UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

FELIPE HIDEYOSHI ICIMOTO

Dormentes em Madeira Laminada Colada de *Pinus oocarpa*

São Carlos
2013

FELIPE HIDEYOSHI ICIMOTO

Dormentes em Madeira Laminada Colada de *Pinus oocarpa*

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

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

Orientador: Carlito Calil Junior

Versão corrigida, original na unidade

São Carlos
2013

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 preparada pela Seção de Atendimentos ao Usuário do Serviço de Biblioteca- EESC/ USP.

I48d Icimoto, Felipe Hideyoshi
Dormentes em Madeira Laminada Colada de *Pinus oocarpa* / Felipe Hideyoshi Icimoto; orientador Carlito Calil Júnior. São Carlos, 2013.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências 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, 2013.

1. Dormentes em madeira laminada colada. 2. Dormentes de madeira. 3. Madeira Laminada Colada. 4. Espécies de florestas plantadas. 5. *Pinus oocarpa*. 6. Normalização. 7. Ferrovias. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **FELIPE HIDEYOSHI ICIMOTO**.

Título da dissertação: "Dormentes em madeira laminada colada de Pinus oocarpa".

Data da defesa: 24/07/2013

Comissão Julgadora:

Resultado: APROVADO

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

Carlito - APROVADO

Prof. Dr. **Adriano Wagner Ballarin**

(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP-Botucatu)

Adriano APROVADO

Prof. Dr. **Antonio Alves Dias**

(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

AA Dias APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais:

Prof. Titular **Waldek Wladimir Bose Filho**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

**Dedico este trabalho ao meu pai Maurício,
a minha mãe Neuza, aos meus irmãos
Marcelo e Rafael e minha amada Fabiane,
pelo incentivo ao estudo e compreensão.**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela vida, saúde, inteligência 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, a distancia faz parte. Obrigado por sempre prezarem pelo meu estudo.

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 e pelo grande aprendizado sobre madeiras.

Ao professor Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr, pelos ensinamentos acadêmicos e de vida, pela paciência e conversas importantes sempre em momentos oportunos.

Ao professor Antônio Alves Dias pelos ensinamentos.

A minha amada Fabiane Salles Ferro, sem a qual grande parte deste caminho seria muito mais difícil. Companhia acima de tudo, obrigado pela paciência e por existir em minha vida.

Aos técnicos do LaMEM, Tânia, Cido, Bragatto, Roberto e Samuel. Ao Jaime e Arnaldo que ajudaram neste trabalho. Em especial ao Silvio pela inestimável ajuda, força e confiança em todos os sentidos.

Ao prof. Dr. André Luis Christóforo pela ajuda no desenvolvimento da análise estatística.

Aos amigos do LaMEM Julio, Marcio, Pigozzo, Amós, Maria de Fátima (Fatí), Sabrina, Marília, Calil Neto, Diego, Ricardo, Leandro, Lauren, Luciano, Raquel, Gloria, Lorena, Marcão e Jairo.

Aos funcionários do SMM-EESC, à Escola de Engenharia de São Carlos e a Universidade de São Paulo pelo suporte administrativo e atendimento ao autor.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de mestrado.

A Pro-reitoria de Pós-graduação da Universidade de São Paulo pelo apoio financeiro.

A indústria Catalana Artefatos de Madeira (CAM) pela doação da madeira de *Pinus* de disponibilização da indústria para produção dos dormentes.

**"A Idade da Pedra, a Idade do Bronze e a Idade do Plástico são história –
A Idade da Madeira é o futuro sustentável".**

Rainer Wujciak

RESUMO

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

Em 2012 foi anunciado um pacote econômico do governo que concede à iniciativa privada a operação de estradas e ferrovias pelo Brasil, onde serão investidos R\$ 133 bilhões, incluindo a construção de 10 mil quilômetros de estradas de ferro. O dormente é um dos componentes estruturais mais importantes na construção de ferrovias, com a função de receber esforços produzidos pelos veículos ferroviários, amortecer parcialmente as vibrações, transmiti-las ao lastro e manter invariável a distância entre os trilhos (bitola). As madeiras utilizadas no Brasil para a produção de dormentes são de essências nobres. Porém, com a escassez cada vez maior dessas espécies e a exploração ilegal de madeiras nativas consideradas de elevada resistência buscaram-se madeiras alternativas para esse uso como o *Eucalipto* ou o *Pinus* de florestas plantadas. Objetivo deste trabalho foi a análise experimental da viabilidade técnica da produção de dormentes pelo método de fabricação da Madeira Laminada Colada utilizando a madeira da espécie de *Pinus oocarpa* e adesivo poliuretano para atender os requisitos da recém aprovada norma de dormentes ABNT NBR 7511:2013 Dormentes de madeira – Requisitos e métodos de ensaio. Após intenso programa experimental em que foram estudadas diversas configurações de disposição de lamelas visando à otimização do processo de fabricação, foram produzidos dormentes de MLC com configurações diferentes de seção transversal, e realizados ensaios preliminares com a finalidade de atingir as especificações mínimas de norma. Os resultados mostraram que os dormentes em MLC de *Pinus oocarpa* atingiram os requisitos da norma ABNT NBR 7511:2013 Dormentes de madeira – Requisitos e métodos de ensaio.

Palavras-chave: Dormentes em madeira laminada colada, dormentes de madeira, madeira laminada colada, espécies de florestas plantadas, *Pinus oocarpa*, normalização, ferrovias.

