figura 48: Ensaio de cisalhamento na linha de cola.....	75
Figura 49: Ruptura por cisalhamento na linha de cola.	76
Figura 50: Dormente antes do ensaio dinâmico.	77
Figura 51: Dormente durante o ensaio dinâmico.....	78
Figura 52: Resultados de MOE para os dormentes de MLC de Pinus.	81
Figura 53: Resultado de MOE para dormentes de eucaliptos usados atualmente	82
Figura 54: Resultados de MOR para os dormentes de MLC de Pinus	83
Figura 55: Resultado de MOR para dormentes de eucaliptos usados atualmente.....	84
Figura 56: Resultados de $f_{c90,p}$ para os dormentes de MLC de Pinus	84
Figura 57: Resultados de d_{max} para os dormentes de MLC de Pinus	85
Figura 58: Resultados de d_{res} para os dormentes de MLC de Pinus	85
Figura 59: Resultados de d_{max} e d_{res} para dormentes de eucalipto.	86
Figura 60: Resultados de Ra_0 para os dormentes de MLC de Pinus	87
Figura 61: Resultados de Ra_0 para dormentes de eucalipto.....	87
Figura 62: Resultados de Ra_{90} para os dormentes de MLC de Pinus	88
Figura 63: Resultados de Ra_{90} para dormentes de eucalipto	89
Figura 64: Resultados de f_H para os dormentes de MLC de Pinus.....	89

Figura 65: Resultados de f_v para os dormentes de MLC de Pinus	90
Figura 66: (a) Dormente tratado com CCA; (b) Dormente tratado com creosoto.....	92
Figura 67: Resultados do ensaio dinâmico para o dormente de MLC de Pinus reforçado	93
Figura 68: Desgaste superficial devido ao afundamento da placa de apoio ao final do ensaio dinâmico para o dormente de MLC de <i>Pinus spp.</i> reforçado	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Vantagens e desvantagens dos tipos de dormentes	34
Tabela 2: Trabalhos de mestrado e doutorado em MLC – LaMEM/EESC/USP	42
Tabela 3: Configuração da seção transversal de dormentes de MLC de <i>Pinus oocarpa</i>	50
Tabela 4: Valores de resistência e rigidez à flexão para dormentes poliméricos e de madeira	50
Tabela 5: Dimensões das lamelas	53
Tabela 6: Porção máxima da face ocupada por um nó	53
Tabela 7: Tolerâncias para defeitos de secagem e fissuras	54
Tabela 8: Propriedades do tecido de fibra para os dormentes finais	55
Tabela 9: Especificação técnica do adesivo Jowapur	58
Tabela 10: Disposição das camadas de tecido de fibra de vidro dormentes finais.....	58
Tabela 11: Quantidade de corpos de prova dos dormentes por propriedade mecânica investigada.	64
Tabela 12: Quantidade de dormentes para ensaio de flexão	64
Tabela 13: Número de corpos de prova utilizados na obtenção das propriedades mecânicas.	79
Tabela 14: Propriedades físicas de dormentes e espécies de <i>Pinus</i>	80
Tabela 15: Densidade de algumas espécies de dormentes eucaliptos usados atualmente no Brasil	81
Tabela 16: Resultados de delaminação para os dormentes de MLC de <i>Pinus spp.</i> com e sem reforço.....	91
Tabela 17: Resultados da ANOVA e do teste de Tukey.	92

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	25
2 OBJETIVO	28
2.1 Objetivos específicos	28
3 REVISÃO BILIOGRÁFICA.....	29
3.1 Ferrovias	29
3.2 Dormentes	33
3.3 Dormentes de madeira	35
3.4 Documentos normativos	39
3.5 Compósitos Estruturais e MLC.....	40
3.6 Dormentes de compósitos e de MLC.....	44
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	52
4.1 Madeira	52
4.2 Classificação e disposição das lamelas	53
4.4 Tecido de fibra de vidro.....	55
4.5 Adesivo	57
4.6 Planejamento experimental.....	58
4.7 Fabricação dos dormentes de MLC na indústria	59
4.8 Caracterização de dormentes	63
4.8.1 Ensaio de flexão	64
4.8.2 Ensaio de compressão normal - placa	66
4.8.3 Ensaio de arrancamento normal de tirefão	68
4.8.4 Ensaio de arrancamento lateral de tirefão	70
4.8.5 Ensaio de dureza Janka	72
4.8.6 Ensaio de delaminação	73
4.8.7 Ensaio de cisalhamento na linha de cola	74
4.8.8 Ensaio dinâmico	76

4.9 Análise estatística	78
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	80
5.1 Resultados dos ensaios estáticos	81
5.2 Resultados do ensaio dinâmico	93
6 CONCLUSÕES	96
7 REFERENCIAS	98

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

O início das ferrovias no Brasil é datado de 1854 quando o Barão de Mauá construiu a chamada de Estrada de ferro Mauá, que ligava a cidade do Rio de Janeiro ao pé serra de Petrópolis, com 14,5 km de comprimento.

De 1854 a 1953 as ferrovias brasileiras expandiram, mesmo que de forma mal planejada, até atingirem 37000 km de extensão. Cerca de cem anos depois, em 1957, a União passou a administrar 22 ferrovias, até então independentes, criando a rede Ferroviária Federal (RFFSA), com uma malha total de 29713 km de extensão. Herdou contudo, boa parte destas linhas férreas com profundo desgaste em suas vias permanentes, com excesso de pessoal e um grande *déficit* operacional.

Em 1997, desde que o sistema ferroviário brasileiro foi passado para a administração privada, por meio das concessões, os investimentos privados na recuperação da malha, modernização de locomotivas e vagões, além de novos métodos de gestão trouxeram resultados positivos para o setor. Estes investimentos totalizaram cerca de R\$ 37 bilhões entre os anos de 2002 e 2012, porém a malha ferroviária, atualmente com 27980 km de extensão, não foi ampliada.

Nos últimos anos o interesse no setor ferroviário vem ganhando destaque. Em 2016 o governo brasileiro lançou o Programa de Parcerias de Investimentos (PPI) com empresas privadas para empreendimentos em diversos setores, contando com 55 projetos destinados para área de transportes, com foco preferencial na malha ferroviária, totalizando cerca de R\$ 133 bilhões.

A participação porcentual do transporte por ferrovias na matriz brasileira de transporte de carga passou de aproximadamente 15% no início das concessões para 25% na atualidade e a estimativa é de que atinja 35% no final de 2020.

O modal ferroviário faz uso de comboios extensos, rebocados por uma única unidade motora, gerando grande economia de energia. O caminhão por sua vez acaba emitindo até 10 vezes mais gases poluentes pelo maior número de veículos necessários para transportar a mesma quantidade de carga que os trens. Particularmente o transporte ferroviário de cargas proporciona um menor custo por tonelada transportada em relação ao transporte rodoviário.

Um dos componentes mais importantes da superestrutura ferroviária é o dormente, que pode ser fabricado utilizando-se diversos materiais como a tradicional madeira, que tem uso

histórico e consagrado para esta aplicação estrutural, além do concreto e do aço, e mais recentemente, os compósitos poliméricos.

Apesar dos materiais aço e concreto apresentarem algumas vantagens sobre a madeira, como elevada durabilidade quando expostos às intempéries, resistência ao ataque de fungos, alta disponibilidade de matéria-prima para produção e possibilidade de fabricação em diferentes geometrias e comprimentos, diversos aspectos são condicionantes e inviabilizam algumas aplicações para esses dormentes. Por exemplo, o alto custo de implantação e a impossibilidade de utilização em conjunto com dormentes de madeira.

Dormentes alternativos de compósitos poliméricos estão em desenvolvimento ao redor do mundo, e vem sendo aplicados em diversos países. Os testes iniciais mostram que estes dormentes estão apresentando diversos problemas técnicos como ruptura frágil à flexão, fixação deficiente do tirefão e falta de ancoragem no lastro. No entanto, com tecnologia e desenvolvimento, pode ser um material promissor para esta utilização.

Por outro lado, a madeira é o material mais tradicional para a fabricação de dormentes e, ainda, o mais utilizado no mundo. Com baixo custo de produção, reúne a maioria das propriedades mecânicas exigidas para esta aplicação estrutural, como elevada absorção á impactos, amortecimento de vibrações, resistência e rigidez suficiente para receber os esforços e transmiti-los ao lastro, boa fixação dos trilhos, adequado isolamento elétrico entre os trilhos, durabilidade assegurada, em alguns casos, com tratamento preservante e excelente trabalhabilidade em campo pelo fácil transporte e instalação. Além disso, é o único material de fonte renovável e apresenta a melhor relação resistência/peso entre os materiais citados. Por essas razões, as empresas ferroviárias dão preferência à utilização de dormentes fabricados de madeira.

As madeiras com maior tradição no uso de dormentes são as madeiras nativas de alta densidade e, conseqüentemente, elevada resistência mecânica e durabilidade natural.

Porém, devido às restrições impostas à extração de espécies nativas, houve forte redução de oferta de madeira tropical de qualidade, elevando seu preço no mercado. Estes fatores, juntamente com o avanço da engenharia, contribuíram para que os operadores logísticos de transporte ferroviário buscassem madeiras alternativas mais baratas e a utilização de materiais estruturais de regular disponibilidade no mercado, como o aço, o concreto e os polímeros, embora o dormente de madeira seja o único produzido com matéria-prima totalmente renovável.

As madeiras nativas do Brasil para a fabricação de dormentes são de essências nobres, como maçaranduba, aroeira, ipê, jacarandá, etc. Porém, com a escassez destas espécies, partiu-

se para o uso de madeiras de florestas plantadas, como o eucalipto, substituindo-se assim as espécies nativas e permitindo a exploração racional da madeira.

Em 1904, teve início do uso do eucalipto para dormentes quando a extinta Companhia Paulista de Estradas de Ferro por iniciativa de Edmundo Navarro de Andrade estabeleceu plantios de eucalipto com o objetivo de suprir a necessidade de lenha, postes de eletrificação e dormentes desta companhia.

No Brasil os dormentes de madeira são produzidos em sua totalidade de madeira maciça (serrada, na sua maioria), não sendo usados, em escala comercial, dormentes de madeira reconstituída ou de outros produtos à base de madeira. Porém, a dificuldade de se encontrar peças estruturais de madeira maciça de grandes dimensões está a cada dia mais presente.

Icimoto (2012) analisou as propriedades mecânicas de dormentes de madeira serrada de *Pinus oocarpa*, verificando a insuficiente resistência e rigidez para esta aplicação estrutural devido à inevitável presença de características naturais nas peças de madeira, como a medula por exemplo, que diminuem sua resistência e rigidez.

Uma aplicação muito nobre para a madeira de *Pinus* é a produção de elementos estruturais em Madeira Lamelada Colada (MLC). A MLC é um elemento estrutural obtido a partir da colagem de topo e de face de peças estruturais de madeira (denominadas lamelas) classificadas visual e mecanicamente, com as fibras das lamelas dispostas paralelamente ao eixo da peça, possibilitando formar elementos retos ou curvos.

A proposta do presente estudo foi a de produção de dormentes em MLC reforçados com tecido bidirecional de fibra de vidro utilizando madeira da espécie de *Pinus spp.* tratada com CCA e coladas com adesivo poliuretano como uma alternativa de dormente aliando à necessidade de utilização de novas espécies de madeira com resistência adequada para atender a demanda das empresas ferroviárias e a busca pelo uso da madeira de forma sustentável por meio do uso de espécies de madeiras de reflorestamento.

2 OBJETIVO

- Estudo teórico e experimental de dormente de Madeira Lamelada Colada (MLC) de pinus reforçado com tecido bidirecional de fibra de vidro.

2.1 Objetivos específicos

- Avaliar o desempenho estrutural de dormentes produzidos em MLC de *Pinus spp.* reforçados com fibra de vidro, seguindo-se as recomendações normativas de ensaios da norma brasileira ABNT NBR7511:2013 – Dormentes de Madeira.
- Avaliar a influência do reforço de fibra de vidro nas propriedades resistência e rigidez à flexão, resistência da ligação entre o tirefão e o dormente, resistência ao cisalhamento na linha de colagem e a qualidade da colagem na delaminação.
- Avaliar o comportamento dinâmico do dormente nas condições padronizadas de ensaio.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, a revisão da literatura abrange os tópicos: ferrovias, dormentes, dormentes de madeira, documentos normativos, compósitos estruturais, madeira lamelada colada, dormentes de compósitos estruturais e dormentes em madeira lamelada colada.

3.1 Ferrovias

A primeira ferrovia no Brasil foi inaugurada em 1854 pelo Barão de Mauá. Esta foi chamada de Estrada de Ferro Mauá, e ligava a cidade do Rio de Janeiro ao pé serra de Petrópolis, com 14,5 km de comprimento (CORREA, 2008).

Brina (1979) relata que entre 1854 até 1953 a expansão das ferrovias brasileiras chegou a atingir 37000 km de extensão.

Em 1957, cem anos depois da criação da primeira ferrovia, foi criada a rede Ferroviária Federal S/A (RFFSA) que incorporou 22 ferrovias de propriedade da União, num total de 29713 km de extensão, herdando parte destas linhas férreas profundamente desgastadas, com excesso de pessoal e um grande *déficit* operacional. Nascia assim com a responsabilidade de conseguir reverter essa situação, ao mesmo tempo em que surgia a indústria automobilística nacional (TELLES, 2011).

Desde a sua criação até 1995, o total de cargas transportadas anualmente pela RFFSA passou de 5,5 bilhões para 36,4 bilhões de TKU (tonelada quilômetro útil) e redução de 158.814 para 37.441 trabalhadores. Embora a criação da RFFSA tenha representado um enorme progresso em relação a situação anterior, com melhorias técnicas, administrativas e operacionais, não foi possível eliminar o volumoso *déficit* financeiro que se agravou entre 1980 e 1995 com a redução gradativa no investimento anual de cerca de R\$ 1 bilhão caindo para R\$ 50 milhões, demonstrando que aquele modelo de operação estava esgotado. (TELLES, 2011).

Com o intuito de desonerar o Estado, melhorar a alocação de recursos, aumentar a eficiência operacional, fomentar o desenvolvimento do mercado de transportes e melhorar a qualidade dos serviços, o governo federal iniciou o processo de desestatização do setor ferroviário em 1992 (ANTT, 2016).

Desde que o sistema ferroviário brasileiro foi passado para a administração privada por meio das concessões, a partir de 1997, os investimentos privados na recuperação da malha, modernização de locomotivas e vagões, além de novos métodos de gestão trouxeram resultados

positivos para o setor. Estes investimentos totalizaram cerca de R\$ 37 bilhões, entre os anos de 2002 e 2012 (POMPEMAYER; CAMPOS NETO; SOUSA, 2012).

Atualmente os custos de logística no Brasil correspondem a 20% do PIB, enquanto que nos Estados Unidos estes custos são de 10,5% do PIB. (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2016).

Os quatro países com maiores densidades de malha ferroviária (km de ferrovias/1000 km² de área) são Alemanha (124), Japão (75), Itália (69) e Inglaterra (68). Os EUA têm 23 km/1000 km² e o Brasil ocupa a 17^a colocação, com uma densidade de 3,4 km/1000 km² (CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY, 2017).

Observa-se que a utilização do transporte ferroviário em larga escala nos países desenvolvidos demonstram a carência existente no sistema ferroviário brasileiro, porém nos últimos anos o interesse no setor ferroviário vem ganhando destaque.

O governo brasileiro lançou em 2016 o Programa de Parcerias de Investimentos (PPI) para viabilizar privatizações e demais concessões à iniciativa privada para empreendimentos em diversos setores, contando em 2018 com 55 projetos de investimentos na ordem de R\$ 132,7 bilhões destinados para área de transportes com foco preferencial na malha ferroviária (AGENCIA BRASIL, 2017).

A participação percentual do transporte por ferrovias, na matriz brasileira de transporte de carga, passou de aproximadamente 15% no início das concessões para 25% na atualidade. A estimativa é que atinja 35% no final da década de 2020 (POMPEMAYER; CAMPOS NETO; SOUSA, 2012).

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia Estatística (2010), mais de 80% da população brasileira vive no meio urbano. Contudo, o deslocamento dessas pessoas é feito, principalmente por modal rodoviário, causando grandes congestionamentos e, consequentemente, perdas de tempo desnecessárias.

Os diversos meios de transporte para carga e passageiros mais utilizados são o rodoviário, o ferroviário, o aéreo, o fluvial e o marítimo. A viabilidade de utilização dessas diversas modalidades depende de razões econômicas e logísticas, podendo ser citados a distância de transporte, a disponibilidade de estradas e ferrovias, as características do material a ser transportado e as exigências que o material transportado impõe (PORTO, 2004).