ABSTRACT

ICIMOTO, F. H. (2013). **Glulam Sleepers produced with *Pinus oocarpa***. 126 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

In 2012 it was announced a government economic package that grants to private operation of roads and railways in Brazil, which will be invested R\$ 133 billion, including the construction of 10,000 km railroads. Sleepers are one of the most important structural components in the construction of railways with the function of receiving actions produced by the rail vehicles, diminish dampen vibrations and transmitting them to the ballast and remain invariant distance between rails (gauge). The timbers used in Brazil to manufacture sleepers are from tropical forest. Considering the scarcity and tropical illegal logging, Eucalyptus and Pines planted forests are a interesting alternative. The aim of this study was experimental analyze of the technical feasibility to produce Glulam sleepers using *Pinus oocarpa* species and polyurethane adhesive to reach the requirements of the recently approved sleepers standard ABNT NBR 7511:2013 Wood sleepers - Requirements and test methods. After intensive experimental program using various layout settings of lamellae and different configurations of cross-sectional an optimization of the manufacturing process of MLC sleepers was done in order to achieve the minimum standard specifications. Results showed that in MLC sleepers of *Pinus oocarpa* reached the requirements of the standard ABNT NBR 7511:2013 Wood sleepers - Requirements and test methods.

Keywords: Glulam sleepers, timber sleepers, glulam, reforestation species, *Pinus oocarpa*, standardization, railways.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de uma viga de MLC	26
Figura 2: Esquema de emendas longitudinais em viga de MLC	26
Figura 3: Distribuição da área de plantios florestais no Brasil, por gênero, 2011	30
Figura 4: Distribuição da área de plantios florestais no Brasil por estado, 2011	31
Figura 5: Mapa ferroviário do Brasil.....	42
Figura 6: Esquema de obra de infraestrutura em aterro	44
Figura 7: Desenho esquemático de uma estrutura ferroviária	44
Figura 8: (a) Exemplo do aparelho de mudança de via; (b) Funcionamento de um AMV	45
Figura 9: Contato roda trilho e dormente	45
Figura 10: Trilho de perfil Vignole	46
Figura 11: Tipos de trilhos com relação ao seu peso	46
Figura 12: Representação da distância entre os trilhos, denominada bitola.....	47
Figura 13: Esquema do local onde é feita a fixação dos trilhos no dormente	48
Figura 14: Visão em perspectiva das dimensões de dormentes de bitola estreita	48
Figura 15: Placa de apoio: vista frontal, superior e lateral	49
Figura 16: Esquema de fixação rígida e exemplo de tirefão	50
Figura 17: Esquema de fixação elástica	50
Figura 18: Lastro em loco	51
Figura 19: Esquema do sublastro em perfil.....	52
Figura 20: Vista geral de um trecho de via, com destaque para os dormentes.....	53
Figura 21: Dormente bi-bloco de concreto armado.....	55
Figura 22: Dormente monobloco de concreto protendido.....	55
Figura 23: Dormente de aço com perfil em forma de “U”: vistas lateral, superior e seção transversal.....	56
Figura 24: (a) Dormentes de plástico ao longo da via permanente; (b) elementos de fixação dos dormentes de plástico.....	58
Figura 25: Ilustração dos dormentes (a) prismático em perspectiva; (b) semirrolíço	65
Figura 26: Arqueamento.....	66
Figura 27: Encurvamento	66
Figura 28: Esmoadado.....	67
Figura 29: Dormente serrado – Fendilhamento.....	67

Figura 30: Dormente de duas faces – Fendilhamento e rachadura	67
Figura 31: Dormentes de eucalipto	73
Figura 32: Lote de lamelas de <i>Pinus oocarpa</i> utilizado para produção dos dormentes	74
Figura 33: Faces da madeira e incidência de nós de face, no centro e canto	75
Figura 34: Classificação visual das lamelas.....	76
Figura 35: Equipamento para a determinação do MOE por vibração transversal	77
Figura 36: Equipamento de vibração transversal utilizado nos ensaios	78
Figura 37: Aplicação automatizada do adesivo nas lamelas.....	81
Figura 38: Prensagem das lamelas do dormente.....	82
Figura 39: Dormentes produzidos em MLC	83
Figura 40: Dimensão dos corpos de prova para ensaio de flexão.....	85
Figura 41: Esquema de ensaio de flexão.....	85
Figura 42: Realização do ensaio de flexão	86
Figura 43: Esquema de retirada dos corpos de prova	86
Figura 44: Esquema de ensaio de compressão normal às fibras.....	87
Figura 45: Ensaio de compressão normal às fibras.....	88
Figura 46: Esquema de ensaio de arrancamento normal de tirefão	89
Figura 47: Tirefão fixado	89
Figura 48: Ensaio de arrancamento normal de tirefão	90
Figura 49: Esquema de ensaio de arrancamento lateral.....	91
Figura 50: Ensaio de arrancamento lateral.....	91
Figura 51: Esquema de ensaio para a determinação da dureza Janka.....	92
Figura 52: Ensaio de dureza Janka na direção normal às fibras	92
Figura 53: Rachaduras dos dormentes de <i>Eucalyptus rostrata</i>	96
Figura 54: Resultados de MOE para dormentes testados	96
Figura 55: Resultados de MOR para os dormentes testados.....	97
Figura 56: Resultados de $f_{c90,p}$ para os dormentes testados	98
Figura 57: Resultados de d_{max} e d_{res} para os dormentes testados	98
Figura 58: Resultados de Ra_0 para os dormentes testados	99
Figura 59: Resultados de Ra_0 para os dormentes testados	99
Figura 60: Resultados de f_H para os dormentes testados	100
Figura 61: Resultados dos testes de normalidade de Anderson-Darling	101
Figura 62: Resultados do teste F e de Levene para avaliação da homogeneidade entre variâncias	102

Figura 63: Gráficos de efeitos principais	104
Figura 64: Gráficos dos resíduos da ANOVA para o módulo de elasticidade na flexão: normalidade (a), independência (b) e homogeneidade (c)	115
Figura 65: Gráficos dos resíduos da ANOVA para o módulo de resistência na flexão: normalidade (a), independência (b) e homogeneidade (c)	116
Figura 66: Gráficos dos resíduos da ANOVA para o deslocamento de placa: normalidade (a), independência (b) e homogeneidade (c)	117
Figura 67: Gráficos dos resíduos da ANOVA para o deslocamento residual: normalidade (a), independência (b) e homogeneidade (c)	118
Figura 68: Gráficos dos resíduos da ANOVA para a resistência ao arrancamento lateral de tirefão: normalidade (a), independência (b) e homogeneidade (c)	119
Figura 69: Gráficos dos resíduos da ANOVA para a resistência ao arrancamento normal de tirefão: normalidade (a), independência (b) e homogeneidade (c)	120
Figura 70: Gráficos dos resíduos da ANOVA para dureza Janka: normalidade (a), independência (b) e homogeneidade (c)	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Áreas florestais e de plantações de aspectos relevantes de outras espécies plantadas no Brasil.....	32
Tabela 2: Evolução das exportações brasileiras de produtos de florestas plantadas, 2004-2011	33
Tabela 3: Algumas contribuições do LaMEM para caracterização de espécies de florestas plantadas	34
Tabela 4: Durabilidade natural e permeabilidade de algumas espécies de reflorestamento....	38
Tabela 5: Ensaios de campo para análise da durabilidade da madeira <i>Pinus</i> com e sem tratamento	39
Tabela 6: Diversas malhas ferroviárias do mundo classificadas pela densidade.....	41
Tabela 7: Relação das principais empresas ferroviárias S.A., ferrovias urbanas e companhias de trens urbanos do Brasil	42
Tabela 8: Vantagens e desvantagens dos tipos de dormentes	61
Tabela 9: Dimensões nominais e tolerâncias dos dormentes prismáticos de acordo com ABNT NBR 7511:2013 Dormentes de madeira – Requisitos e métodos de ensaio.....	65
Tabela 10: Dimensões nominais e tolerâncias dos dormentes semi-rolços de acordo com a ABNT NBR 7511:2013 Dormentes de madeira – Requisitos e métodos de ensaio.....	65
Tabela 11: Dimensões de esmoado em centímetros	67
Tabela 12: Dimensões máximas de fendas e rachas.....	68
Tabela 13: Espécies de <i>Eucalyptus</i> mais utilizadas pela ALL	69
Tabela 14: Dimensões nominais da seção transversal das lamelas utilizadas na produção dos dormentes de MLC.....	75
Tabela 15: Porção máxima da face ocupada por um nó	76
Tabela 16: Configuração preliminar e resultados dos ensaios.....	79
Tabela 17: Detalhamento das recomendações de fabricante e a forma como foi conduzida a colagem do presente trabalho	82
Tabela 18: Quantidade de corpos de prova dos dormentes por propriedade mecânica investigada.....	84
Tabela 19: Quantidade de dormentes para ensaio de flexão.....	84
Tabela 20: Resultados de peso e densidade dos dormentes.....	95
Tabela 21: Resultados da análise de variância	103

Tabela 22: Resultados dos ensaios de flexão estática	113
Tabela 23: Resultados dos ensaios de resistência à compressão-placa.....	113
Tabela 24: Resultados dos ensaios de resistência ao arrancamento lateral de tirefão	113
Tabela 25: Resultados dos ensaios de resistência ao arrancamento normal de tirefão	114
Tabela 26: Resultados dos ensaios de dureza Janka	114
Tabela 27: Resultados da ANOVA para o módulo de elasticidade na flexão	121
Tabela 28: Resultados da ANOVA para o módulo de resistência na flexão	121
Tabela 29: Resultados da ANOVA para o deslocamento de placa.....	121
Tabela 30: Resultados da ANOVA para o deslocamento residual	121
Tabela 31: Resultados da ANOVA para a resistência ao arrancamento lateral de tirefão....	121
Tabela 32: Resultados da ANOVA para a resistência ao arrancamento normal de tirefão ..	121
Tabela 33: Resultados da ANOVA para a dureza Janka.....	122

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	21
1.1 Objetivo principal	23
1.1.2 Objetivos específicos	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1 Madeira Laminada Colada.....	25
2.1.1 Madeira de florestas plantadas	29
2.1.2 <i>Pinus</i> sp.	34
2.1.3 Tratamento preservante na madeira de <i>Pinus</i>	37
2.2 Ferrovias	40
2.2.1 Infraestrutura	43
2.2.2 Superestrutura.....	44
2.3 Dormentes.....	52
2.3.1 Dormentes de concreto	54
2.3.2 Dormentes de aço	56
2.3.3 Dormentes de plástico	57
2.3.4 Dormentes em madeira.....	58
2.3.5 Comparação entre tipos de dormentes.....	60
2.4 Documentos Normativos	62
2.4.1 AREMA - The American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association, AREMA/2009 - Manual for Railway Engineering	62
2.4.2 ABNT NBR 7190:1997 Projetos de Estruturas de Madeira (revista)	63
2.4.3 ABNT NBR 7511:2013 Dormentes de madeira – Requisitos e métodos de ensaio	64
2.4.4 Documentos empresariais.....	68
2.4.5 Considerações aos documentos normativos e empresariais	71
3 MATERIAIS E MÉTODOS	73

3.1 Madeira	73
3.2 Adesivo	74
3.3 Classificação das Lamelas	74
3.3.1 Classificação visual das lamelas	75
3.3.2 Classificação mecânica não destrutiva das lamelas	77
3.4 Produção dos dormentes de MLC	78
3.4.1 Ensaios preliminares	78
3.4.2 Esquema de montagem das vigas de Madeira Laminada Colada	80
3.4.3 Colagem das lamelas.....	81
3.5 Caracterização de dormentes	83
3.5.1 Ensaio de flexão	84
3.5.2 Ensaio de compressão normal - placa	87
3.5.3 Ensaio de arrancamento normal de tirefão.....	88
3.5.4 Ensaio de arrancamento lateral de tirefão	90
3.5.5 Ensaio de dureza Janka	92
3.6 Análise estatística.....	93
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	95
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	105
REFERÊNCIAS	107
APÊNDICE.....	113

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Mais de 80% da população brasileira vive no meio urbano, em cidades. Contudo, o deslocamento destas pessoas é feito, principalmente, por modal rodoviário, causando grandes congestionamentos e, conseqüentemente, perdas de tempo desnecessárias (IBGE, 2010).