Segundo Ferreira (2002), deve-se salientar que o modal ferroviário, tanto no transporte de passageiros como no de cargas, torna-se necessário como um elo logístico muito importante para a economia de um país que se caracteriza como um grande produtor agrícola com uma enorme extensão territorial como é o caso do Brasil.

O modal ferroviário faz uso de comboios extensos, rebocados por uma única unidade motora, gerando grande economia de energia. O caminhão, por sua vez, acaba emitindo até 10 vezes mais gases poluentes pelo maior número de veículos necessários para transportar a mesma quantidade de carga que os trens. Assim o transporte ferroviário de cargas proporciona um menor custo por tonelada transportada em relação ao transporte rodoviário (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA ESTATÍSTICA, 2010; PÊGO, 2016).

Entre os 5 países com maior extensão territorial do mundo, os Estados Unidos transportam 37% das cargas pelas ferrovias e 31% por rodovias. No Brasil, atualmente, a matriz ferroviária é responsável por transportar 20,9 % das cargas (Figura 1), cerca de 1/3 quando comparado com a matriz rodoviária nacional (ANTT, 2017; LOBO 2017).

Figura 1: Matrizes de transportes de cargas no Brasil

Fonte: (ANTT, 2017; LOBO 2017)

O transporte sobre trilhos no ano de 2016 foi responsável por movimentar 504 milhões de toneladas de carga (Figura 2), onde o transporte de minério de ferro respondeu por 78,9% do total, sendo que 9,5% coube a agricultura e o restante dividido entre: petróleo, álcool, carvão e produtos da siderurgia (ANTT, 2017).

Figura 2: Principais cargas transportadas por trens no Brasil

Fonte: ANTT (2017)

Um país que vem crescendo nos principais setores da economia mundial não poderia fazer diferente com relação às ferrovias. A China está investindo US\$ 475 bilhões em 35 projetos ferroviários, durante o 13º plano quinquenário (2016-2020). De 2012 a 2016 o país investiu US\$ 109 bilhões anuais, atingindo 124 mil quilômetros de ferrovias em 2016, dos quais 22 mil são de trens de alta velocidade e 4 mil de transporte urbano sobre trilhos. A Figura 3 apresenta o crescimento das ferrovias chinesas nos últimos 5 anos (CHINA RAILWAY GROUP LIMITED, 2016).

Figura 3: Investimento chinês em ferrovias no 12th quinquenário (2012 a 2016).

Fonte: CHINA RAILWAY GROUP LIMITED (2016).

A via férrea é constituída pela infraestrutura e superestrutura. A infraestrutura é composta por cortes, aterros, pontilhões, viadutos e túneis que resultam na plataforma da estrada de ferro, sobre a qual se assenta a superestrutura, devendo manter o traçado da linha em condições de tráfego (SUCENA, 2007). Segundo Porto (2004), a superestrutura da estrada de ferro é constituída pela via permanente e tem a função de suportar os esforços dos veículos e transmiti-los à infraestrutura. Os elementos que compõe a superestrutura ferroviária estão ilustrados na Figura 4.

Figura 4: Elementos da superestrutura ferroviária

Fonte: Porto (2004).

Como apresenta a Figura 4, a superestrutura é composta pelo trilho, fixações, placa de apoio lastro, sub lastro, sub leito e o dormente como o principal responsável pela absorção dos impactos e transmissão dos esforços.

O item 3.2 apresenta as principais vantagens e desvantagens dos materiais que são utilizados para fabricação de dormentes.

3.2 Dormentes

Os dormentes são elementos da superestrutura ferroviária instalados transversalmente aos trilhos (Figura 5) que proporcionam o suporte aos mesmos. Os dormentes podem ser produzidos em madeira, concreto, aço e compósitos poliméricos.

Figura 5: Vista geral de um trecho de via, com destaque para os dormentes

Fonte: Autor (2017).

A Tabela 1 sintetiza as vantagens e desvantagens dos diversos tipos de dormentes.

Tabela 1: Vantagens e desvantagens dos tipos de dormentes

Material do dormente	Vantagens	Desvantagens
Madeira	<ul style="list-style-type: none"> • Material de fonte renovável; • Facilmente trabalháveis (serragem, furação e entalhamento); • Menor massa (fácil de manusear); • Bom isolante elétrico; • Fixação simples; • Boa interação com o lastro; • Aproveitamento dos dormentes usados; • Pouco afetado pelas severas condições de manuseio e de transporte; • Elasticidade da via; • Atuação efetiva sobre o nível de ruído; • Baixo custo energético para produção; • Adaptabilidade. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dormentes AMV (aparelhos de mudança de via) – difíceis de obter; • Durabilidade quando não tratados; • Redução da oferta de madeiras nativas e de espécies de eucalipto de alta densidade.
Concreto	<ul style="list-style-type: none"> • Manutenção da bitola; • Facilmente isolados do trilho (baixa condução de eletricidade); • Baixa manutenção; • Mantem o sistema de fixação com o trilho; • Vida útil do material concreto é longa; • Dão a linha maior peso, favorável a resistência e estabilidade; • Disponibilidade. 	<ul style="list-style-type: none"> • Destruído em descarrilamentos; • Substituição devida a trincas durante tempo de uso devido à flexão e impacto; • Manipulado mecanicamente (alto custo); • Má interação com o lastro; • Incompatível utilização juntamente com dormentes de madeira; • Preço elevado; • Sujeitos a avarias por manipulação inadequada nas operações de carga, descarga e transporte; • Vulnerável à solicitações excepcionais; • Alto condutor de eletricidade.
Aço	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil confecção de dormentes especiais; • Relativamente resistente a sobrecargas; • Alta disponibilidade; • Mantém efetivamente a bitola; • Insensível ao ataque de fungos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Massa reduzida – falta de inércia; • Gasto energético altíssimo para produção da matéria prima e confecção do dormente; • Gasto adicional com isolamento elétrico, com sapatas para absorção de impacto; • Dificil adaptabilidade, trabalhabilidade, manipulação e instalação; • Dificil manter o sistema de fixação; • Tráfego ruidoso; • Custo elevado de aquisição, assentamento, manuseio e manutenção da via; • Alto condutor elétrico; • Incompatível utilização juntamente com dormentes de madeira; • Má interação com o lastro.
Compósito polimérico	<ul style="list-style-type: none"> • Impermeável à água; • Reciclagem de plásticos; • Podem ser instalados em conjunto com dormentes de madeira; • Vida útil estimada em mais 50 anos; • Mesmo formato do dormente de madeira; • Eletricamente não condutivo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Material feito a partir do petróleo (fonte não renovável); • Problemas para fixação do tirefão; • Ruptura à flexão de modo frágil; • Tecnologia em desenvolvimento e consolidação no mercado ferroviário.

Fonte: Adaptado de Icimoto (2013); Manalo et al. (2010); Porto (2004); Sucena (2007)

Pela Tabela 1 observa-se que cada material tem sua particularidade, com vantagens e desvantagens que são pertinentes para cada tipo de utilização, sendo a madeira o material que

mais agrega as propriedades desejadas, e por isso, é o material mais utilizado para fabricação de dormentes no mundo desde surgimento das ferrovias.

3.3 Dormentes de madeira

Os dormentes de madeira têm uma longa história de participação efetiva e desempenho confiável no ambiente ferroviário. A principal vantagem dos dormentes de madeira é sua adaptabilidade, pois podem ser usados para fixação de todos os tipos de trilhos da via férrea. Dormentes de madeira são trabalháveis, fáceis de manipular, de fácil substituição e não precisam de equipamentos robustos para instalação ou manutenção. Deste modo, mesmo em terrenos de difícil acesso estes podem ser reparados ou substituídos. Isto é particularmente atrativo em linhas onde se tem um alto fluxo de trens e o tempo de manutenção é limitado e restrito (RÖTHLISBERGER, 2013; ZAREMBSKI, 1993).

A menor rigidez dos dormentes de madeira, quando comparados aos de aço e concreto protege a faixa superior do trilho e o material rodante (locomotivas e vagões), aumenta o conforto da viagem para os passageiros, reduz os danos no caso de descarrilamento e os efeitos dinâmicos sobre a estrutura da base, além de minimizar os ruídos e as vibrações (RÖTHLISBERGER, 2013).

O país com a maior quantidade de ferrovias no mundo são os EUA com 295mil km de extensão, utilizando em torno de 700 a 800 milhões de dormentes, onde somente em 2015 foram substituídos no país 18 milhões de dormentes e instalados 1 milhão em novos trechos. Deste montante aproximadamente 94% dos dormentes são de madeira e 6% de dormentes de outros materiais como concreto, aço e poliméricos (RAILWAY TIE ASSOCIATION, 2016; CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY, 2017).

Segundo Miller (2007), só em 2006, a *Queensland Rail* (QR) na Austrália comprou 80 mil dormentes de madeira para a manutenção e desenvolvimento das ferrovias. Somente no estado de *Queensland* existem mais de 8 milhões de dormentes de madeira em serviço.

Na Alemanha, o país com maior densidade de malha ferroviária no mundo, as empresas ferroviárias possuem 11 milhões de dormentes de madeira instalados (CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY, 2017; WOIDASKY, 2008).

A rede ferroviária brasileira é composta por 13 operadores de transporte de mercadorias com 27.000 quilômetros de extensão e 16 operadores de transporte de passageiros com 980 quilômetros, transportando 2,7 bilhões de passageiros em 2013 (REVISTA FERROVIÁRIA, 2015).

Segundo Schamberg (2013), no ano de 2012, a empresa ALL, agora chamada RUMO (resultado na fusão da empresa RUMO e ALL em 2015), substituiu 480.000 dormentes na malha existente e instalou em novos projetos 360.000 dormentes de madeira no Brasil. Isso significa que a demanda total da empresa foi de 840.000 dormentes de madeira no ano de 2013 (informação verbal).¹

O custo operacional da empresa RUMO para troca de dormentes de madeira é de R\$40,00/dormente. Os dormentes de concreto só são instalados em novos projetos (trechos novos) ao custo de instalação de R\$150,00/ dormente.

As espécies de madeira mais comuns usadas nos EUA para dormentes são os oaks, e as folhosas mistas, que incluem as gums, maples, birches e hickories. Muitas madeiras coníferas como douglas-fir, hemlocks, true firs e muitas espécies de Pinus também são utilizadas (RAILWAY TIE ASSOCIATION, 2016; AREMA, 2009).

De acordo com Gong (2013), as espécies mais comuns de madeira no leste do Canadá para uso como dormentes são as hard maple, soft maple e yellow birch.

Na China, as porcentagens de espécies de folhosas utilizadas são em torno de 50 a 60% oak e hickory, o restante (40 à 50%) são outras folhosas como australian jarrah, karri, morra, green heart e african azobe (AGICO GROUP, 2015).

As únicas madeiras utilizadas para dormentes na Suíça são folhosas de manejo sustentável de Beech e Oak do próprio país (RÖTHLISBERGER, 2013).

Em Portugal é comum o uso de dormentes de maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) para substituir os dormentes antigos de madeiras mais nobres. Porém, durante nas últimas décadas a ocorreu a diminuição da competitividade de dormentes de madeira devido ao alto custo para manter um grande pátio de secagem, que é necessário para garantir a disponibilidade de um grande estoque de dormentes de madeira, bem como uma diminuição da qualidade geral devido ao surgimento de defeitos de secagem que ocasionam perdas de 15% à 20% do total produzido (ANTÓNIO SILVA, 2015).

Observa-se que nos diferentes países do mundo a grande maioria das madeiras utilizadas para dormentes são folhosas. Isso se deve à alta densidade característica das madeiras folhosas estar relacionada diretamente com altos valores das propriedades mecânicas que são muito importantes para a aplicação estrutural como dormentes ferroviários.

Segundo Andrade (1961), o cultivo de florestas plantadas de espécies folhosas no Brasil teve início em 1904 pela a ex-Companhia Paulista de Estradas de Ferro.

¹ Informação fornecida por Marcelo Schamberg São Carlos, 2013.

Em 1966, o governo brasileiro decretou a lei de incentivos fiscais nº 5.106, que permitia a dedução em até 50% do valor do imposto de renda, para pessoas físicas e jurídicas que fizessem o reflorestamento de essências florestais, árvores frutíferas e árvores de grande porte. Foram plantados milhões de hectares de eucalipto no estado de São Paulo até 1987, quando tais incentivos foram abolidos.

A espécie de eucalipto que sempre liderou em qualidade o uso para dormentes foi o eucalipto citriodora (*Corymbia citridora*) pelas excelentes propriedades físicas e mecânicas.

Essas excelentes propriedades foram constatadas por Ballarin (1999) durante a realização de ensaios laboratoriais sistemáticos em dormentes de eucalipto citriodora. Os ensaios estáticos e dinâmicos mostraram deformações muito baixas, levando-se a crer que, do ponto de vista estrutural, esses dormentes mereceriam uma otimização nas suas dimensões básicas.

Entretanto, nos últimos anos a oferta de eucalipto citriodora foi drasticamente reduzida obrigando os ferroviários a procurarem o uso de outras espécies de eucalipto que estão no mercado, porém com qualidade inferior, o que obriga a troca prematura de dormentes.

Icimoto (2014) avaliou 5 espécies de eucalipto, *E. grandis*, *E. cloeziana*, *E. Urophilla*, *E. paniculata*, *E. rostrata*, utilizadas atualmente pelas empresas ferroviárias no Brasil. Observou, neste caso, que os dormentes de *E. rostrata*, devido à perda de umidade, apresentam rachaduras com abertura suficiente para causarem a perda da ligação entre o dormente e os parafusos que fixam a placa de apoio e o trilho.

As empresas ferroviárias estão encontrando muitas dificuldades no uso do eucalipto para dormentes pois problemas como rachaduras anelares, fendilamentos de topo, esmoados, afundamento de placa de apoio e degradação devido ao ataque de micro-organismos são responsáveis pela necessidade de substituição dos dormentes entre 1 a 5 anos após instalados.

Na busca por soluções para dormentes, as empresas ferroviárias no Brasil estão importando dormentes de quebracho colorado (*Schinopsis sp.*) da Argentina e de carvalho (*Quercus sp.*) dos EUA, devido dificuldade de se encontrar fornecedores sérios de espécies de madeira tropical nativa de manejo florestal no Brasil para uso como dormentes. Isso faz com que a busca pelo uso de madeiras de florestas plantadas para esta finalidade esteja cada dia mais presente.

Pensando no benefício da utilização de madeiras de florestas plantadas, tanto pelo sequestro de carbono como também pelo ciclo de crescimento mais rápido em relação às madeiras tropicais, o Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM), do Departamento de Engenharia de Estruturas (SET), Escola de Engenharia de São Carlos (EESC),

Universidade de São Paulo (USP) estabeleceu uma linha de pesquisa para o desenvolvimento de dormentes sustentáveis, estudando a viabilidade técnica de dormentes de madeiras de florestas plantadas e de madeiras de manejo florestal.

A universidade Queensland University of Technology na Austrália estuda a utilização de madeira macia (*softwood*) de florestas plantadas para uso como dormentes, onde os testes vêm comprovando uma boa adequação técnica do uso destes dormentes para ferrovias leves de segunda classe (HEARSCH, 2008).

Icimoto (2012) avaliou o desempenho de dormentes de *Pinus oocarpa* serrado à flexão estática, concluindo que a resistência e a rigidez à flexão estática são propriedades limitantes para a utilização do *Pinus* como dormentes, devido à presença de medula e grandes nós ao longo de toda peça. A medula é uma região da madeira que possui baixa resistência mecânica. Assim, sua presença reduz os valores nas propriedades de módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR). Nessas condições, umas das soluções para a utilização de *Pinus* para dormentes seria a utilização de produtos engenheirados de madeira como, por exemplo, a MLC, o LVL (Laminated Veneer Lumber) e o PSL (Parallel Strand Lumber), devido às aplicações estruturais conhecidas destes produtos.

Outro estudo importante em dormentes no Brasil é a linha de pesquisa em análise teórica dimensional de dormentes prismáticos de madeira de reflorestamento, realizado pela Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP de Botucatu, no Departamento de Engenharia Rural, liderada pelo Dr. Adriano Wagner Ballarin que vem pesquisando desde 1992 utilizando-se do método computacional dos elementos finitos e mais recentemente com a utilização da propriedade de dureza Brinell como referência para determinação das demais propriedades mecânicas da madeira (BALLARIN, 1999; COLENCI 2006).