O transporte ferroviário é uma alternativa de transporte (passageiros e cargas) de alta eficiência, sendo muito importante para a economia de uma nação.

A ferrovia fornece a possibilidade de se formarem comboios extensos, rebocados por uma única unidade motora, possibilitando grande economia de energia. Particularmente para o transporte de cargas proporciona um menor custo por tonelada, em relação ao transporte rodoviário.

Países desenvolvidos utilizam o transporte de ferroviário em larga escala, Os quatro países com maiores densidades de malha ferroviária (km de ferrovias/1000km² de área) são Alemanha (120), Japão (75), Itália (69) e Inglaterra (68), o Brasil ocupa a 17ª colocação com uma densidade de 3,4 e um malha ferroviária, no ano de 2008, de 28.538 km (CIA FACTBOOK, 2013).

De acordo com o pacote do governo federal brasileiro, anunciado em 2012, que concede à iniciativa privada a operação de estradas e ferrovias, serão investidos R\$ 133 bilhões neste segmento incluindo a construção de 10 mil quilômetros de estradas de ferro. Serão construídas 12 novas ferrovias, que terão ligação com oito portos. Considerando 1.600 dormentes/km serão necessários 16 milhões de dormentes para esta demanda. Somente a empresa ALL, no ano de 2012, substituiu 480 mil dormentes de madeira.

A via férrea é constituída por duas partes, infraestrutura e a superestrutura. Um dos componentes mais importantes da superestrutura é o dormente que tem por função receber os esforços produzidos pelos veículos ferroviários.

Propriedades como resistência e rigidez, amortecimento de vibrações, fixação dos trilhos (sendo firme, mas não excessivamente rígida), adequado isolamento elétrico entre trilhos, manter invariável a bitola e alta durabilidade, são necessárias ao dormente para dar suporte aos trilhos. Características encontradas principalmente no material madeira. Com isso as empresas que operam os sistemas de transporte ferroviário dão preferência aos dormentes de madeira sendo que a falta de madeira com qualidade para dormentes obriga-os utilizar

dormentes fabricados com aço, concreto e polímeros, embora o dormente de madeira seja o único produzido com matéria prima 100% renovável dentre todos os citados.

Em relação à mudança climática indiscutível e suas graves consequências, o uso de madeira ganha cada vez mais importância. A redução de gás do efeito estufa tornou-se um dos maiores desafios do nosso tempo. A madeira é não só uma matéria-prima de CO₂ neutro, mas que também armazena gás do efeito estufa, sendo que para cada quilo de dormente de madeira produzido, 1,44 quilos de CO₂ são removidos da atmosfera, um kilo de O₂ é liberado para a atmosfera e 18,5 MJ de poder calórico (correspondente a 0,4 l de óleo combustível) é acumulado a partir da energia solar. Portanto, as florestas e dormentes produzidos a partir delas, são importantes redutores de gases do efeito estufa.

As madeiras já utilizadas pelo 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 a madeira de florestas plantadas, como o eucalipto, que vem sendo utilizadas na fabricação de dormentes, substituindo as espécies nativas e permitindo a exploração racional da madeira.

Em 2011, a área ocupada por plantios florestais de *Eucalyptus* e *Pinus* no Brasil totalizou 6.515.844 ha, sendo 74,8% correspondente à área de plantios de *Eucalyptus* e 25,2% a plantios de *Pinus*. Os Estados de Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Bahia, Santa Catarina, Mato Grosso do Sul e Rio Grande do Sul se destacaram no cenário nacional como os estados detentores de 87,7% da área total de plantios florestais. Espécies, como Acácia, Seringueira, Paricá, Teca e Pinho do Paraná representam uma plantação de 457 mil ha, parte significativa das chamadas outras espécies, merecendo a devida atenção à sua importância econômica (ABRAF, 2012; ITTO, 2009).

A madeira de *Pinus* possui grande facilidade e rapidez de usinagem, excelente penetração e interação com adesivos e também grande retenção de tratamento preservante.

O *Pinus oocarpa* está entre as espécies de *Pinus* tropicais mais utilizadas pelos trópicos. A sua madeira é moderadamente dura e resistente, de alta qualidade para produção de peças serradas para construções e confecção de chapas. Além de madeira, *Pinus oocarpa*, também, produz resina em quantidade viável para extração comercial (SHIMIZU, 2006).

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

As madeiras utilizadas no Brasil para a fabricação de dormentes são em sua totalidade maciças (serradas em uma única peça), porém a dificuldade de encontrar peças estruturais de madeira maciça de grandes dimensões esta cada dia mais presente.

Até o presente momento não foram encontrados registros da utilização de *Pinus* serrado para dormentes ferroviários, provavelmente devido a sua baixa resistência e rigidez para esta aplicação estrutural.

A proposta do presente estudo é a de produção de dormentes em MLC com madeira de *Pinus oocarpa* buscando o uso de espécies de madeira de reflorestamento à necessidade de utilização de novas espécies de madeira com resistência adequada para a produção de dormentes.

1.1 Objetivo principal

Este trabalho tem como objetivo geral:

- Estudo experimental da viabilidade técnica de produção de dormentes de madeira laminada colada de *Pinus* para atender os requisitos normativos brasileiros.

1.1.2 Objetivos específicos

Este trabalho teve ainda os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar o desempenho estrutural da MLC de *Pinus oocarpa* utilizando adesivo poliuretano Purbond e tratamento preservante CCA;
- Avaliar a influência da classificação visual e mecânica e somente classificação visual em lamelas para produção de dormentes em MLC;
- Determinar a resistência e rigidez de dormentes em MLC de *Pinus oocarpa*, comparando os resultados com valores mínimos normalizados pela ABNT NBR 7511:2013 Dormentes de madeira – Requisitos e métodos de ensaio;

- Determinar a resistência e rigidez de dormentes serrados de duas espécies de *Eucalyptus*, comparando os resultados com valores mínimos normalizados pela ABNT NBR 7511:2013 Dormentes de madeira – Requisitos e métodos de ensaio;
- Aplicar a nova metodologia de ensaios da recém aprovada norma de dormentes brasileira ABNT NBR 7511:2013 Dormentes de madeira – Requisitos e métodos de ensaio.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo estão apresentadas informações relacionadas à Madeira Laminada Colada, florestas plantadas, tratamento preservante, ferrovias, dormentes ferroviários e documentos normativos.

2.1 Madeira Laminada Colada

A Madeira Laminada Colada é um produto estrutural obtido a partir da união de duas técnicas, a técnica da lamelagem e a técnica da colagem. A colagem é feita em pequenas peças de madeira (denominadas lamelas) de modo a formar um grande elemento estrutural. A colagem entre topos das lamelas resultam no comprimento total da viga, já a altura e largura desejada na peça de MLC são obtidas pela colagem face a face e borda a borda destas lamelas respectivamente. As fibras da madeira ficam dispostas paralelamente ao eixo da peça, possibilitando formar elementos retos ou curvos.

A técnica da MLC foi desenvolvida no século passado, em Wiemar, Alemanha, a partir das experiências iniciais de Otto Karl Frederick Hetzer, que obteve a primeira patente desta técnica de construção. Em 1906, Hetzer patenteou na Alemanha construções em MLC na forma curva e, desde então, esta técnica foi utilizada por diversos países europeus sendo chamada no princípio de “Estruturas Hetzer”. A maioria das aplicações da MLC destinava-se a sistemas estruturais interiores. Entretanto, com o desenvolvimento dos adesivos a prova d’água, a MLC passou a ser usada com sucesso em estruturas expostas. Permitindo a construção dos mais variados tipos de estruturas de cobertura e pontes (CALIL JUNIOR, 2002).

As primeiras pesquisas nacionais sobre o tema são datadas da década de 1960. O Eng. Vinício Walter Callia desenvolveu estudo sobre madeira laminada colada de pinheiro-do-paraná, junto ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas de Estado de São Paulo. Callia foi o fundador da primeira empresa produtora de MLC do estado, a Laminarco Madeira Industrial Ltda. Nas décadas seguintes (1970 e 1980) novas empresas se estabeleceram nos estados de Rio Grande do Sul, Paraná e Santa Catarina (APRILANTI, 2010).

Segundo Fiorelli (2004), os componentes da MLC são:

- Lamelas: apresentam uma variação na sua espessura, dependendo do elemento a ser composto, variando de 1cm (3/8”) a 5cm (2”), como mostra a Figura 1;
- Linha de cola: é a camada de cola presente entre as lamelas, escolhida de acordo com a aplicação final do produto e o tipo de madeira utilizada, mostrada na Figura 1;

Figura 1: Esquema de uma viga de MLC

- Emendas longitudinais: realizadas entre as lamelas para se obter o comprimento desejado, descrito na Figura 2;
- Emendas laterais ou transversais: tem o objetivo de proporcionar larguras maiores do que as larguras das lamelas utilizadas.

Figura 2: Esquema de emendas longitudinais em viga de MLC
Fonte: Fiorelli (2004)

Stamato (1997) comenta que entre os fatores que levaram ao desenvolvimento de produtos a base de lâminas de madeira um deles foi a diminuição da resistência de uma peça de madeira maciça pelo enfraquecimento da seção devido à existência de defeitos, tais como

medula e nó, os quais reduzem significativamente as propriedades de resistência e elasticidade da peça se comparada com a madeira isenta de defeitos.

As principais vantagens do MLC são:

- Redução de defeitos presentes em peças de madeira com grandes dimensões, tais como rachaduras, nós, empenamento, encanoamento, entre outras;
- Construção de grandes estruturas a partir de pequenas peças de madeira;
- Flexibilidade na utilização de peças com melhores qualidades nas regiões mais solicitadas e de peças com qualidade inferior nas regiões menos solicitadas;
- Baixa relação resistência/peso, dispensando a utilização de equipamentos mais robustos para seu carregamento, como também a necessidade de fundações reforçadas para sua sustentação;
- Melhor durabilidade sob a ação do fogo, devido às seções transversais avantajadas.

Entre as principais desvantagens estão o maior custo em relação à madeira maciça, devido ao processo produtivo que envolve a seleção de peças de madeira, equipamentos e mão de obra capacitada.

Não existe no Brasil, atualmente, uma norma específica para produção de MLC, diferente dos países da Europa e Estados Unidos. O que existe são algumas recomendações de execução e cálculo de elementos de MLC na ABNT NBR 7190:1997 – Projeto de Estruturas de Madeira.

No ano de 2013 foi aprovada em consulta pública a nova ABNT NBR 7190, na qual foram introduzidas recomendações para classificação visual e mecânica das lamelas como também critérios de dimensionamento de peças estruturais de MLC.

Existem atualmente cinco indústrias de MLC no país. A primeira indústria foi fundada em 1934 em Curitiba no Paraná, A ESMARA Estrutura de Madeiras Ltda, por descendentes de alemães. No estado de São Paulo existem três empresas sendo a TECMA localizada em Rancharia, a ITA Construtora, em Vargem Grande Paulista, a REWOOD em Taboão da Serra e uma indústria no estado de Goiás chamada CAM em Catalão. Todas estas empresas de MLC são voltadas para o mercado da construção civil.

A situação da produção da MLC hoje no Brasil ainda é tímida, sendo necessária uma maior divulgação desta tecnologia. Este objetivo somente será alcançado unindo pesquisadores, engenheiros, arquitetos e as indústrias para que a MLC possa atingir visibilidade, competitividade e viabilidade em relação a outros materiais estruturais comercializados no mercado.