Mais recentemente o referido grupo de pesquisas desenvolveu uma ferramenta portátil de baixo custo e fácil manipulação, para determinar a dureza dinâmica de madeiras e correlacionar com a dureza Janka (parâmetro utilizado pela norma brasileira ABNT NBR7190 para determinação desta propriedade). Chamado de Durômetro Portátil para Madeiras (DPM), este equipamento tem oportuna aplicação na avaliação em campo e consequente classificação de madeiras para a aceitação ou rejeição de dormentes ferroviários (COLENCI 2006; BALLARIN, 2012; ALEXANDRE, 2015).

O Durômetro Portátil Automatizado para Madeiras está em sua 3ª geração de desenvolvimento (chamado agora de DPM3) na qual De Assis, Alexandre e Ballarin (2017) calibraram o equipamento com base em ensaios realizados em 7 espécies de eucalipto: *Eucalyptus maculata*, *Eucalyptus microcorys*, *Eucalyptus tereticornis*, *Eucalyptus citriodora*,

Eucalyptus saligna, *Eucalyptus dunnii*, e *Eucalyptus viminalis*, todas madeiras com mais de 20 anos de idade. Os autores relataram uma nova metodologia para o cálculo da dureza dinâmica encontrando uma correlação linear de moderada a forte com a dureza Janka e suas variações.

Considerando a grande dificuldade de encontrar madeira de reflorestamento, principalmente de eucalipto com resistências adequadas para o uso como dormentes, a utilização do durômetro se torna uma ferramenta ágil e de grande eficácia para avaliação em campo na seleção de dormentes.

3.4 Documentos normativos

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) propõe os seguintes textos normativos para dormentes produzidos com diferentes tipos de materiais:

- ABNT NBR 7511:2013 Dormentes de madeira – Requisitos e métodos de ensaio. Esta norma especifica os requisitos e métodos de ensaio para dormentes de madeira destinados à via férrea.
- ABNT NBR 11709:2015 Dormente de concreto – Projeto, materiais e componentes. Esta norma especifica os requisitos para o projeto e a fabricação dos dormentes de concreto e os requisitos para os materiais e componentes utilizados na fabricação destes dormentes.

As normas da ABNT NBR11824:2012 Dormente de aço e a ABNT NBR12477:2012 Dormente de aço laminado foram canceladas e estão em revisão. Por outro lado, o projeto de norma ABNT PN NBR16461:2017 Dormente de compósito polimérico, está em discussão pelo comitê CE-06:100.01 - Comissão de Estudo de Dormentes e Lastros, porém até a data de defesa desta tese não foram divulgadas oficialmente.

A *American Railway Engineering and Maintenance of Way Association* (AREMA) por intermédio da norma “Manual for Railway Engineering:2009”, documento que deu origem a ABNT NBR7511:2013, além de especificar os ensaios necessários para avaliação das propriedades físicas e mecânicas de dormentes, fornece orientações para controle de qualidade na produção, inspeção, manipulação, entrega, instalação, manutenção, isolamento elétrico, durabilidade e modo de avaliação específico da degradação dos materiais; para dormentes de madeira serrada [ingl.: *sawn solid wood ties*], concreto monobloco [ingl.: *monoblock ties*] e bi-bloco [ingl.: *two-blockties*], dormente de aço [ingl.: *steel tie*] e os dormentes de compósitos engenheirados [ingl.: *engineered composites*] se referindo aos dormentes de compósitos

poliméricos [ingl.: *engineered polymer composite* (EPC)] e ou produtos engenheirados de madeira [ingl.: *engineered wood product* (EWP)]).

Ainda segundo a AREMA (2009), as propriedades de resistências mais importantes consideradas para dormentes de madeira são: resistência à flexão, dureza paralela às fibras que indica a resistência ao arrancamento lateral e dureza perpendicular às fibras que indica a resistência para a compressão de placa de apoio.

A norma europeia EN 13145:2011 - *Railway applications - Track - Wood sleepers and bearers*, não indica requisitos de resistência para dormentes de madeira. Os dormentes são selecionados de acordo com a classificação visual com base principalmente no conhecimento empírico de empresas ferroviárias. Esta norma apenas fornece uma lista de espécies de madeira adequadas para uso em ferrovias e o padrão apresenta a qualidade mínima (características aceitáveis de qualidade visual) de dormentes de madeira, mas para *softwood* é estabelecido também um mínimo de 5 anéis de crescimento por 25 mm para garantir o mínimo de densidade.

3.5 Compósitos Estruturais e MLC

O material compósito pode ser considerado como sendo qualquer material multifásico que exiba uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constituem. Existe também uma variedade de compósitos que ocorre na natureza com a madeira, que consiste em fibras de celulose resistentes e flexíveis, envolvidas e mantidas unidas por meio de um material rígido chamado lignina (CALLISTER, 2002).

Materiais compósitos são compostos por apenas duas fases; uma chamada de matriz, que é contínua e envolve a outra fase, chamada de fase dispersa. As propriedades dos compósitos são função das propriedades das fases constituintes. Um esquema simples de classificação dos materiais compósitos está mostrado na Figura 6.

Fonte: Callister (2002).

A norma AREMA:2009 na seção 5.2-Material, define como compósito um material formado por dois ou mais materiais distintos (resina polimérica com reforço no caso de compósitos poliméricos, e laminados de madeira colados com adesivo estrutural no caso de produtos engenheirados de madeira) para obter propriedades específicas superiores que as dos componentes individuais.

Os compósitos a base de madeira englobam desde painéis de fibra de madeira para aplicação interna como móveis, até vigas de madeira laminada como estruturas na construção civil. Nestes compósitos o elemento básico é a fibra da madeira, podendo variar em diferentes tamanhos e formatos, incluindo: fibras, partículas, lascas, laminas e madeira serrada. As propriedades estruturais e a aparência visual podem ser aumentadas mudando-se a geometria e o tamanho dos elementos, combinando-os e reorganizando-os (FOREST PRODUCT LABORATORY, 2010; MALONEY, 1985).

A norma americana ASTM D198 (2015) define uma viga de compósito de madeira como uma construção laminar que compreende uma combinação de madeira e outros materiais simples ou complexos montados e intimamente fixados em relação uns aos outros de modo a usar as propriedades de cada um para se obter vantagens estruturais específicas para todo conjunto.

Segundo Callister (2002), para os compósitos reforçados com fibras a fase dispersa tem a geometria de uma fibra e frequentemente alta resistência e/ou rigidez com relação ao seu peso. Já os compósitos estruturais são uma combinação de compósitos e materiais homogêneos.

A MLC é um compósito lamelar estrutural de madeira que tem por característica a uniformidade. Isso é possível devido a utilização de técnicas de engenharia aplicadas à madeira (um produto natural e heterogêneo) que permite dispersar as características naturais da madeira ao longo do comprimento da peça proporcionando confiabilidade e elevada resistência aos elementos. Para se obter o melhor desempenho mecânico de uma viga de MLC deve-se classificar as lamelas que farão a composição deste elemento para que sejam dispostas racionalmente nas regiões onde são sofridas maiores solicitações (tração e compressão), como também na região onde são solicitados menores esforços (cisalhamento). Para isso, antes da sua utilização, as lamelas devem passar por um processo de classificação visual e mecânica.

Compósitos estruturais à base de madeira são feitos de laminas e/ou lascas de madeira com uma pequena porcentagem de adesivos e outros aditivos. A proposta dos materiais compósitos é de melhorar as propriedades de resistência mecânica, resistência contra umidade,

fogo, controle da acidez e contra ao ataque de organismos xilófagos (FOREST PRODUCT LABORATORY, 2010).

No Brasil o LAMEM-EESC-USP possui uma linha de pesquisa com o intuito de aprimorar o conhecimento, comprovar as teorias existentes e desenvolver tecnologia em MLC. Até o momento foram desenvolvidos os seguintes trabalhos de Mestrado e Doutorado apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Trabalhos de mestrado e doutorado em MLC – LaMEM/EESC/USP

Autor	Ano	Trabalho	Título
Carrasco	1989	Doutorado	Resistência, Elasticidade e Distribuição de Tensões nas Vigas Retas de Madeira Laminada Colada (MLC)
Bono	1996	Mestrado	Madeira Laminada Colada na Arquitetura: Sistematização de Obras Executadas no Brasil
Macedo	1996	Mestrado	Estudo de Emendas Dentadas em Madeira Laminada Colada (MLC): Avaliação de Método de Ensaio
Jesus	2000	Doutorado	Estudo do Adesivo Poliuretano à Base de Mamona em Madeira Laminada Colada (MLC)
Macedo	2000	Doutorado	Fadiga em Emendas Dentadas em Madeira Laminada Colada
Azambuja	2002	Mestrado	Avaliação do Adesivo Poliuretano à Base de Mamona para Fabricação de Madeira Laminada Colada (MLC)
Zangiacomo	2003	Mestrado	Emprego de Espécies Tropicais Alternativas na Produção de Elementos Estruturais de Madeira Laminada Colada
Fiorelli	2005	Doutorado	Estudo Teórico e Experimental de Vigas de Madeira Laminada Colada Reforçadas com Fibra de Vidro
Azambuja	2006	Doutorado	Estudo Experimental de Adesivos para Fabricação de Madeira Laminada Colada: Avaliação da Resistência de Emendas Dentadas da Durabilidade e de Vigas
Mioto	2009	Doutorado	Estruturas mistas de Madeira-concreto: avaliação das vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibras de vidro
Calil Neto	2011	Mestrado	Madeira Laminada Colada (MLC): Controle de Qualidade em Combinações Espécie-adesivo-tratamento preservativo
Icimoto	2013	Mestrado	Dormentes em Madeira Laminada Colada de <i>Pinus oocarpa</i>
Cavalheiro	2014	Mestrado	Madeira Laminada Colada de <i>Schizolobium amazonicum</i> Herb. (Paricá): combinação adesivo/tratamento preservante
Martins	2016	Doutorado	Análise Numérica e Experimental de vigas de Madeira Laminada Colada em Situação de Incêndio
Nogueira	2017	Mestrado	Proposta de um método de ensaio para o controle de qualidade na produção de elementos estruturais de MLC e LVL

Fonte: Autor (2017).

Estas pesquisas servem de suporte para as indústrias brasileiras de MLC no que tange a todas as variáveis do processo produtivo, tipos de adesivos e madeiras a serem utilizadas para cada ambiente, segundo cada necessidade. Assim como, para disseminar o conhecimento desta tecnologia entre engenheiros e arquitetos na forma de aulas, palestras, minicursos ministrados na universidade e em congressos.

Todos estes trabalhos desenvolvidos foram essenciais para que o LaMEM pudesse contribuir para o desenvolvimento da primeira norma brasileira de MLC, à qual está em fase de finalização e deve ser homologada no ano de 2018.

Atualmente no Brasil existem 3 indústrias ativas de MLC: REWOOD e ITA construtora, ambas sediadas no estado de São Paulo e com capacidade de produção de 150 m³ mensais, e a empresa ESMARA com sede em Viamão – Rio Grande do Sul, com capacidade mensal de produção de 40 m³. A REWOOD produz vigas de MLC com madeira de Pinus e a ITA assim como a ESMARA utilizam a madeira de eucalipto, ambas colam madeira com adesivo à base de poliuretano. Pela questão geográfica o LaMEM faz o controle de qualidade periódico dos produtos da ITA e da REWOOD.

O uso de MLC reforçada custa menos pois o reforço reduz o volume utilizado de madeiras com classificação de elevada resistência (nas regiões externas da viga). Além disso, as vigas de MLC reforçadas possuem menor variabilidade pois não são afetadas pelas características naturais de crescimento da madeira. No que se refere à solicitação à flexão, o reforço provoca uma falha dúctil, aumenta a capacidade de carga e provoca excessiva deflexão antes da ruptura (ISSA; KMEID, 2005).

Segundo os autores Davids, Dagher e Breton (2000), a combinação fibra de vidro e adesivo fenol resorcinol para colagem entre lamela-fibra-lamela foi utilizada com sucesso para fabricação de vigas de MLC de Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) e Western hemlock (*Tsuga heterophylla*).

Lopes-Anido et. al. (2005) produziram vigas de MLC de Southern yellow pine reforçadas com tecido de fibra de vidro coladas com resina ester vinílica obtendo satisfatória interação entre os componentes madeira-adesivo-fibra.

No LaMEM, Fiorelli (2005) reforçou MLC de *Pinus caribea var. hondurensis* com tecido de fibra de vidro unidirecional adicionado na última linha de cola da seção tracionada, com espessura correspondente de 1,2% e 3,3% da altura da viga (a espessura do reforço refere-se à espessura nominal da fibra). Para colagem da madeira usou adesivo Fenol-resorcinol (Anzo Nobel) e para colagem do tecido de fibra de vidro utilizou o adesivo epóxi AR-300 (Barracuda). O estudo concluiu que acima de 3,3% o reforço não foi significativo para ganho de resistência ou rigidez à flexão.

Miotto (2009) avaliou o comportamento estrutural de vigas de MLC de Lyptus® reforçado com fibra de vidro, notando um ganho de 6% no módulo de ruptura (MOR) e ganho de 17,3% na rigidez quando comparadas a vigas sem reforço. A espessura nominal do reforço equivalente a 10mm (20 camadas de tecido) correspondeu a 3,1% da área seção transversal.

Constatou-se que para um nível de carregamento de 80kN, o valor médio das flechas das vigas sem reforço foi 13,8% maior que a média das flechas das vigas reforçadas. Segundo o autor, o emprego do reforço com fibras sintéticas se justifica pela diminuição na variabilidade dos resultados entre as vigas estudadas.

Utilizando fibra de vidro pre-tensionada, Dagher et. al. (2010) reforçou externamente com 1% em relação ao volume das vigas de MLC de *Douglas fir* utilizando adesivo fenol resorcinol, obtendo resultados para a flexão 38% maior comparado ao reforço de fibra convencional (sem pré-tensionamento) e 95% maior comparado a vigas de MLC sem reforço.

Raftery & Rodd (2015) reforçaram vigas de MLC de Sitka spruce (*Picea sitchensis*) de baixa classificação C16, com densidade de 360g/m³, utilizando o adesivo fenol resorcinol para colagem também da fibra de vidro entre as duas lamelas inferiores da viga (região de tração na flexão). A quantidade de reforço foi de 1,82% em relação a área da seção transversal, obtendo um aumento de rigidez de 18% e no momento final de 31%.

Nota-se que o uso de fibra de vidro contribui para aumentar os valores de resistência e rigidez de vigas de MLC além de reduzir a variabilidade dos resultados.

3.6 Dormentes de compósitos e de MLC.

Estudos recentes em compósitos trazem alternativas para o uso estrutural em diversas áreas da engenharia, como por exemplo, para a aplicação em dormentes ferroviários.

A norma americana AREMA:2009 define os dormentes de compósitos em três tipos:

- Compósito polimérico reforçados com fibra: polímero reforçado com fibra de vidro ou outras fibras além de outros modificadores que podem também ser usados para aumentar particularmente propriedades físicas e mecânicas;
- Compósito polimérico reforçado com partículas: Polímero modificado com pequenas partículas dispersas para aumentar as propriedades físicas e/ou mecânicas.
- Compósitos híbridos: Um compósito que incorpora dois diferentes reforços com fibra ou outros componentes estruturais (como concreto, aço e combinação de polímeros).

Pattamapron et al. (2005) investigou o uso de borracha natural engenheirada para uso como dormentes obtendo resultados satisfatórios para compressão e dureza. Porém para as outras propriedades os resultados não foram satisfatórios devido à alta rigidez do material.

O Laboratório de Pesquisas em Transporte (*Transport Research Laboratory*) no Reino Unido desenvolveu um dormente de polímero reciclado com rigidez similar ao dormente *softwood*, mas com elevada resistência à flexão e também ao arrancamento de tirefão (JORDAN & MORRIS, 2006).

Manalo e Aravinthan (2012) realizaram estudo experimental em dormentes de AMV (aparelho de mudança de via) utilizando compósito laminado sanduíche com revestimento de fibra de vidro e núcleo feito com fenólico modificado. Os dormentes de em tamanho real foram feitos colando camadas em 3 diferentes *layouts*: com orientação (1) horizontal (*flatwise*), (2) vertical (*edgewise*) e (3) camadas internas verticais e externas horizontais. Os resultados de flexão e cisalhamento mostraram que os dormentes com laminação vertical apresentaram apropriada resistência e rigidez para substituir dormentes de AMV de madeira, demonstrando viabilidade e potencial de uso.

Ferdous et. al. (2018) projetou e ensaiou um dormente compósito polimérico de novo formato, otimizando o uso de material em 50% ao dormente prismático (Figura 7a e 7b). Os dormentes foram produzidos com painéis sanduíche verticais de núcleo fenólico e camada externa de fibra de vidro de 5mm de espessura colocadas horizontalmente na face superior e inferior dos painéis sanduiche verticais. Os painéis foram colados e revestidos com matriz polimérica de epóxi (Figura 7c). A performance atingiu os valores para a norma Australiana e foi similar aos dormentes de madeira, indicando o potencial para substituir este tipo tradicional de dormentes. Na sequência do trabalho foram instaladas 50 peças na *Queensland Rail Network* (ferrovia Australiana).

Figura 7: Dimensões e desenho de dormente otimizado: (a) Dimensões longitudinais e da seção transversal; (b) Dormente otimizado em perspectiva; (c) *Layout* dos painéis sanduiche no centro do dormente

Fonte: Ferdous et. al. (2018)

O preço das tecnologias de dormentes compósitos com elevada quantidade de fibras é aproximadamente de 5 a 10 vezes maior do que o preço de um dormente de madeira padrão (VAN ERP; MCKAY, 2013). Ferdous et. al. (2015) afirma que o custo muito elevado das tecnologias de dormentes compósitos é uma das principais razões para a sua absorção lenta no mercado.

Os dormentes de compósitos têm uma aceitação limitada também devido a inexistência de um histórico de desempenho a longo do tempo, ao contrário da já conhecida madeira, com relação a fadiga, impacto e durabilidade quando tratada corretamente.

Uma forma de utilizar os benefícios estruturais de materiais compósitos para uso como dormentes buscando incrementar resistência e durabilidade é reforçar dormentes de madeira com elementos estruturais como fibra de vidro.

Qiao (1998) avaliou através do método de elementos finitos e experimentalmente, a performance de dormentes de madeira northern red oak (*Quercus rubra*) envolvidos com *roving* (filamentos) de fibra de vidro (GFRP) à 45° e colados com resina epóxi. O dormente foi inteiramente encapsulado com espessura de reforço de 2,54 mm e com 5,08 mm de reforço na região da placa de apoio. Os resultados mostraram um ganho significativo em rigidez e capacidade última de carga, diminuição nos valores de tensões normais e aumento da dureza superficial para resistir à compressão de placa, a abrasão pelo lastro e a resistência à umidade. A Figura 8 apresenta o dormente encapsulado com *roving* de fibra de vidro.

Fonte: Adaptado de Qiao (1998).

O Centro de Tecnologia de Transportes do Colorado aumentou a vida útil de dormentes de madeira serrada envolvendo-os com manta de fibra de vidro. Entretanto, placas de metal foram colocadas para prevenir os danos no reforço de fibra de vidro devido às altas cargas (TRANSPORTATION TECHNOLOGY CENTRE, 2005)

Pensando em aumentar a vida útil de dormentes de madeira, a empresa TECO (hoje chamada PFS TECO) formou em 1945 um comitê unindo os madeireiros e trabalhadores das estradas de ferro norte americanas desenvolvendo um programa para tentar reduzir os efeitos das intempéries e aumentar a resistência na região da placa de apoio do trilho nos dormentes que estavam degradando rapidamente. Como uma das soluções a empresa iniciou os primeiros estudos em dormentes em MLC no EUA. (TIMBER ENGINEERING COMPANY, 1958).

Segundo a norma americana AREMA (2009), dormentes de produtos engenheirados de madeira consistem em madeira lamelada ou lascas de madeira coladas com adesivo estrutural. Afirma também que a orientação e/ou o posicionamento da madeira laminada/lascas são críticos para a resistência estrutural e propriedades mecânicas, sendo considerado dormente de MLC (*Glulam ties*) um compósito engenheirado de madeira manufaturado com a colagem de peças de madeira conífera (*softwood*) ou folhosa (*hardwood*) usando adesivos estruturais. Já o dormente de lascas paralelas (PSL) é o compósito estrutural de madeira manufaturado que utiliza lascas de madeira macia laminada unidas por adesivo estrutural de uso exterior.

Carrasco (2006) foi o pioneiro no Brasil na pesquisa de dormentes de MLC (chamado de DMLCR – Dormente de MLC de Refugo) reaproveitando peças retiradas de dormentes de eucalipto citriodora (*Corymbia citriodora*) após final de vida útil. As peças foram unidas de topo por *finger joint* e lateralmente por encaixe macho-fêmea. As colagens das faces, assim como as emendas, foram realizadas utilizando-se adesivo EPI 1974 e catalizador *Hardener* 1993. A taxa de reaproveitamento de cada dormente variou de 7,3 a 59,6 %, com aproveitamento médio de 5 dormentes de refugo para produzir 1 dormente de MLC com densidade variando de 915 a 1000 kg/m³.

Sanchez (2009), da Universidade de Maine, realizou uma vistoria em dormentes de MLC de madeiras folhosas coladas com adesivo fenólico (chamados pela sigla AEL, *Advanced Engineered Lumber*) instalados em 2005 na ponte ferroviária de *New Meadows*, EUA (Figura 9).

Figura 9: Dormentes de AEL da ponte *New Meadows*

Fonte: Sanches (2009).

A laminação dos dormentes foi realizada com lamelas largas e estreitas alternadas sistematicamente de maneira a atingir a largura desejada, como mostra Figura 10.

Figura 10: Disposição das lamelas de dormentes de AEL

Fonte: Adaptado de Sanches (2009).

Após análise visual, Sanchez concluiu que, no geral, os dormentes estavam em boas condições, porém alguns dormentes apresentavam delaminação nos topos e metade dos dormentes desenvolveram rachas longitudinais na lamela superior, coincidindo com a região do parafuso que fixa o dormente na estrutura da ponte (Figura 11). Além disso nenhum problema como afundamento de placa ou arrancamento de parafuso que fixa o dormente ao trilho foi detectado.

Figura 11: Rachas longitudinais nos dormentes de AEL

Fonte: Sanches (2009).

Pesquisadores do Centro de Tecnologia e Ciências da madeira da Faculdade Florestal e Ciências do Meio Ambiente da Universidade de New Brunswick testaram com sucesso dormentes de MLC com madeiras folhosas de baixa qualidade (No.3B Common grade, segundo

as especificações da *National Hardwood Lumber Association-NHLA*), mesclando a maior parte de lamelas da espécie de Sugar maple (*Acer saccharum*) com uma pequena quantidade de Yellow birch (*Betula alleghaniensis*) tratadas com CCA, utilizando adesivo poliuretano estrutural bi-componete (GONG et al., 2013). A Figura 12 apresenta a vista do topo do dormente e disposição das lamelas classificadas.

Fonte: Gong et. al. (2013).

Como apresenta a Figura 12a foram intercaladas lamelas largas e estreitas para atingir a largura desejada do dormente, e a Figura 12b mostra a disposição das lamelas em 3 categorias em termos do MOE: alto (3B-H), médio (3B-M) e baixo (3B-L). Os resultados dos testes em laboratório mostraram que é possível atingir os valores da norma AREMA:2009 para as propriedades de resistência e rigidez à flexão com dormentes de MLC das madeiras folhosas citadas (GONG et. al., 2013).

Bhkari et al. (2014) testou dormentes de MLC feitos com a madeira tropical da malasia chamada Kekatong (*Cynometra spp.*) colada com adesivo fenol resorcinol formaldeído atingindo os valores de resistência e rigidez à flexão exigidos pela norma de AREMA:2009.

Antônio Silva et al. (2015) tratou em autoclave com creosoto após a produção de dormentes de MLC de pinus marítimo (*Pinus pinaster Ait.*), e dormentes de *redwood* europeu, (*Pinus silvestris L.*) colados com adesivo melamina uréia formaldeído concluindo que o pós-tratamento não garante boa penetração no alburno das lamelas destas espécies na região central dos dormentes.

Em estudo recente Icimoto (2013) concluiu que os dormentes maciços de madeira serrada *Pinus oocarpa* não atingem os valores de MOE e MOR especificados pela ABNT NBR7511:2013, para utilização em ferrovias. No mesmo ano, em sua dissertação de mestrado,

o autor realizou ensaios em dormentes de bitola estreita de MLC de *Pinus oocarpa*, variando as configurações de lamelas como apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Configuração da seção transversal de dormentes de MLC de *Pinus oocarpa*

C1	C2	C3	C4

Fonte: Icimoto (2013).

Naquele momento o autor definiu a configuração C4 como a mais adequada, porém as fases de prensagem devem ser realizadas em dois momentos distintos, impactando em tempo maior de produção.

Observa-se, assim, a tendência mundial na busca por materiais alternativos para a produção de dormentes.

Nesse sentido, foi desenvolvido no presente trabalho, dormentes em MLC reforçados com tecido bidirecional de fibra de vidro, os quais podem ser considerados dormentes de madeira e/ou dormentes de compósito polimérico. Esta estratégia possibilita classificar esses dormentes pelas normas brasileiras de dormentes de madeira e pela norma de compósitos poliméricos, as quais possuem diferenças entre os valores exigidos para as propriedades de resistência e rigidez à flexão, conforme pode ser observado na Tabela 4.

Tabela 4: Valores de resistência e rigidez à flexão para dormentes poliméricos e de madeira

Requisitos e método de ensaio	Notação	Unidade	Limites Mínimos		
			Dormentes		
			ABNT PN NBR16461	ABNT NBR7511	
			Polimérico	Madeira classe I	Madeira classe II
Módulo de Elasticidade a flexão	MOE	MPa	1.172	13.000	10.000
Módulo de Ruptura a flexão	MOR	MPa	13,8	50	40

Fonte: ABNT PN NBR16461 (2017); ABNT NBR7511 (2013).

A rigidez à flexão (MOE) exigida para dormentes de madeira é até 11 vezes maior comparada com a rigidez exigida para dormentes poliméricos. O valor de resistência à flexão (MOR) exigida para dormentes poliméricos é cerca de 1/3 da resistência mínima exigida para dormentes de madeira.

Quando questionados, os responsáveis técnicos pela formulação da norma americana AREMA:2009 (que deu origem a ABNT NBR7511:2013 e ao projeto de norma de dormentes poliméricos ABNT PN NBR12461:2017), não souberam responder o motivo por tamanha diferença de exigências entre os materiais.

A explicação pode estar na questão da padronização dos produtos que passam por um processo de produção industrial, no caso os dormentes poliméricos. Por outro lado, considerando a variabilidade da madeira, utilizam-se coeficientes de minoração no projeto de elementos estruturais em madeira para propiciar maior segurança ao conjunto.

Porém a MLC é um produto engenheirado composto por peças de madeiras classificadas e coladas com adesivo estrutural, que passam por um rigoroso controle de qualidade em sua produção industrial, propiciando confiabilidade e diminuindo a variabilidade, de modo que o produto final possa ser considerado um material padrão.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Visando desenvolver um dormente de MLC para fabricação na indústria, foi definida a configuração das lamelas, chamada de C5, como mostrada na Figura 13.

Figura 13: Configuração adotada para os ensaios

Fonte: Autor (2017).

Esta configuração tem como vantagem a utilização de todas as peças na posição horizontal, de modo que a prensagem seja feita em etapa única, facilitando a produção.

4.1 Madeira

Utilizou-se madeira de *Pinus spp.* de plantios comerciais provenientes da região de Itararé, sudoeste do Estado de São Paulo. A Figura 14 apresenta parte do lote de madeira.

Figura 14: Lote de madeira

Fonte: Autor (2017).

O planejamento experimental consistiu na produção de dormentes de bitola larga (280cm x 24cm x 17cm, comprimento, largura e altura respectivamente) e dormentes de bitola estreita (200cm x 22cm x 16cm, comprimento, largura e altura respectivamente). A Figura 5 apresenta as medidas brutas das lamelas para cada tamanho de dormente.

Tabela 5: Dimensões das lamelas

	Bitola dos dormentes produzidos	
	Larga	Estreita
Seção das lamelas (cm)
Comprimento (m)	3,0	2,20

Fonte: Autor (2017).

As peças, na forma de sarrafos, receberam previamente tratamento preservante CCA com retenção de 6,5kg/m³ de ingrediente ativo.

Antes da colagem, todas as lamelas passaram por classificação visual e mecânica.

4.2 Classificação e disposição das lamelas

As lamelas de *Pinus spp.* formadoras dos dormentes foram classificadas com base nas recomendações no projeto de norma brasileira ABNT PN NBR02:126.10-0001-1 Madeiras: Critérios de classificação visual e mecânica, proposto pela CE-2:126.10 - Comissão de Estudos de Estruturas de Madeira.

Os nós foram classificados quanto à posição na peça: no centro da face larga, no canto da face larga e na face estreita como mostra a Figura 15.

Figura 15: Faces da madeira e incidência de nós de face, centro e canto

Fonte: CE-2:126.10-0001-1 (2017).

A proporção da área da face da madeira ocupada por um nó, ou por um conjunto destes, tem os limites estabelecidos na Tabela 6 para cada uma das classes de madeira.

Tabela 6: Porção máxima da face ocupada por um nó

Posição	Classe 1	Classe 2	Classe 3	F
Centro da face larga	1/5	1/3	1/2	Acima

Fonte: CE-2:126.10 - PN 02:126.10-0001-1 (2017)

No caso de dois ou mais nós próximos, com fibras inclinadas em torno do conjunto de nós considerou-se como um nó único.

As peças de madeira com defeitos de secagem e fissuras cujos valores ultrapassaram os critérios da Tabela 7 foram descartadas, sendo consideradas inadequadas para a confecção dos dormentes.

Tabela 7: Tolerâncias para defeitos de secagem e fissuras

Defeito	Limite máximo permitido
Fissuras não passantes	O comprimento das fissuras não deve ser maior que 1,0 m e nem $\frac{1}{4}$ da comprimento da peça
Fissuras passantes	Somente se permitem as fissuras passantes nos extremos e o comprimento não deve ser maior do que a largura da peça
Encurvamento e arqueamento	Menor que 8 mm para cada 1 m de comprimento
Torcimento	Menor que 1 mm para cada 25 mm de comprimento
Encanoamento	Sem restrições
Esmoadado	Transversalmente menor que $\frac{1}{4}$ da espessura ou largura da peça Sem restrições para o comprimento

Fonte: CE-2:126.10 - PN 02:126.10-0001-1 (2017).

Após a classificação visual, as lamelas não estruturais (F) foram descartadas e as lamelas Classe 1, Classe 2 e Classe 3 passaram por uma classificação mecânica para obtenção do MOE dinâmico, pelo método de vibração transversal, utilizando o equipamento Metriguard Modelo 340-E.

Figura 16: Classificação mecânica por vibração transversal

Fonte: Autor (2017)

Foram utilizadas duas larguras de lamelas, para compor todas as 7 camadas, intercalando-as de forma a amarrar todo o conjunto. Os dormentes de MLC foram montados com lamelas de classificação decrescente, considerando as classificações visual e mecânica, das extremidades para o centro da seção transversal, conforme ilustra a Figura 17.

Figura 17: Disposição de montagem pela classificação visual

Fonte: Autor (2017).

4.4 Tecido de fibra de vidro

Optou-se por reforçar o dormente utilizando 1 camada (equivalente a 1,2% em relação ao volume de madeira de um dormente) do tecido bidirecional de fibra de vidro (E-glass) do fabricante *Owens Corning*, com gramatura de 600g/m², com agentes de acoplamento, compatíveis com a resina poliuretano. A Tabela 8 apresenta as propriedades do tecido.

Tabela 8: Propriedades do tecido de fibra para os dormentes finais

Direção 0°	
Resistência a tração	332 MPa
Módulo à tração	19,7 GPa
Direção 90°	
Resistência a tração	331 MPa
Módulo à tração	19,9 GPa

Fonte: *Owens Corning* (2016).

O fabricante forneceu o tecido de fibra de vidro na forma de rolos de 1,2m de largura. Para aplicar o reforço nos dormentes foi necessário o corte manual na dimensão desejada (Figura 18).

Figura 18: Corte do tecido de fibra de vidro

Fonte: Autor (2016).

O tecido foi cortado no Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira (LAMEM) e após todos os cortes, as partes foram encaixotadas (Figura 19) e levadas para indústria REWOOD onde foram produzidos os dormentes.

Figura 19: Armazenamento do tecido

Fonte: Autor (2016).

Visando a simulação de um processo industrial, o reforço foi aplicado diretamente entre duas lamelas utilizando o mesmo adesivo de colagem de MLC. Após a aplicação do adesivo na primeira lamela (Classe 1), colocou-se uma camada de reforço e aplicou-se novamente adesivo. Na sequência foram coladas as próximas lamelas, aplicando adesivo entre elas até a penúltima (Classe 2). Entre as últimas 2 lamelas repetiu-se a sequência lamela-adesivo-fibra-adesivo-lamela (Figura 20). Já para os dormentes sem reforço seguiu-se o mesmo procedimento de disposição das lamelas, porém sem a inserção do tecido de fibra de vidro.

Figura 20: Posicionamento do reforço na seção transversal do dormente

Fonte: Autor (2017).