Uma das razões pela qual a MLC ganhou mercado no Reino Unido é pelo fato da disponibilidade de vigas padrões feitas em larga escala (produção em série). As vigas padrões fizeram da MLC um material estrutural altamente competitivo e isso tem dado aos arquitetos a oportunidade de escolher a MLC para quase todos os tipos de construção (GLULAM ASSOCIATION OF UNITED KINGDOM, 2006).

No Brasil 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), 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:

Carrasco (1989), em sua tese de Doutorado desenvolveu o trabalho intitulado por “Resistência, Elasticidade e Distribuição de Tensões nas Vigas Retas de Madeira Laminada Colada (MLC)”.

Bono (1996), em sua dissertação de Mestrado desenvolveu o trabalho intitulado por “Madeira Laminada Colada na Arquitetura: Sistematização de Obras Executadas no Brasil”.

Macedo (1996), em sua dissertação de Mestrado desenvolveu o trabalho intitulado por “Estudo de Emendas Dentadas em Madeira Laminada Colada (MLC): Avaliação de Método de Ensaio”.

Jesus (2000), em sua tese de Doutorado desenvolveu o trabalho intitulado por “Estudo do Adesivo Poliuretano à Base de Mamona em Madeira Laminada Colada (MLC)”.

Macedo (2000), em sua tese de Doutorado desenvolveu o trabalho intitulado por “Fadiga em Emendas Dentadas em Madeira Laminada Colada”.

Azambuja (2002), em sua dissertação de Mestrado desenvolveu o trabalho intitulado por “Avaliação do Adesivo Poliuretano à Base de Mamona para Fabricação de Madeira Laminada Colada (MLC)”.

Zangiacomo (2003), em sua dissertação de Mestrado desenvolveu o trabalho intitulado por “Emprego de Espécies Tropicais Alternativas na Produção de Elementos Estruturais de Madeira Laminada Colada”.

Fiorelli (2005), em sua tese de Doutorado desenvolveu o trabalho intitulado por “Estudo Teórico e Experimental de Vigas de Madeira Laminada Colada Reforçadas com Fibras de Vidro”.

Azambuja (2006), em sua tese de Doutorado desenvolveu o trabalho intitulado por “Estudo Experimental de Adesivos para Fabricação de Madeira Laminada Colada: Avaliação da Resistência de Emendas Dentadas da Durabilidade e de Vigas”.

Calil Neto (2011), em sua dissertação de Mestrado desenvolveu o trabalho intitulado por “Madeira Laminada Colada (MLC): Controle de Qualidade em Combinações Espécie-adesivo-tratamento preservativo”.

2.1.1 Madeira de florestas plantadas

De 1909 a 1966, quando vigorou a Lei 5.106 dos incentivos fiscais ao reflorestamento, haviam sido plantados 470.000 hectares de eucalipto em todo o Brasil, 80% dos quais se situavam no Estado de São Paulo. A partir de então, até o ano de 1986, apenas com incentivos fiscais, foram plantados 3,2 milhões de hectares. Em 1987, foram abolidos tais incentivos. Contudo, a tecnologia desenvolvida neste período encontra-se fortalecida e completamente absorvida pelas indústrias florestais (PEREIRA et al., 2006).

Mas a história do plantio de eucalipto, que se tem documentado, é de alguns anos antes, segundo Andrade (1939), foi nos arredores da cidade de Amparo – SP, na chácara da Cachoeira, que se tem registrado o plantio (para fins decorativos) da primeira árvore de eucalipto, *Eucalyptus globulus*, pelo então vigário José Onório da Silva, entre 1861 e 1863. Contudo deve-se à ex-Companhia Paulista de Estradas de Ferro, a sistematização do cultivo dos eucaliptos e a enorme série de experiências, com base técnicas e científicas, desenvolvidas por Edmundo Navarro de Andrade, a partir de 1904, com o objetivo de suprir as necessidades de lenha, postes e dormentes dessa Companhia.

Segundo Nahuz (2004), tanto na região sudeste como na região sul do Brasil, a madeira usada na construção habitacional, especialmente em estruturas de telhado, concentra-se em 10 a 12 espécies tradicionais. A escassez crescente destas madeiras e o seu alto preço provocam sua substituição por outras madeiras, mais abundantes e disponíveis a preços competitivos.

No estado de São Paulo atualmente as madeiras mais utilizadas para cobertura são: Cambará, Cupiúba, Maçaranduba, Cumaru, Pariri, Garapa, Itaúba, Tatajuba, Cedrinho, Ipê e Jatobá.

A demanda de madeiras como material de construção aumenta com a expansão do setor, não só nos usos tradicionais (estruturas, pisos e esquadrias), mas também como material principal, tendo o seu uso aumentado em paredes externas e divisórias. Isto é visível tanto nos centros urbanos como também nos condomínios rurais. Esta expansão tem requerido

matérias-primas de características uniformes, de amplo suprimento e baixo custo, características encontradas principalmente em madeiras de florestas plantadas, homogêneas e de rápido crescimento (NAHUZ, 2004).

A ideia equivocada de que a madeira possui uma pequena vida útil tem negligenciado o uso da mesma como material de construção. Embora a madeira de reflorestamento seja susceptível ao apodrecimento e ataque de insetos sob algumas condições, é um material muito durável quando utilizado com tecnologia e tratamento químico, pois pode ser efetivamente protegido contra deterioração por período de 50 anos ou mais. Além disso, a madeira tratada com preservativos requer pouca manutenção e pintura (CALIL; BRITO, 2010).

Usando-se critérios de seleção parâmetros como densidade e resistência mecânica, as florestas plantadas de madeiras de *Pinus* e *Eucalyptus* vêm sendo usadas de forma crescente na construção de edifícios multiuso com estruturas leves na forma de vigas laminadas e coladas, estruturas de pórticos leves, treliças, componentes estruturais e outros. Com métodos construtivos modernos, têm-se usado painéis pré-fabricados, com montagem rápida no local de construção, e acabamentos modernos, como gesso acartonado, de rápida instalação, de crescente aceitação no mercado (NAHUZ, 2004).