Os dormentes receberam uma camada de reforço de tecido de fibra de vidro na extremidade superior (região comprimida) entre duas lamelas para auxiliar na resistência da fixação dos tirefões e também devido a inversão de esforços nos dormentes na via, e outra camada de reforço na extremidade inferior (região tracionada) devido aos esforços de flexão. Porém cada propriedade analisada sofreu influência de apenas uma das camadas de reforço.

4.5 Adesivo

As indústrias de MLC no Brasil atualmente colam madeira com adesivo poliuretano pelo adequado desempenho na colagem do Pinus para uso interno e externo e de Eucalyptus para uso interno, pelo custo, pela facilidade de utilização na produção em se trabalhar com um produto monocomponente e também por ser mais ecológico ambientalmente que o fenol resorcinol.

O adesivo poliuretano ganhou mercado no Brasil devido ao seu custo de importação, que, mesmo vindo da Suíça, era mais barato que o custo do fenol resorcinol (Cascophen) importado dos EUA. Por certo tempo a empresa Hexion produziu fenol resorcinol em Paulínea-SP, mas ainda com preços muito acima do adesivo poliuretano importado. Em 2017 a Hexion anunciou o encerramento das atividades na única unidade produtora do adesivo Cascophen no Brasil. Frente a este fato e ao custo para importação que impossibilita a sua concorrência com os adesivos poliuretanos, levaram a utilização do adesivo (termofixo) poliuretano Jowapur 686.60, seguindo a realidade das indústrias de MLC brasileiras e mundiais. A Tabela 9 apresenta as especificações técnicas do adesivo poliuretano Jowapur.

Tabela 9: Especificação técnica do adesivo Jowapur

Etapas e características	Jowapur 686.60
Componentes	Monocomponente
Relação da mistura	-
Gramatura (cada face)	190 g/m ²
Tempo de montagem (20° C, 65%U)	30 a 45 min
Tempo de prensagem (a 20° C, 65%U)	2h e 15min
Umidade da madeira	8 a 15%

Fonte: Jowat (2017).

4.6 Planejamento experimental

O programa experimental compreendeu a produção de 138 dormentes de MLC, 60 dormentes de bitola larga (280cm x 24cm x 17cm, comprimento, largura e altura respectivamente) e 78 dormentes de bitola estreita (200cm x 22cm x 16cm, comprimento, largura e altura respectivamente). Foram produzidos dormentes sem reforço (NRef) e dormentes reforçados (Ref), para fins de comparação das resistências. A Tabela 10 apresenta o planejamento experimental, a localização do reforço de tecido de fibra de vidro e a quantidade produzida por cada tipo de dormente.

Tabela 10: Disposição das camadas de tecido de fibra de vidro dormentes finais

Tipo	Localização do reforço	Bitola	Nº de amostras
NRef		Larga	20
Ref			40
NRef		Estreita	26
Ref			52

Fonte: Autor (2016).

Para determinação das resistências do lote, foram testados 22 dormentes de bitola larga em laboratório. Desta amostragem, 21 dormentes passaram por ensaios estáticos, sendo 7

dormentes não reforçados (NRef) e 14 dormentes reforçados (Ref), e 1 dormente reforçado passou por ensaio dinâmico.

Os 38 dormentes restantes de bitola larga e todos os 80 dormentes de bitola estreita serão instalados em trechos de ferrovias no Brasil, para testes *in loco* com acompanhamento periódico, cujo objetivo é analisar o comportamento dos dormentes nas reais condições e solicitações de uso.

4.7 Fabricação dos dormentes de MLC na indústria

Nesta etapa do trabalho, todos os dormentes foram fabricados na indústria para compreensão de como seria o processo produtivo, com todas variáveis, facilidades, dificuldades e limitações. A fabricação dos dormentes foi realizada na REWOOD, indústria produtora de MLC localizada na cidade de Taboão da Serra, estado de São Paulo.

Antes do beneficiamento, as lamelas foram separadas em grupos de acordo com a classificação visual e mecânica de modo a facilitar a coleta de cada peça para montagem dos dormentes (Figura 21).

Figura 21: Lamelas separadas por grupos de classificação visual e mecânica

Fonte: Autor (2016).

O primeiro processo de beneficiamento foi o S4S, para aplainamento das 4 faces da peça, e esquadreamento da seção transversal (Figura 22).

Figura 22: (a): Início do processo de aplainamento S4S; (b) Regularização da peça

Fonte: Autor (2016).

Após aplainamento (Figura 23), as lamelas estavam prontas para receber o adesivo, pois os poros da madeira foram abertos para facilitar a penetração do mesmo.

Figura 23: (a) Final do aplainamento; (b) Retirada das lamelas da plaina.

Fonte: Autor (2016).

A Figura 24 apresenta a separação das lamelas para montagem dos dormentes.

Figura 24: Separação das lamelas

Fonte: Autor (2016).

Na etapa de montagem, ainda sem adesivo, foi inserido o tecido de fibra entre as lamelas especificadas em projeto (Figura 25).

Figura 25: Montagem prévia das lamelas para composição dos dormentes

Fonte: Autor (2016).

Os dormentes montados foram posicionados (Figura 26) para a fase de aplicação de cola e posterior prensagem.

Figura 26: Posicionamento das lamelas para colagem

Fonte: Autor (2016).

Todos os dormentes foram numerados de acordo com o planejamento de montagem. De acordo com a Figura 27 iniciou-se a colagem das lamelas dos dormentes.

Figura 27: Aplicação de cola nas lamelas.

Fonte: Autor (2016).

As lamelas coladas foram levadas para a prensagem (Figura 28).

Figura 28: Prensagem dos dormentes

Fonte: Autor (2016).

Ao final da prensagem os dormentes foram retirados da prensa estocados por 15 dias em local abrigado para ocorrer a cura do adesivo (Figura 29).

Figura 29: Dormentes recém-retirados da prensa

Fonte: Autor (2016).

Após 15 dias, foram destopadas as duas extremidades dos dormentes. A Figura 30 apresenta o dormente no final do processo produtivo.

Figura 30: Dormente no final do processo produtivo

Fonte: Autor (2016).

4.8 Caracterização de dormentes

Com o objetivo de avaliar as propriedades mecânicas de parte dos dormentes produzidos, foram enviados 21 dormentes de bitola larga (2,8m) ao LaMEM para que fossem

realizados os ensaios estáticos seguindo os quesitos da norma brasileira ABNT NBR 7511:2013 Dormentes de Madeira – Requisitos e métodos de ensaio. As propriedades investigadas foram: módulo de elasticidade (MOE), módulo de ruptura (MOR), ambos na flexão, resistência na compressão – placa ($f_{c90,p}$), resistência ao arrancamento lateral de tirefão (R_{a0}), resistência ao arrancamento normal de tirefão (R_{a90}). Para a análise da qualidade de colagem foram seguidas as recomendações da CE-2:126.10 - Comissão de Estudos de Estruturas de Madeira, ABNT PN NBR 02:126.10-0001-5 Madeira Laminada Colada Estrutural: Métodos de ensaio. A Tabela 11 apresenta a quantidade de corpos de prova utilizados por ensaio.

Tabela 11: Quantidade de corpos de prova dos dormentes por propriedade mecânica investigada.

Propriedades	Notação	Número de corpos de prova
Rigidez à flexão	(MOE)	21
Resistência à flexão	(MOR)	21
Compressão normal – placa	($f_{c90,p}$)	21
Arrancamento lateral de tirefão	(R_{a0})	42
Arrancamento normal de tirefão	(R_{a90})	42
Dureza Janka	(f_H)	42
Cisalhamento	(f_v)	42

Fonte: Autor (2017).

4.8.1 Ensaio de flexão

Este ensaio teve como objetivo a determinação do módulo de elasticidade (MOE) e o módulo de ruptura (MOR), ambos à flexão. Foram realizados ensaios com 21 dormentes, 7 sem reforço (NRef) e 14 com reforço (Ref), como indicado na Tabela 12.

Tabela 12: Quantidade de dormentes para ensaio de flexão		
Tipos de dormentes	NRef	Ref
Quantidade	7	14

Fonte: Autor (2017).

As dimensões dos corpos de provas para o ensaio de flexão foram referente à bitola larga com 280cm x 24cm x 17cm respectivamente, comprimento, largura e espessura.

Este ensaio consiste na flexão em 3 pontos, com aplicação de uma carga no centro da viga biapoiada e medindo-se a flecha em relação à carga aplicada (Figura 31).

Fonte: ABNT NBR7511 (2013)

A força medida por um anel dinamométrico, foi aplicada no centro da viga a uma velocidade de 127 mm por minuto. Os deslocamentos abaixo do ponto de aplicação da força foram determinados com o auxílio de um relógio comparador, como indicado na Figura 32.

Figura 32: Realização do ensaio de flexão

Fonte: Autor (2017).

Para o cálculo do MOE e do MOR foram adotadas as recomendações da ABNT NBR 7511:2013 Dormentes de madeira – Requisitos e métodos de ensaios.

Após o ensaio de flexão estática, o dormente foi seccionado para que fossem retirados os corpos de prova para realização dos ensaios de arrancamento normal às fibras, arrancamento lateral às fibras, compressão normal – placa, dureza Janka e delaminação. A Figura 33 apresenta uma sugestão do autor para a retirada destes corpos de prova de dormentes de 2,8m.

Após ensaio de flexão realizou-se o ensaio de compressão normal - placa.

4.8.2 Ensaio de compressão normal - placa

Este ensaio possuiu a finalidade de determinar a capacidade de resistência dos dormentes à compressão da placa de apoio, situada entre o trilho e o dormente.

A compressão foi feita no centro do dormente com o auxílio de um cilindro hidráulico acoplado a uma célula de carga. A área de aplicação da carga no dormente foi a da placa de apoio. A placa de apoio deve possuir comprimento, largura e espessura de 36cm x 20cm x 2,5cm, apresentada (Figura 34).

Figura 34: Esquema de ensaio de compressão normal - placa

Fonte: ABNT NBR7511 (2013).

O corpo de prova possuiu dimensões de 90cm x 24cm x 17cm, no comprimento, largura e altura respectivamente. A Figura 35 apresenta o corpo de prova de compressão normal – placa.

Figura 35: Corpo de prova de compressão normal – placa

Fonte: Autor (2017).

O procedimento de ensaio seguiu os seguintes critérios:

- a força de compressão foi de 450 kN e deve ser incrementada em intervalos de carga de 90 kN em um período de tempo maior que 30 segundos e menor que 60 segundos entre os incrementos.

- o deslocamento (afundamento da placa de apoio) ocorrido foi medido com o auxílio de um relógio comparador, sendo que o máximo deslocamento permitido pela norma é 6,35 mm com uma carga mínima de 45 toneladas.

- em seguida, após 1 minuto da liberação da carga, o deslocamento residual máximo não deverá ultrapassar 3,175 mm. A Figura 36 ilustra a realização do ensaio.

Figura 36: (a) Ensaio de compressão normal – placa; (b) Apoio do transdutor

Fonte: Autor (2017).

4.8.3 Ensaio de arrancamento normal de tirefão

Nesse ensaio, o objetivo foi determinar a capacidade de resistência dos dormentes ao arrancamento normal do tirefão (R_{a90}), o qual é fixado na direção normal às fibras da madeira, fazendo parte do sistema de fixação das placas de apoio do trilho no dormente, como mostrado na Figura 37.

Figura 37: Esquema de ensaio de arrancamento normal de tirefão

Fonte: ABNT NBR7511 (2013).

As dimensões dos corpos de prova foram: comprimento de 45cm, largura de 11 cm e altura 17 cm. O tirefão com dimensões 15,8 mm de diâmetro (rosca interna) e 165,1 mm de comprimento foi introduzido na madeira com uma profundidade de 114,3 mm. Nos corpos de prova primeiramente foi realizada uma pré-furação com broca de 15 mm para fixação do tirefão no dormente. O arrancamento do tirefão foi realizado em uma máquina universal AMSLER com uma taxa de carregamento de 25,4 mm (1”) por minuto (Figura 38).

Figura 38: Realização do ensaio de arrancamento normal

Fonte: Autor (2017).

A Figura 39 apresenta o corpo de prova de arrancamento normal de tirefão no final do ensaio.

Figura 39: Corpo de prova de arrancamento normal de tirefão ao final do ensaio

Fonte: Autor (2017).

4.8.4 Ensaio de arrancamento lateral de tirefão

Este ensaio teve como objetivo determinar a capacidade do dormente em manter a resistência ao movimento lateral do tirefão (R_{a0}). Este esforço existe, por exemplo, durante um percurso em curva na ferrovia.

Neste ensaio foram utilizados dois tirefões instalados a 90° com as fibras da madeira e solicitados a uma força paralela às fibras como mostrado na Figura 40. Os corpos de prova tiveram dimensões no comprimento de 45 cm, largura de 12 cm, e altura de 17 cm. O tipo de tirefão e o modo de instalação foram os mesmos adotados no item 4.8.3.

Figura 40: Esquema de ensaio de arrancamento lateral

Fonte: ABNT NBR 7511 (2013)

A força foi aplicada na direção paralela às fibras da madeira, até que se promovesse o deslocamento lateral relativo máximo de 10 mm entre os tirefões, no ponto de aplicação da força, num período de 1 minuto a partir do início do ensaio.

Este ensaio também foi realizado na máquina universal AMSLER (Figura 41), com o auxílio de um relógio comparador.

Figura 41: Ensaio de arrancamento lateral

Fonte: Autor (2017).

A Figura 42 apresenta os corpos de prova de arrancamento lateral de tirefão ao final dos ensaios.

Figura 42: Corpo de prova de arrancamento lateral de tirefão ao final dos ensaios

Fonte: Autor (2017).

4.8.5 Ensaio de dureza Janka

A dureza é a medida de resistência da madeira a ações de origem mecânica sobre sua superfície, resistência à penetração, à deformação plástica e ao risco. Este ensaio foi baseado na norma ABNT NBR 7190:1997 Projetos de Estruturas de Madeira – Requisitos e Métodos de ensaios, e contemplado pela norma de dormentes, ABNT NBR 7511:2013 Dormentes de madeira – Requisitos e métodos de ensaios.

O acessório utilizado para esta finalidade é mostrado em corte na Figura 43, apresentada a seguir.

Figura 43: Esquema de ensaio para a determinação da dureza Janka

Fonte: ABNT NBR7190 (1997).

A Figura 44 apresenta o ensaio de dureza Janka normal às fibras.

Figura 44: Ensaio de dureza Janka na direção normal às fibras

Fonte: Autor (2017).

4.8.6 Ensaio de delaminação

O ensaio de delaminação determinou a qualidade da colagem das lamelas de elementos de MLC analisando a somatória dos comprimentos de abertura das linhas de cola entre lamelas adjacentes de corpos de prova retirados na seção transversal de vigas de MLC. O método consistiu no confinamento das amostras em uma autoclave (Figura 45a), aplicando um ciclo de vácuo-pressão sob imersão em água e posterior secagem dos corpos de prova (Figura 45b).

Figura 45: (a) Amostras em autoclave; (b) Estufa de secagem

Fonte: Autor (2017).

Este ensaio foi proposto na metodologia descrita pelo projeto de norma ABNT NBR PN 02:126.10-0001-5 baseado no método B (ambiente externo) do ensaio de delaminação da EN 14080:2013. As amostras foram submergidas em água a uma temperatura de 20°C e, primeiramente, foi aplicado um vácuo de 75 kPa durante 30 minutos. Posteriormente, os corpos de prova ficaram submetidos por duas horas a uma pressão de 550 kPa. Após o ciclo de vácuo-pressão, as amostras foram acondicionadas em estufa por 15 horas a uma temperatura de 75 °C, com um fluxo de ar entre 2 a 3 m/s e a umidade relativa em torno de 8% a 10%.

As Figuras 46a e 46b apresentam amostras no início e uma amostra ao final do ensaio respectivamente.

Figura 46: (a) Amostras no início; (b) Amostra ao final do ensaio de delaminação.

Fonte: Autor (2017).

A porcentagem da delaminação total de cada corpo de prova foi obtida pela Equação 1.

$$D_t = \frac{L_a}{L_t} \cdot 100 \quad (1)$$

Fonte: ABNT NBR PN 02:126.10-0001-5.

Onde, D_t : delaminação total, em %, L_a : somatório do comprimento da abertura de todas as linhas de cola das faces da seção transversal, em mm, e L_t : comprimento total de todas as linhas de colas das faces da seção transversal.

Foi utilizado o procedimento da norma para vigas de MLC em ambientes de exposição externo, em que a delaminação máxima permitida para amostras de madeira de coníferas no final do ensaio é de até 4%.

4.8.7 Ensaio de cisalhamento na linha de cola

Este ensaio foi baseado na metodologia descrita pelo o projeto de norma ABNT NBR PN 02:126.10-0001-5 Madeira laminada colada estrutural: métodos de ensaio. O método consiste na aplicação de uma força de cisalhamento na linha de cola do corpo de prova com as fibras das lamelas posicionadas paralelamente ao carregamento. O propósito desse ensaio foi determinar a máxima tensão de cisalhamento em cada área de adesão e a região aonde ocorreu à falha do conjunto.

Este ensaio de cisalhamento, do projeto de norma mencionado, para testes de controle de qualidade de vigas de MLC, exigiu a construção de um novo dispositivo para aplicação de força sendo este desenvolvido no LaMEM (Figura 47).

Figura 47: Dispositivo de cisalhamento na linha de cola para vigas de MLC

Fonte: Autor (2017).

O carregamento foi aplicado por uma máquina universal de ensaios (Figura 48) a uma taxa aproximada de 10 MPa/min, durante um tempo superior a 20 segundos até que ocorresse a ruptura por cisalhamento da linha de cola entre as lamelas. A leitura da força de ruptura foi feita por meio de um *hardware* e *software* de aquisição de dados desenvolvidos no LaMEM (Figura 48).

Figura 48: Ensaio de cisalhamento na linha de cola

Fonte: Autor (2017).

Ao final do ensaio analisou-se visualmente o modo de ruptura e a porcentagem de falha ocorrida na madeira e/ou adesivo na seção transversal (Figura 49).

Figura 49: Ruptura por cisalhamento na linha de cola.

Fonte: Autor (2017).

A resistência ao cisalhamento na linha de cola foi determinada pela Equação 2.

$$f_{v0} = \frac{F_{v0,m\acute{a}x}}{b \cdot h} \quad (2)$$

Fonte: ABNT NBR PN 02:126.10-0001-5.

Sendo, f_{v0} : resistência de cisalhamento na linha de cola paralela às fibras da madeira, em MPa, $F_{v0,m\acute{a}x}$: força máxima de cisalhamento na linha de cola paralela às fibras da madeira, em Newtons, b : largura da amostra, em mm, e h : altura da amostra, em mm.

4.8.8 Ensaio dinâmico

Como ensaio complementar, foi realizado o ensaio dinâmico de flexão em 1 dos dormentes de 2,8m de comprimento, no Laboratório de Ensaaios Dinâmicos (LaBEDIN) da Universidade de Campinas (UNICAMP). Foi adotado o método das cargas combinadas (Tesoura), para uma carga por eixo de 300 kN, de acordo com as especificações da VALE S.A. que rotineiramente envia dormentes para este tipo de ensaio nesse laboratório.

Foi instalada a placa de apoio, uma seção do trilho TR68 juntamente com as fixações rígidas e elásticas (Figura 50).

Figura 50: Dormente antes do ensaio dinâmico.

Fonte: Autor (2017).

Seguindo a metodologia de Ferreira, Vivan e Meirelles (2017), o dormente foi posicionado sobre uma manta elastomérica de mesma rigidez da via permanente e submetido ao carregamento que variou de 19,10kN à 191,00kN, sob uma frequência de 5Hz, durante 3 milhões de ciclos.

A força máxima de 191kN foi calculada com base no método clássico de Eisenmann, assumindo os seguintes valores:

- velocidade da composição: 80 km/h;
- diâmetro da roda: 28”;
- carga por roda 150 kN;
- afastamento entre dormentes: 54 cm;
- comprimento do dormente: 230 cm;
- largura do dormente: 24 cm;
- superfície de apoio eficaz do dormente: 3923 cm²;
- coeficiente do lastro: 16,83 cm;
- módulo de elasticidade do trilho TR68 – E: 2.100.000 kgf/cm²;
- momento de inércia do trilho TR68 – J: 3.950 cm⁴.

A Figura 51 mostra todo sistema durante o ensaio dinâmico do dormente.

Figura 51: Dormente durante o ensaio dinâmico

Fonte: Autor (2017).

4.9 Análise estatística

A análise de variância (ANOVA) foi utilizada para investigar a influência da inclusão do compósito laminado em fibras de vidro nas propriedades mecânicas dos dormentes de MLC feitos com madeira de *Pinus spp.*

Os resultados foram avaliados ao nível de 5% de significância e com o auxílio do *software* Minitab® versão 14. Pelas hipóteses formuladas, P-valor (probabilidade P) maior ou igual ao nível de significância implica que as médias das propriedades investigadas dos dormentes feitos de *Pinus spp.* com [Ref] e sem [NRef] são equivalentes, e não equivalentes ($P\text{-valor} < 0,05$) em caso contrário.

Acusada a diferença entre as médias dos três grupos pela ANOVA, o teste de Tukey foi utilizado para o agrupamento dos níveis do fator.

Os testes de normalidade de Anderson-Darling (AD) e de homogeneidade de variâncias de Bartlett (Bt) sobre os resíduos foram utilizados para a validação dos resultados da ANOVA. Pela formulação dos testes, considerados também ao nível de 5% de significância, P-valor maior ou igual a 5% implica que os resíduos da ANOVA por propriedade são normais e que as variâncias dos dois grupos (com e sem reforço) são equivalentes, validando os resultados obtidos.

As propriedades mecânicas obtidas consistiram no módulo de elasticidade (MOE) e na resistência à flexão estática (MOR), resistência na compressão normal de placa ($f_{c90,p}$) obtendo o deslocamentos elástico máximo ($d_{máx}$) e o deslocamento permanente residual (d_{res}), resistência ao arrancamento de tirefão na direção normal às fibras (R_{a90}), resistência ao arrancamento de tirefão na direção lateral às fibras (R_{a0}), dureza (f_H) e resistência ao cisalhamento na linha de cola (f_v). Na Tabela 13 são apresentados o número de corpos de prova utilizados na obtenção de cada propriedade (no cisalhamento foram consideradas cada linha de cola), o que resultou em 373 determinações experimentais.

Tabela 13: Número de corpos de prova utilizados na obtenção das propriedades mecânicas.

<i>Pinus spp.</i>			
NRef		Ref	
Propriedade	Nº	Propriedade	Nº
MOE	7	MOE	14
MOR	7	MOR	14
$f_{c90,p}$	7	$f_{c90,p}$	14
R_{a0}	14	R_{a0}	28
$d_{máx}$	7	$d_{máx}$	14
d_{res}	7	d_{res}	14
R_{a90}	14	R_{a90}	28
f_H	14	f_H	28
f_v	113	f_v	29

Fonte: Autor (2017).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apesar do dormente de MLC ser um dormente de compósito polimérico que utiliza madeira e fibra de vidro como reforço, os resultados aqui apresentados são comparados com os valores da norma brasileira de dormentes de madeira ABNT NBR7511:2013 – Dormentes de Madeira, com os valores da norma americana AREMA:2009 para dormentes Glulam (MLC) e também com os valores obtidos por Icimoto (2013) em sua dissertação de mestrado para dormentes de MLC de *Pinus oocarpa* sem reforço.

A ABNT PN NBR16461:2017 que trata dos dormentes poliméricos até a finalização desta tese não havia sido publicada e, portanto, não será utilizada nesta análise.

Os resultados das propriedades físicas e mecânicas dos dormentes de MLC de bitola larga (2,8m) com e sem reforço, são apresentados como valor médio a 12% de teor de umidade (pois as lamelas dos dormentes já estavam a 12%). A Tabela 14 apresenta os valores de peso e densidade aparente para os dormentes estudados, assim como os valores de norma ABNT NBR7190: 1997 para a densidade de algumas espécies do gênero de *Pinus* e densidade mínima exigida pela AREMA:2009.

Tabela 14: Propriedades físicas de dormentes e espécies de *Pinus*.

		Peso (Kg)		Densidade (kg/m³)		
		2m	2,8m	ABNT NBR 7190:1997	AREMA:2009	
Dormentes em MLC de <i>Pinus spp.</i>	com reforço	-	60,2	-	527 (4,4)	-
	sem reforço	-	59,4	-	520 (4,0)	-
Dormente de MLC de <i>Pinus oocarpa</i>		42	-	-	600	-
Dormente de Glulam		-	-	-	-	960
Madeira serrada	<i>Pinus elliottii</i>	-	-	560	-	-
	<i>Pinus taeda</i>	-	-	645	-	-
	<i>Pinus oocarpa</i>	-	-	538	-	-

Fonte: ABNT NBR7190 (1997), AREMA (2009), Autor (2017), Icimoto (2013).

De acordo com a Tabela 14, a densidade média dos dormentes de *Pinus spp.* foi inferior aos valores da madeira serrada de algumas espécies de *Pinus* apresentadas na ABNT NBR7190:1997 e 14,3% inferiores aos dormentes de MLC de *Pinus oocarpa* testados por Icimoto (2013). Porém um aspecto importante é a baixa variação entre as densidades dos dormentes de *Pinus spp.* (em torno de 4%) o que demonstra a menor variabilidade da MLC.

A AREMA 2009 apresenta o valor de densidade para Glulam baseado em peças isentas de defeitos segundo os procedimentos da norma americana ASTM D143 e os dados do US

Forest Service, e de acordo com o próprio texto da AREMA 2009 (comentários da tabela 30-A-4, cap. 30 pag.1202) os valores atuais dos dormentes de Glulam podem diferir desta norma.

Com relação a densidade de dormentes de MLC, Carrasco (2012) produziu dormentes de MLC de *Corymbia citriodora* com densidade de 1000 kg/m³ à 12,8% de umidade.

Icimoto (2014) testou dormentes de algumas espécies de eucalipto que estão sendo utilizados pelas empresas ferroviárias no Brasil. A Tabela 15 apresenta as densidades de dormentes de eucalipto usados atualmente.

Tabela 15: Densidade de algumas espécies de dormentes eucaliptos usados atualmente no Brasil

	<i>Eucaliptus</i> <i>rostrata</i> (ER)	<i>Eucaliptus</i> <i>grandis</i> (EG)	<i>Eucaliptus</i> <i>cloeziana</i> (EC)	<i>Eucaliptus</i> <i>urophilla</i> (EU)	<i>Eucaliptus</i> <i>paniculata</i> (EP)
Densidade kg/m ³	822	674	798	822	1077

Fonte: Icimoto (2014)

5.1 Resultados dos ensaios estáticos

Neste item são ilustrados nas figuras os valores médios, os coeficientes de variação [CV(%)] e os intervalos de confiança da média (ao nível de 95% de confiabilidade) das propriedades mecânicas dos dormentes em MLC de madeira de *Pinus spp.* reforçados [Ref], dos não reforçados [NRef] ensaiados nesta pesquisa e os valores dos dormentes de *Pinus oocarpa* [Po] estudados por Icimoto (2013).

A Figura 52 apresenta os valores para rigidez (MOE) dos dormentes de *Pinus spp.* testados neste trabalho e para dormentes de MLC de *Pinus oocarpa* testados por Icimoto (2013).

Figura 52: Resultados de MOE para os dormentes de MLC de Pinus.

Fonte: Autor (2017), Icimoto (2013).

Observou-se na Figura 52 que:

- os valores dos dormentes de MLC de *Pinus spp.* não atingiram os valores mínimos para a Classe 2 da ABNT NBR7511:2013 e para a norma AREMA:2009;
- o reforço não teve uma influência significativa nos resultados de rigidez;
- os dormentes de *Pinus oocarpa* foram em torno de 50% mais rígidos que a média dos dormentes de *Pinus spp.* Isso demonstra que é possível atingir os valores de rigidez usando MLC de Pinus.

Algumas espécies de dormentes de eucalipto usados pelas empresas ferroviárias no Brasil atingem os valores de rigidez (MOE) para a Classe 2 da ABNT NBR7511:2013, como apresenta a Figura 53:

Figura 53: Resultado de MOE para dormentes de eucaliptos usados atualmente

Fonte: Icimoto (2014)

Pela Figura 53 nota-se que à exceção dos dormentes de *E. paniculata* que superaram os valores para Classe 1 e do *E. rostrata* que não atingiram os valores para a Classe 2, a maioria dos dormentes de eucalipto testados por Icimoto (2014) possuem rigidez a flexão para a Classe 2, porém as empresas ferroviárias relatam não ter problemas de deformação na flexão de dormentes de madeira de qualquer espécie de eucalipto mostrando que esta propriedade não é responsável pela troca prematura de dormentes de madeira no Brasil.

Carrasco (2012) ao estudar dormentes de MLC de eucalipto citriodora (*Corymbia citriodora*) obteve o valor médio de rigidez de 16700 MPa, valores muito superiores ao estabelecido pela norma brasileira ABNT NBR7511:2013.

Os dormentes de MLC testados por Gong et. al (2013) mesclando madeiras folhosas de Sugar maple (*Acer saccharum*) e Yellow birch (*Betula alleghaniensis*), utilizando lamelas da classe No.3B superaram os valores de MOE da norma americana AREMA:2009 com resultado médio de 12610 MPa.

A Figura 54 apresenta os resultados para propriedade de resistência à flexão (MOR) obtidos neste trabalho, os resultados obtidos por Icimoto (2013) para dormentes de *Pinus oocarpa* e os valores mínimos estabelecidos pelas normas ABNT NBR7511:2013 e AREMA:2009.

Figura 54: Resultados de MOR para os dormentes de MLC de *Pinus*

Fonte: Autor (2017), Icimoto (2013).

De acordo com a Figura 54 os dormentes de MLC de *Pinus spp.* reforçados e sem reforço apresentaram resistências semelhantes atingindo os valores estabelecidos pela ABNT NBR7511:2013 referentes a Classe 1. Os dormentes de MLC de *Pinus oocarpa* superaram em 24% os valores dos dormentes de *Pinus spp.*, onde alguns resultados superaram inclusive a recomendação de resistência da AREMA:2009 para MLC (Glulam), comprovando que as espécies de *Pinus* atendem os requisitos para esta propriedade.

Os dormentes de *Corymbia citriodora* estudados por Carrasco (2012) apresentaram o valor médio de 120MPa superando inclusive a norma americana AREMA:2009.

Gong et. al (2013) ao testar dormentes de MLC mesclando madeiras folhosas de Sugar maple (*Acer saccharum*) e Yellow birch (*Betula alleghaniensis*) de classe No.3B obteve resultado médio de 81,7 MPa superando os valores da norma americana AREMA:2009.

Observou-se que dormentes em MLC produzidos com madeiras folhosas apresentam elevada resistência e rigidez superando os valores das normas de dormentes brasileira ABNT NBR7511:2013 e americana AREMA:2009. Isso se deve ao fato da alta densidade ter relação direta com as propriedades de MOE e MOR.

A resistência de algumas espécies dormentes de eucalipto usados pelas empresas ferroviárias no Brasil são apresentadas na Figura 55:

Figura 55: Resultado de MOR para dormentes de eucaliptos usados atualmente

Fonte: Icimoto (2014).

Observa-se pela Figura 55 que todos os dormentes de eucalipto testados por Icimoto (2014) superaram os valores de MOR para a Classe 1 da norma ABNT NBR7511:2013. Confirmou-se assim o que as empresas ferroviárias relatam, em não ocorrer problemas com relação a ruptura de dormentes de madeira por flexão.

Para a propriedade resistência à compressão normal – placa, todos os dormentes de MLC obtiveram resistências acima dos valores de norma. A Figura 56 apresenta os valores mínimos de tensão que devem ser atingidos por norma e os resultados obtidos nos ensaios com dormentes de MLC.

Figura 56: Resultados de $f_{c90,p}$ para os dormentes de MLC de Pinus

Fonte: Autor (2017), Icimoto (2014).

A AREMA:2009 e ABNT NBR7511:2013 apresentam valores muito próximos para determinar a capacidade de resistência dos dormentes de madeira à compressão normal da placa de apoio. O valor máximo permitido pelas normas para deslocamento elástico (d_{max}) é de 6,35 mm ao final do ensaio durante a tensão máxima aplicada. A Figura 57 apresenta os resultados de deslocamento máximo (d_{max}) obtidos nos ensaios para os dormentes de MLC de *Pinus spp.* com e sem reforço e para os dormentes de *Pinus oocarpa*.

Figura 57: Resultados de $d_{\max}$ para os dormentes de MLC de Pinus

Fonte: Autor (2017), Icimoto (2014).

A Figura 57 mostra que os dormentes de *Pinus oocarpa* apresentaram maior resistência a compressão de placa, apresentando menor deformação, seguidos dos dormentes de MLC reforçados. Os dormentes sem reforço sofreram a maior deformação, porém mesmo assim inferior a deformação permitida pelas normas.

Após 1 minuto da liberação da carga as normas (ABNT NBR7511:2013 e AREMA 2009) sugerem o valor limite de 3,15 mm para os deslocamentos permanentes residuais (d_{res}). A Figura 58 apresenta os resultados obtidos nos ensaios.