Em 2011, a área ocupada por plantios florestais de *Eucalyptus* e *Pinus* no Brasil totalizou 6.515.844 ha (Figura 3), sendo 4.873.952 ha correspondente à área de plantios de *Eucalyptus* e 1.642.892 ha de plantios de *Pinus* (ABRAF, 2012).

Figura 3: Distribuição da área de plantios florestais no Brasil, por gênero, 2011
Fonte: Associadas individuais e coletivas da ABRAF (2012)

Segundo a própria ABRAF (2012), em 2011 não houve crescimento da área de plantios florestais de *Eucalyptus* e *Pinus* no Brasil em relação a 2010. As principais razões para a estagnação do crescimento da área de plantios florestais em 2011 são: as restrições impostas pelo governo brasileiro para a compra de terras por grupos nacionais que possuam

composição majoritária de capital estrangeiro; a reduzida atividade econômica nos países da União Europeia e nos Estados Unidos, países importadores de produtos florestais ou da cadeia de base florestal plantada; a redução da competitividade no mercado internacional dos produtos da cadeia produtiva brasileira de base florestal; e a excessiva burocratização e os longos prazos requeridos pelos órgãos ambientais nos processos de licenciamento ambiental de novos projetos florestais e industriais no país. Ademais, outro fator que diminuiu o nível de atratividade para investimentos em florestas plantadas foi à limitação imposta pela infraestrutura deficiente do país, em vias de acesso, rodovias, ferrovias e portos, o que acarreta em custos adicionais ao transporte da madeira para as fábricas e para o escoamento dos produtos.

Os Estados de Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Bahia, Santa Catarina, Mato Grosso do Sul e Rio Grande do Sul se destacaram no cenário nacional como os estados detentores de 87,7% da área total de plantios florestais. A Figura 4 apresenta a área de distribuição do total de plantios de *Eucalyptus* e *Pinus* nos Estados do Brasil em 2011.

Figura 4: Distribuição da área de plantios florestais no Brasil por estado, 2011

Fonte: Associadas individuais e coletivas da ABRAF (2012)

Segundo ITTO - Tropical Timber Market Report (2009), as plantações florestais desempenham um papel fundamental no desenvolvimento socioeconômico do país, produz bens e serviços, agrega valor aos produtos florestais, gera empregos e impostos. No entanto, estima-se que as plantações florestais representam aproximadamente 1,5% das florestas do Brasil, embora tenha um papel importante no mercado de produtos florestais para cerca de 70% da produção total de madeira industrial. Apesar de espécies dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus* serem espécies dominantes plantadas no Brasil, outras espécies, como Acácia (*Acacia parviceps*), Seringueira (*Hevea brasiliensis*), Paricá (*Schizolobium amazonicum*), Teca (*Tectona grandis*) e Pinho do Paraná (*Araucaria angustifolia*) contam para uma parte

significativa das chamadas outras espécies. Eles também merecem a devida atenção à sua importância econômica e de recente expansão da sua área de plantio. A Tabela 1 apresenta as áreas florestais e de plantações relevantes de outras espécies plantadas no Brasil.

Tabela 1: Áreas florestais e de plantações de aspectos relevantes de outras espécies plantadas no Brasil

Espécie	Nome científico	Estado com maior abundância	Área (ha)	Usos
Acácia	<i>Acacia mearnsii</i> e <i>Acacia mangium</i>	RS, RR	181.780	Madeira: energia, carvão, polpa, painéis. Tanino: couro, adesivo, óleo, borracha
Seringueira	<i>Hevea brasiliensis</i>	Região da Amazônia, SP, BA, MS	117.506	Madeira: energia, polpa. Seiva: borracha
Paricá	<i>Schizolobium amazonicum</i>	PA, MA	80.177	Compensados, papel, móveis, molduras
Teca	<i>Tectona grandis</i>	MT, AM, AC	58.813	Construção civil, pisos e decks, móveis e decoração
Pinheiro do Paraná	<i>Araucaria angustifolia</i>	PR, SC	12.525	Madeira serrada, acabamentos, madeira estrutural, lápis, carretel
Populus	<i>Populus</i> ssp.	PR, SC	4.022	Palitos de fósforos, partes de móveis, portas, madeira para interiores
Outros	-	-	1867	-
Total			456.689	-

Fonte: ITTO (2009)

As exportações brasileiras de produtos de florestas plantadas atingiram praticamente o montante de USD 8,0 bilhões (3,1% do total das exportações), um crescimento de 5,3% em relação a 2010. Os principais importadores dos produtos florestais brasileiros em 2011 foram: Argentina (papel), Alemanha (compensados), China (celulose) e os Estados Unidos lideraram a importação de carvão vegetal, painéis e celulose. A Tabela 2 apresenta a evolução do valor monetário das exportações dos principais produtos do setor brasileiro de florestas plantadas, no período 2009 a 2011.

Tabela 2: Evolução das exportações brasileiras de produtos de florestas plantadas, 2009-2011

Item	Exportação por Ano (Milhões USD)		
	2009	2010	2011
Celulose	3.315	4.762	5.002
Papel	1.686	2.009	2.188
Madeira Serrada ¹	171	188	199
Painéis de madeira ²	85	82	95
Compensados ³	279	360	325
Carvão vegetal	2	1	1
Outros ⁴	116	169	162
Total	5.654	7.571	7.971

Fonte: Adaptado de ABRAF (2012); SECEX (2011)

¹ Somente Coníferas e não Coníferas de SP, SC, PR e RS.

² Painéis de Madeira Industrializada, segundo SECEX, incluem: MDP, MDF, Chapa Dura, OSB e outros (waferboard).

³ Inclui apenas coníferas.

⁴ "Outros" incluem: molduras, blocks & blanks e EGP.