Figura 58: Resultados de d_{res} para os dormentes de MLC de Pinus

Fonte: Autor (2017), Icimoto (2013).

Os deslocamentos permanentes residuais (d_{res}) dos dormentes de MLC de Pinus foram inferiores aos limites estabelecidos pelas normas ABNT NBR7511:2013 e AREMA:2009 (Figura 58), demonstrando resistência superior ao exigido.

A princípio presença da fibra de vidro não deveria influenciar nos resultados afundamento de placa, porém os dormentes MLC de *Pinus spp.* reforçados apresentaram menor deslocamento residual (33% menor) em relação aos dormentes MLC de *Pinus spp.* sem reforço. Os dormentes de *Pinus oocarpa* apresentara menor deslocamento em relação aos dormentes de *Pinus spp.*

A Figura 59 apresenta os valores de $d_{\max}$ e d_{res} para algumas espécies de eucalipto utilizados no Brasil atualmente.

Figura 59: Resultados de $d_{\max}$ e d_{res} para dormentes de eucalipto.

Fonte: Icimoto (2014)

Apesar dos dormentes de eucalipto apresentarem deslocamento inferior ao normalizado, as empresas ferroviárias estão com problemas devido ao afundamento de placa. Isso faz crer que este ensaio estático pode não ser o melhor parâmetro para a determinação desta propriedade, sendo recomendado para próxima revisão da norma brasileira de dormentes de madeira a inserção de ensaio cíclico de compressão de placa.

Neste trabalho realizou-se os ensaios cíclicos para avaliação do comportamento dinâmico dos dormentes de MLC reforçados com fibra e os resultados são apresentados no item 5.2

A Figura 60 apresenta os valores de norma para resistência ao arrancamento lateral de trefão (R_{a0}) e os resultados dos dormentes de MLC de *Pinus* ensaiados.

Figura 60: Resultados de R_{a0} para os dormentes de MLC de Pinus

Fonte: Autor (2017), Icimoto (2013).

A Figura 60 mostra que a resistência ao arrancamento lateral de tirefão dos dormentes de *Pinus spp.* com e sem reforço superaram tanto o valor da AREMA:2009 quanto o valor da norma brasileira ABNT NBR7511:2013 referente à Classe 2, porém o reforço de fibra não foi significativo para aumentar a resistência. Espera-se que o reforço contribua para resistir aos esforços dinâmicos de arrancamento lateral em via férrea. Os dormentes em MLC de *Pinus oocarpa* superaram a Classe 1 e foram 48% mais resistentes em relação ao dormente reforçado, comprovando que a madeira de Pinus pode atingir os valores para a Classe 1 no ensaio de arrancamento lateral.

A Figura 61 apresenta os valores para resistência ao arrancamento lateral dos dormentes de eucalipto testados por Icimoto (2014).

Fonte: Icimoto (2014).

Apesar dos dormentes de eucalipto apresentarem resistência satisfatória com relação a ABNT NBR7511:2013 (Figura 61), as empresas ferroviárias estão enfrentando problemas com dormentes instalados em trechos de curva da via, devido ao embutimento do tirefão na madeira,

ocorrendo a ovalização do furo e consequente perda de ligação entre o tirefão e o dormente. Isso faz crer que o ensaio estático de arrancamento lateral pode não ser o melhor parâmetro para a determinação desta propriedade, sendo recomendado para próxima revisão da norma brasileira de dormentes de madeira a inserção de ensaio cíclico de arrancamento lateral de tirefão.

A Figura 62 apresenta os valores de norma para resistência ao arrancamento normal de tirefão e os resultados dos dormentes de MLC de *Pinus* ensaiados.

Figura 62: Resultados de R_{a90} para os dormentes de MLC de *Pinus*

Fonte: Autor (2017), Icimoto (2013).

De acordo com a Figura 62, os resultados de resistência ao arrancamento normal de tirefão de todos os dormentes foram superiores aos quesitos estipulados pela norma brasileira referente à Classe 1. Analisa-se que não houve diferença significativa quanto ao reforço para esta propriedade. Os dormentes em MLC de *Pinus oocarpa* foram mais resistentes ao arrancamento normal de tirefão em relação aos dormentes de MLC de *Pinus spp.* com e sem reforço.

Para o ensaio de arrancamento normal de tirefão, a norma americana AREMA:2009 não apresenta valores mínimos, apenas solicitando que os valores mínimos sejam determinados.

O dormente de compósito polimérico desenvolvido por Ferdous (2018) atingiu o valor médio de arrancamento de 74 kN, valor acima de 40 kN exigido pela norma australiana AS1085.18:2013 Railway track material - Screw spikes and threaded inserts, sendo mais exigente que a NBR7511:2013 para este ensaio.

A Figura 63 apresenta os valores para resistência ao arrancamento normal dos de algumas espécies de dormentes de eucalipto testados por Icimoto (2014).

Fonte: Icimoto (2014)

Pode-se observar pela Figura 63 que todos os dormentes de eucalipto testados por Icimoto (2014) superaram os valores mínimos para a propriedade de arrancamento normal de parafuso.

Com relação a dureza dos dormentes, a Figura 64 apresenta os resultados do ensaio de dureza Janka (f_H) e os valores da norma ABNT NBR7511:2013.

Fonte: Autor (2017).

A Figura 64 apresenta que os dormentes de *Pinus spp.* com e sem reforço atingiram o valor mínimo (35 MPa) estabelecido pela norma brasileira ABNT NBR7511:2013 referente à Classe 2. Observa-se que a fibra não influenciou nos resultados do ensaio de dureza. Os dormentes de *Pinus oocarpa* superaram o quesito de dureza Janka referente a Classe 1 da norma brasileira, sendo 20% superiores ao valor médio dos dormentes fabricados com *Pinus spp.* reforçados e sem reforço.

Para aumentar a dureza de dormentes de *Pinus* MLC, independente da espécie, recomenda-se então o uso de lamelas de pinus com maior densidade nas extremidades superior e inferior dos dormentes.

Avaliou-se também a dureza dinâmica de todo lote de dormentes de MLC de *Pinus spp.* ensaiados neste estudo utilizando a 3ª geração do equipamento “Durômetro Portátil Automatizado DPM3” desenvolvido por Ballarin (2017), obtendo resultado médio de dureza Janka de 35 MPa. Observou-se pela Figura 64 que os resultados foram consistentes com os ensaios de laboratório, comprovando a eficácia deste equipamento.

Uma maneira de aumentar a dureza de madeiras é através da técnica de densificação, comprimindo a peça de madeira na sua espessura. Laine et. al. (2016) ao aplicar uma taxa de compressão de 50% densificou a madeira de scots pine (*Pinus sylvestris L.*) plantada na Finlândia, dobrando o valor médio da dureza Brinell, passando de 15,5 MPa para 29,3 MPa e aumentando a densidade inicial de 527 kg/m³ para 915 kg/m³.

Os resultados de cisalhamento na linha de cola para os dormentes de *Pinus spp.* foram agrupados em linhas de cola com reforço (Ref) e sem reforço (NRef) e estão apresentados na Figura 65.

Figura 65: Resultados de f_v para os dormentes de MLC de *Pinus*

Fonte: Autor (2017).

De acordo com a Figura 65, os resultados de cisalhamento na linha de cola sem reforço foram próximos para as linhas de cola com fibra entre as lamelas.

A resistência da linha de cola não foi afetada na resistência ao cisalhamento quando comparado com as linhas de cola com ausência de reforço, mostrando uma boa interação entre a madeira de pinus, o adesivo e a fibra de vidro.

No ensaio de delaminação para uso externo, os dormentes de MLC de *Pinus spp.* desenvolvidos neste trabalho não apresentaram abertura na linha de cola (Tabela 16), comprovando assim a boa interação entre a madeira de *Pinus spp.* tratada com CCA, o adesivo poliuretano e a manta bidirecional de fibra de vidro.

Tabela 16: Resultados de delaminação para os dormentes de MLC de *Pinus spp.* com e sem reforço

Dormentes de MLC de <i>Pinus spp.</i>	Delaminação	
	(cm)	%
NRef	0	0
Ref	0	0

Fonte: Autor (2017).

Lopes-Anido (2005) realizou ciclo de delaminação em vigas de MLC de Southern yellow pine reforçadas com tecido de fibra de vidro seguindo os procedimentos da norma ASTM D2559:2000 *Standard Specification for Adhesives for Bonded Structural Wood Products for Use Under Exterior Exposure Conditions*, concluindo que o ciclo de delaminação é um bom parâmetro para avaliar a interação da fibra de vidro com a madeira, obtendo resultados satisfatórios para delaminação das vigas.

Sanches (2009) com base em uma inspeção visual limitada a parte superior dos dormentes da ponte ferroviária de *New Meadows* observou que os primeiros três (3) dormentes na extremidade leste da ponte sofreram mais danos do que os outros, com delaminações maiores, tanto em comprimento quanto em profundidade e também maior separação entre as bordas das lamelas.

Gong (2013) relata que os dormentes de MLC de madeira tropical sugar maple (*Acer saccharum*) e yellow birch (*Betula alleghaniensis*) aos serem tratados com CCA e creosoto apresentaram comportamentos distintos, pois o CCA é a base de água e a madeira absorve CCA e muita água, o que causa muito inchamento e depois, durante a secagem as lamelas começam a contrair ocasionando delaminação e encanoamento nas lamelas do dormente (Figura 66a). Afirma também que os dormentes tratados com creosoto depois de laminados não apresentaram os mesmos problemas, isto porque o creosoto é a base de óleo e durante o tratamento não causa muito inchamento da madeira, minimizando as tensões internas e dando mais estabilidade dimensional ao dormente (Figura 66b).

Figura 66: (a) Dormente tratado com CCA; (b) Dormente tratado com creosoto.

Fonte: Gong (2013).

Dos ensaios mecânicos realizados, a Tabela 17 apresenta os resultados da ANOVA e do teste de Tukey com relação as propriedades mecânicas investigadas dos dormentes de MLC de *Pinus spp.* com [Ref] e sem [NRef] o uso do reforço de tecido de fibra de vidro e dos dormentes de *Pinus oocarpa* [Po] (não reforçados).

Tabela 17: Resultados da ANOVA e do teste de Tukey.

Propriedades	Validação da ANOVA		ANOVA	Tukey		
	AD	Bt		NRef	Po	Ref
MOE	0,103	0,082	0,000	B	A	B
MOR	0,076	0,163	0,009	B	A	B
$f_{c90,p}$	0,081	0,265	0,000	A	A	A
R_{a0}	0,062	0,073	0,000	B	A	B
$d_{m\acute{a}x}$	0,119	0,321	0,185	A	A	A
d_{res}	0,143	0,214	0,048	A	B	B
R_{a90}	0,074	0,183	0,036	B	A	B
f_H	0,062	0,275	0,047	B	A	B
f_v	0,407	0,441	0,702	A	-	A

AD: normalidade de Anderson-Darling

Bt: homogeneidade de Bartlett

Fonte: Autor (2017).

Da Tabela 17, os resíduos da ANOVA em todas as propriedades apresentaram normalidade e homogeneidade de variâncias ($P\text{-valor} \geq 0,05$), o que valida o modelo da ANOVA. Com exceção do deslocamento máximo ($d_{m\acute{a}x}$) e da resistência ao cisalhamento (f_v), todas as demais propriedades foram afetadas de forma significativa pelos tratamentos estatísticos avaliados. Do teste de Tukey, também avaliado ao nível de 5% de significância, A denota o grupo de maior valor médio, B o grupo com o menor valor médio e assim sucessivamente, e letras iguais implicam em tratamentos com médias equivalentes.

Os dormentes em MLC fabricados com madeira de *Pinus oocarpa* forneceram os maiores resultados (A – Tabela 17), seguidos dos dormentes de madeira de *Pinus spp.*, que resultaram em médias equivalentes independente do uso do reforço em fibras de vidro.

A inserção de 1,2% de reforço de fibra de vidro, com relação à seção transversal, não foi suficiente para aumentar a resistência e a rigidez nas propriedades mecânicas dos dormentes. Para melhorar a resistência recomenda-se utilizar um tecido fibra de vidro com maior gramatura que a adotada neste trabalho (600g/cm²) assim como também aumentar a quantidade de camadas de reforço de fibra de vidro gradativamente até 3,3% da altura da seção transversal do dormente como recomendado por Fiorelli (2005).

Assim como avaliado por Issa e Kmeid (2005), utilizar fibra de carbono como reforço seria uma solução tecnológica mas pode inviabilizar financeiramente o produto devido ao custo da fibra de carbono.

5.2 Resultados do ensaio dinâmico

Durante o ensaio dinâmico na flexão do dormente de MLC reforçado com fibra, após 2500 ciclos, o conjunto (dormente+apoio elastomérico) deslocou 0,7 mm. Após executados 1.743.000 ciclos (6º dia de ensaio) o deslocamento do conjunto estava em 2,2 mm (Figura 67).

Figura 67: Resultados do ensaio dinâmico para o dormente de MLC de Pinus reforçado

Fonte: Autor (2017).

Como pode ser observado, à partir de 2,2 milhões de ciclos até os 3 milhões de ciclos o deslocamento do sistema (dormente + apoio elastomérico) manteve-se constante em 2,22 mm, até o final do ensaio.

Durante todo ensaio o dormente teve um comportamento estável e não foi necessário um realinhamento do mesmo, diferente do comportamento de dormentes de concreto que necessitam de realinhamento pois a composição fica muito rígida.

Após o término do ensaio e realização de avaliação visual não foram detectadas nenhuma ocorrência de falhas no dormente tais como trincas, rachas ou qualquer outra avaria.

Foi constatado um deslocamento máximo (afundamento) de 1,6 mm embaixo da placa de apoio, decorrente da força de compressão exercida pela placa sobre o dormente durante o ensaio. Ocorreu uma variação crescente do deslocamento da placa na madeira até transcorrer 1.600.000 ciclos de ensaio, atingindo seu deslocamento máximo no valor de 1,6mm, após esta ciclagem este deslocamento se manteve constante. Este valor corresponde à metade do deslocamento residual permitido pelas normas ABNT NBR7511:2013 e AREMA:2009 no ensaio de compressão normal – placa para ensaio estático. A Figura 68 apresenta o desgaste superficial na região de compressão abaixo da placa de apoio do dormente ao final do ensaio dinâmico.

Figura 68: Desgaste superficial devido ao afundamento da placa de apoio ao final do ensaio dinâmico para o dormente de MLC de *Pinus spp.* reforçado

Fonte: Autor (2017).

A norma AREMA:2009 estabelece no ensaio dinâmico que o dormente deve suportar as cargas verticais resultante da fadiga na flexão, estabelecendo procedimento de ensaio somente para dormente monobloco de concreto protendido, onde deve ser aplicado 3 milhões

de ciclos sem que ocorra fratura na camada inferior do dormente. Para outros dormentes o procedimento e a configuração de teste devem ser verificados e acordados com o engenheiro. A norma diz também que os critérios de avaliação do ensaio dinâmico para outros dormentes estão em desenvolvimento.

Ballarin (1999) ao final dos ensaios dinâmicos (após aplicados 1.080.000 ciclos) nos dormentes de eucalipto citriodora aponta que os deslocamentos se mostraram bastante semelhantes aos observados no início do ensaio, com reduções máximas da ordem de 3mm. Conclui também que as deformações específicas foram de 1,5 a 2,0 vezes menor em relação as deformações em ensaio estático inicial executado logo após o assentamento do dormente no lastro (em caixa de brita) em laboratório.

Considerando que o dormente de MLC de *Pinus spp.* reforçado não apresentou problemas ao final do ensaio dinâmico, foi contatada a empresa RUMO e acordado em instalar 20 unidades dos dormentes produzidos na linha da empresa que passa pela cidade de São Carlos para facilitar o acompanhamento periódico pelo autor deste trabalho. Foram definidas 2 situações para teste: 10 dormentes serão instalados em um trecho de reta e 10 dormentes em uma curva para que se possa observar o comportamento dos dormentes em duas situações de aplicação com esforços impostos distintos. Os dormentes serão aplicados em via até o final do ano de 2018.

6 CONCLUSÕES

Da ampla experimentação com dormentes de MLC de *Pinus*, observou-se que é possível produzir dormentes para a Classe 1 desde que se faça uma classificação visual e mecânica com espécies de *Pinus* com densidade maior que 600kg/m^3 , isso pode ser obtido de madeiras retiradas de árvores com mais de 25 anos de idade, tendo como grande vantagem do *Pinus* em relação ao eucalipto a impregnação do tratamento preservante em 100% do volume das lamelas.

A qualidade da colagem não foi afetada com a inserção da camada de fibra de vidro entre lamelas de acordo com o ensaio de delaminação.

A resistência ao cisalhamento na linha de cola com reforço não foi afetada quando comparado com as resistências das linhas de cola com ausência de reforço.

Nos ensaios de arrancamento normal e lateral de tirefão o reforço não influenciou nos resultados, porém acredita-se que ele seja importante para contribuir na resistência ao arrancamento em situação dinâmica de uso em via férrea ao longo do tempo, principalmente contra o embutimento do tirefão devido aos esforços laterais, já que este é um dos maiores responsáveis pela troca prematura dos dormentes instalados.

O reforço com tecido fibra de vidro não contribuiu para o aumento significativo dos valores de resistência e rigidez à flexão dos dormentes testados, porém certamente contribuirá para a resistência à fadiga devido às solicitações dinâmicas à flexão, prolongando a vida útil do dormente de MLC.

Nos ensaios dinâmicos o dormente de MLC de *Pinus spp.* atingiu 3 milhões de ciclos à uma frequência de 5Hz com carregamento variando entre 19,1kN à 191kN não apresentando qualquer tipo de dano na madeira.

O reforço instalado entre as duas primeiras lamelas, não afetou os ensaios de dureza Janka e compressão normal - placa. Para o aumento destas propriedades recomenda-se utilizar lamelas de *pinus* com densidade acima de 600kg/m^3 ou um tratamento especial nas lamelas como a densificação.

O tecido de fibra de vidro bidirecional quando colado entre duas lamelas de madeira contribui para a redução na propagação de fendilamentos e rachaduras na madeira devido ao inchamento (ganho de umidade) e a retração (perda de umidade) durante a exposição a intempéries, na qual o dormente é submetido.

A disposição do reforço entre as duas lamelas superiores e inferiores (regiões de solicitação de tração e compressão) tem dupla função, isto é, auxiliar na resistência durante a

inversão de esforços quando da passagem dos trens e também eliminar a dependência assertiva do instalador de dormentes na linha férrea.

O reforço de tecido de fibra de vidro, além de leve, é de fácil manuseio e pode ser aplicado por somente uma pessoa no processo produtivo após a passagem do adesivo nas lamelas.

Para trabalhos futuros visando melhorar a resistência das propriedades mecânicas recomenda-se aumentar a gramatura do tecido de fibra de vidro e/ou quantidade de camadas do tecido de fibra de vidro gradativamente até 3,3% do volume do dormente como recomenda a bibliografia para vigas de MLC

Em continuação desta pesquisa serão instalados os 116 dormentes em diversos trechos de ferrovias ao longo do Brasil, já produzidos para esta finalidade. Na cidade de São Carlos-SP serão instalados 20 dormentes, em trecho para fácil acompanhamento periódico, em ferrovia administrada pela empresa RUMO logística. Foram escolhidos pelos engenheiros da empresa, um trecho em reta e outro em curva, para obtenção de resultados em duas situações distintas de uso.

7 REFERENCIAS

AGÊNCIA BRASIL. **Moreira Franco: investimentos federais em ferrovias serão prioridade em 2018.** Disponível em <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2017/12/moreira-franco-investimentos-federais-em-ferrovias-serao-prioridade-em-2018>>. Acesso em 27 jan. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTES. **Ferrovias.** Disponível em <<http://www.antt.gov.br/ferrovias/index.html>> Acesso em: 07 fev. 2018.

ALEXANDRE, R.P. **Sinais digitais de um durômetro portátil para a estimativa de propriedades de madeiras para dormentes.** 2015. 86 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2015.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **ASTM D198:** Standard test of static tests of lumber in structural sizes. West Conshohocken, PA, 2015.

_____. **ASTM D 2559:** Standard Specification for Adhesives for Bonded Structural Wood Products for Use Under Exterior Exposure Conditions. West Conshohocken, PA, 2000.

AMERICAN RAILWAY ENGINEERING AND MAINTENANCE-OF-WAY ASSOCIATION. **AREMA:** Manual for Railway Engineering – Ties. Lanham, 2009. p.1033-1212.

ANDRADE, E.N.O **Eucalipto.** 2.ed. História. São Paulo. 1961 p. 49-64.

ANTÔNIO SILVA et. al. Feasibility of creosote treatment for glued-laminated Pine-timber railway sleepers. **J. Mater. Civ. Eng.** p. 1-11, 2014.

MARTINS, G. C.A. **Análise Numérica e Experimental de vigas de Madeira Laminada Colada em Situação de Incêndio.** 2016. 197p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190:** Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997. 107p.

_____. **NBR7511:** Dormentes de madeira - Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013. 30p.

_____**CE 06: 100.01-001 PN NBR16461:** Dormente de compósito polimérico - Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2016. 24p. (em revisão)

_____**CE 02:126.10-0001-1 PN** Madeiras: Ensaio de Classificação Visual e Mecânica Rio de Janeiro, 2018 (em revisão).

_____**CE 02:126.10-0001-5 PN** Madeira Laminada Colada Estrutural: Métodos de ensaio Rio de Janeiro, 2018 (em revisão).

AUSTRALIA STANDARDS. **AS1085.18:** Railway track material - Screw spikes and threaded inserts. Sydney, 2013. 24p.

AZAMBUJA M. S. **Avaliação do Adesivo Poliuretano à Base de Mamona para Fabricação de Madeira Laminada Colada (MLC).** 2000. 108p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

AZAMBUJA M. S. **Estudo Experimental de Adesivos para Fabricação de Madeira Laminada Colada: Avaliação da Resistência de Emendas Dentadas da Durabilidade e de Vigas.** 2006. 159p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

BALLARIN, A.W.; ALMEIDA, P.; PALMA, H.L. Estimating hardness of eucalyptus wood with a portable hardness tester. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 2012, Auckland. **Proceedings...** Auckland: Quennville, 2012, 2697p.

DE ASSIS, A. A.; ALEXANDRE, R. P.; BALLARIN, A. W. Dynamic hardness of wood - measurements with an automated portable hardness tester. **Holzforschung.** v. 71, pp. 383-389, 2017.

BALLARIN A.W. **Desempenho mecânico de dormentes prismáticos de Eucalipto citriodora (E. citriodora).** 1999. 115f. Tese (Livre docência) - Faculdade de Ciências Agrônômicas do Campus de Botucatu, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 1999.

BHKARI N. M.; AHMAD Z.; BAKAR A. A.; TAHIR Md. P. Ultimate Strength of Kekatong Glued Laminated Timber Railway Sleepers. In: THE INTERNATIONAL CIVIL AND INFRASTRUCTURE ENGINEERING CONFERENCE, 2013, Singapore. **Proceedings...** Singapore: Springer, 2013, p. 97–105.

BONO, C. T. **Madeira Laminada Colada na Arquitetura: Sistematização de Obras Executadas no Brasil**. 1996. 247p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

BRINA, H. L. **Estradas de ferro 1 via permanente**. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos S.A., 1979

CALIL NETO C. **Madeira Laminada Colada (MLC): Controle de Qualidade em Combinações Espécie-adesivo-tratamento preservativo**. 2011. 125p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

CALLISTER JR., WILLIAM D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. 1a ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos S.A. 2002.

CARRASCO, E. M. **Resistência, Elasticidade e Distribuição de Tensões nas Vigas Retas de Madeira Laminada Colada (MLC)**. 1998. 126p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1989.

CAVALHEIRO. S. C. **Madeira Laminada Colada de *Schizolobium amazonicum* Herb. (Paricá): combinação adesivo/tratamento preservante**. 2014. 104p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY. **Comparison: Railways**. Washington. Disponível em: <https://www.cia.gov/library/publications/resources/the-world-factbook/rankorder/2121rank.html>>. Acesso em: 20 nov. 2017.

CHINA RAILWAY GROUP LIMITED. **Annual Report**: Report. Beijing, 2016. 255p.

COLENCI R.A. **Desenvolvimento de equipamento para avaliação em campo da dureza de madeiras para dormente ferroviário**. 2006. 83f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu, Botucatu, 2006.

CORREA, W. L. **Controle das vibrações induzidas pela interação dinâmica entre trens-trilhos-dormentes-estrutura de aço de pontes ferroviárias**. 2008. 239 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008

DAGHER, H. et. al. **Variable prestressing of FRP-reinforced glulam beams: methodology and behavior**. In: World Conference on Timber Engineering, 2010.

DAVIDS, W. G.; DAGHER, H. J.; BRETON, J. M. Modeling creep deformations of FRP-reinforced glulam beams. **Wood and Fiber Science**, v.32, n.4. p. 426-441, 2000.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Instituto nacional de pesquisas ferroviárias: A Importância do modal ferroviário**. 2016. Disponível em: <https://www.dnit.gov.br/modais-2/ferrovias/inpf/instituto-nacional-de-pesquisas-ferroviarias>. Acesso em: 27 jan. 2018.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 13145: Railway applications - Track - Wood sleepers and bearers**. Brussels, 2011. 24p.

FERDOUS W. et. al. Composite railway sleepers – Recent developments, challenges and future prospects. **Composite Structures**. V. 134, p. 158-168, 2015.

FERDOUS W. et. al. Evaluation of an Innovative Composite Railway Sleeper for a Narrow-Gauge Track under Static Load. **J. Compos. Constr.**, v.22, n2. p1-13, 2018.

FERREIRA, R. D. **Análise do comportamento mecânico de dormentes prismáticos de Eucalipto citriodora submetido a solicitações dinâmicas**. 2002. 123 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

FERREIRA, R. D.; VIVAN R. O.; MEIRELLES P. S. **Ensaio dinâmico em protótipo de dormente de compósitos poliméricos de madeira laminada colada de *Pinus spp.* de fabricação BRAREWOODS industrial importação e exportação Ltda.** Campinas: FEM: UNICAMP, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2017. 4p. Relatório Técnico 002/2017.

FIGLIOLI, J. **Estudo teórico e experimental de vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro**. 2005. 108 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook—Wood as an engineering material**. Madison: Department of Agriculture, Forest Service, 2010. 508 p.

GONG, Meng et al. Use of low grade hardwoods for fabricating laminated railway ties. **Construction and Building Materials**, v.41, p.73-78, 2013.

ICIMOTO F. H. et al. Dormentes de *Pinus*: ensaios de flexão de acordo com a proposta de ensaios da revisão da norma ABNT NBR 7511/2005. In: XIII EBRAMEM, 2012. Vitória. **Anais...** Vitória, 2012.

ICIMOTO, F.H. **Dormentes em Madeira Laminada Colada de *Pinus oocarpa***. 2013. 126 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

ICIMOTO F. H.; FERRO F. S.; CALIL JUNIOR C. Glulam sleepers composites for use in Brazilian railways. In WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 2014. Quebec. **Proceedings...** Quebec, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA ESTATÍSTICA - IBGE. **Resultados do Censo 2010: População**. 2010. Disponível em: <http://www.censo2010.ibge.gov.br/resultados_do_censo2010.php>. Acesso em: 07 maio 2010.

ISSA, Camille A.; KMEID, Ziad. Advanced wood engineering: glulam beams. **Construction and Building Materials**, v. 19, n. 2, p. 99-106, 2005.

JESUS, J. M. H. **Estudo do Adesivo Poliuretano à Base de Mamona em Madeira Laminada Colada (MLC)**. 2000. 125p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

JORDAN, R., MORRIS, G. **The feasibility of recycled plastic railway sleepers**. Testing Research Laboratory, United Kingdom, 2006. 37p. Project report PPR 094.

LAINE, K. et. al. Wood densification and thermal modification: hardness, set-recovery and micromorphology. **Wood Science and Technology**, v.50, n.5, p.50:883–894, 2016.

LOBO, A. **Transporte de cargas e a encruzilhada do Brasil para o futuro**. Rio de Janeiro: Ilos, 2017. Disponível em: <http://www.ilos.com.br/web/tag/matriz-de-transportes/>. Acesso em: 10 fev. 2018.

LOPEZ-ANIDO R. et al. Performance-based material evaluation of fiber-reinforced polymer-wood interfaces in reinforced glulam members. **Journal of Testing and Evaluation**, v.33, n.6, p.385-394, 2005.

MACEDO, A. N. **Estudo de Emendas Dentadas em Madeira Laminada Colada (MLC): Avaliação de Método de Ensaio**. 1996. 129p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

MACEDO, A. N. **Fadiga em Emendas Dentadas em Madeira Laminada Colada**. 2000. 219p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

MANALO, A. T. et al. A review of alternative materials for replacing existing timber sleepers. **Composite Structures**, v 92, p.603-611, 2010.

MANALO, A.; ARAVINTHAN T. Behavior of Full-Scale Railway Turnout Sleepers from Glue-Laminated Fiber Composite Sandwich Structures. **J. Compos. Constr.**, v16 (6), p.724-736, 2012.

MILLER, R. **Rail and tramway sleepers: Product recognition, identification and presentation**. 2007. Disponível em: http://www.cqfa.com.au/documents/1181619278_sleepers_fact_sheet.pdf. Acessado em 12 ago 2014.

MIOTTO, J.L. **Estruturas mistas de madeira-concreto: avaliação das vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibras de vidro**. 2009. 357p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

MIURA S. et. al. The mechanism of railway tracks. **Japan Railway & Transport Review**. v. 14, p.38–45, 1998.

NOGUEIRA S. N. **Proposta de um método de ensaio para o controle de qualidade na produção de elementos estruturais de MLC e LVL**. 2017. 152p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

PATTAMAPROM C. et.al. **Natural rubber composites for railway sleepers: a feasibility study**. Thailand: Thammasat University. 2005.

PÊGO, B. **Logística e transportes no Brasil: Uma análise do programa de investimentos 2013-2017 em rodovias e ferrovias**. Rio de Janeiro: Livraria Ipea, 2016. 30 p. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/161026_relatorio_pesquisa_logistica_transportes_brasil.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2018.

POMPERMAYER, F. M.; NETO, C. A. S.; SOUZA, R. A. F. **Considerações sobre os marcos regulatórios do setor ferroviário brasileiro – 1997- 2012**. Brasília: Livraria Ipea, 2012 (nº6). Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=16346&catid=191&Itemid=8>. Acesso em: 28 jan. 2018.

PORTO, T. G. (2004). **Apostila PTR 2501-Ferrovias**. Apostila da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Disponível em <<http://www.poli.usp.br/d/ptr0540/download/ApostilaNova.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2016.

QIAO, P.; DAVALOS, J.F.; ZIPFEL, M. G. Modeling and optimal design of composite reinforced wood railroad crosstie. **Composite Structures**, v. 41, p.87–96, 1998.

RAFTERY, G. M.; ROOD, P. D. FRP reinforcement of low-grade glulam timber bonded with wood adhesive. **Construction and Building Materials**, v. 91, p. 116-125, 2015.

REVISTA FERROVIÁRIA. **Anuário RF 2014**. São Paulo, 2014. 225p.

RÖTHLISBERGER. **History and development of the wooden sleeper**. [s.i.], 2013. Disponível em: <<http://www.corbat-holding.ch/CMS/default.asp?ID=1816>>. Acesso em: 04 mar. 2013.

SANCHES O. **Inspection of the Advanced Engineered Lumber Railroad Ties at the New Meadows Bridge**. Orono; ME: University of Maine, 2009, 5p.

SCHAMBERG, M. São Carlos, jun. 2013. Entrevistador: Felipe Hideyoshi Icimoto. São Paulo. 2013.

SUCENA, M. **Tecnologia ferroviária: Características principais**. Apostila do Instituto Militar de Engenharia –IME, 2007. Disponível em: <<http://www.sucena.eng.br/IME/SistFerr3.pdf>>. Acesso em: 13 maio 2016.

TELLES, P. C. DA S. **História da engenharia ferroviária no Brasil**. Rio de Janeiro: Notícia & Cia., 2011. 300p.

TIMBER ENGINEERING COMPANY. A brief history of the timber engineering company: Report. 1958. 10p.

WOIDASKY, J. Railwaste – production of railway sleepers by mixed plastic waste, SUSPRISE Joint Call Evaluation Workshop, Berlin, Germany. 2008.

ZANGIACOMO A. L. **Emprego de Espécies Tropicais Alternativas na Produção de Elementos Estruturais de Madeira Laminada Colada**. 2003. 103p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

ZAREMBSKI, A.M. Concrete vs. wood ties: Making the economic choice. In: CONFERENCE ON MAINTAINING RAILWAY TRACK: DETERMINING COST AND ALLOCATING RESOURCES, 1993, Arlington, VA. **Anais....**Disponível em<<http://www.rta.org/assets/docs/RTASponsoredResearch/WoodCrosstieEconomics/063%20concrete%20vs.%20wood%20ties%201993.pdf>>. Acesso em: 22 maio 2013.