O Laboratório de Madeiras (LaMEM) vem ao longo dos anos contribuindo para o desenvolvimento de pesquisas aplicadas a madeiras de florestas plantadas. Como exemplo devemos citar o trabalho realizado junto a Secretaria de Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento Econômico do Estado de São Paulo entre os anos de 1988 e 1990 realizando a caracterização físico-mecânica de 16 espécies de madeira do gênero *Eucalyptus* (Tabela 3), onde NOGUEIRA (1991) apresentou os resultados da caracterização em seu trabalho de mestrado. Também no mesmo sentido foi realizada por BORTOLETO JÚNIOR (1993) a caracterização de 6 espécies da madeira de *Pinus* (Tabela 3). Estes dois trabalhos contribuíram muito para evolução de utilização de madeiras de florestas plantadas no Brasil, pois seus resultados foram inseridos na norma ABNT NBR 7190:1997 – Projeto de Estruturas de Madeira, onde se pode conferi-los no ANEXO 2 Tabelas E.2 e E3.

Tabela 3: Algumas contribuições do LaMEM para caracterização de espécies de florestas plantadas

CONÍFERAS			
Nome comum	Nome científico	Nome comum	Nome científico
<i>Pinus caribea</i>	<i>Pinus caribea</i> var. <i>caribea</i>	<i>Pinus elliottii</i>	<i>Pinus elliottii</i> var. <i>elliottii</i>
<i>Pinus bahamensis</i>	<i>Pinus caribea</i> var. <i>bahamensis</i>	<i>Pinus oocarpa</i>	<i>Pinus oocarpa</i> shiede
<i>Pinus hondurensis</i>	<i>Pinus caribea</i> var. <i>hondurensis</i>	<i>Pinus taeda</i>	<i>Pinus taeda</i> L.
FOLHOSAS			
Nome comum	Nome científico	Nome comum	Nome científico
<i>E. Maidene</i>	<i>Eucalyptus maidene</i>	<i>E. Maculata</i>	<i>Eucalyptus maculata</i>
<i>E. Propinqua</i>	<i>Eucalyptus propinqua</i>	<i>E. Microcorys</i>	<i>Eucalyptus microcorys</i>
<i>E. Punctata</i>	<i>Eucalyptus punctata</i>	<i>E. Paniculata</i>	<i>Eucalyptus paniculata</i>
<i>E. Saligna</i>	<i>Eucalyptus saligna</i>	<i>E. Tereticornis</i>	<i>Eucalyptus tereticornis</i>
<i>E. Triantha</i>	<i>Eucalyptus triantha</i>	<i>E. Umbra</i>	<i>Eucalyptus umbra</i>
<i>E. Alba</i>	<i>Eucalyptus alba</i>	<i>E. Cloeziana</i>	<i>Eucalyptus cloeziana</i>
<i>E. Camaldulensis</i>	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	<i>E. Urophylla</i>	<i>Eucalyptus urophylla</i>
<i>E. Citriodora</i>	<i>Eucalyptus citriodora</i>	<i>E. Grandis</i>	<i>Eucalyptus grandis</i>

Fonte: Adaptado de Bortoleto Júnior (1993); Nogueira (1991)

2.1.2 *Pinus* sp.

Muitas variedades de *Pinus* originárias de diversos países do mundo foram introduzidas no Brasil por muitos anos com o propósito de obtenção de matéria prima para as mais variadas finalidades do setor industrial madeiro.

Por volta de 1936, foram iniciados os primeiros ensaios de introdução de *Pinus* para fins silviculturais, com espécies européias. No entanto, não houve sucesso, em decorrência da má adaptação ao nosso clima. Somente em 1948, através do Serviço Florestal do Estado de São Paulo, foram introduzidas, para ensaios, as espécies americanas conhecidas nas origens como "pinheiros amarelos" que incluem *P. palustris*, *P. echinata*, *P. elliottii* e *P. taeda*. Dentre essas, as duas últimas se destacaram pela facilidade nos tratos culturais, rápido crescimento e reprodução intensa no sul e sudeste do Brasil. Desde então, um grande número de espécies continuou sendo introduzido e estabelecido em experimentos no campo por agências do

governo e empresas privadas, visando o estabelecimento de plantios comerciais (SHIMIZU, 2006).

Enquanto a madeira de *Pinus* é muito utilizada na Europa, Canadá e Estados Unidos para construção desde casas até de grandes estruturas, devido ao vasto conhecimento e tecnologia empregada. A falta de tecnologia apropriada ao processo construtivo, a ausência de domínio das técnicas, dos métodos e dos processos da tecnologia da madeira tem gerado o uso inadequado da madeira na construção civil brasileira. Assim tendenciando ao consumidor final um olhar ruim sobre um material de enorme potencial. O preconceito do brasileiro contra a habitação de madeira é de origem cultural. Cabe a quem projeta (arquitetos) e a quem executa (os engenheiros) a conhecer as vantagens de se utilizar a madeira de *Pinus*, como por exemplo; a alta resistência mecânica em relação ao seu peso, facilidade de usinagem (furar, cortar), de transporte, e de manuseio em obra, unirem isso tudo a questão ecológica e informar seus clientes.

O apelo que as empresas e instituições fazem a favor da utilização da madeira por ser um material de origem renovável e, portanto sustentável e ecologicamente correto é importante, mas não convence os potenciais consumidores se a qualidade do produto e seu custo não forem atrativos.

Segundo Shimizu (2006), dentre os *Pinus* tropicais mais plantados no mundo está o *Pinus hondurensis*. O *Pinus oocarpa* está entre os *Pinus* tropicais mais difundidos pelos trópicos, sendo originário do México e América Central, com distribuição natural mais extensa no sentido noroeste-sudeste entre os *Pinus* da região. O seu habitat natural varia desde clima temperado-seco, até subtropical úmido. O melhor desempenho desta espécie é obtido no planalto, especialmente no cerrado, dada a sua tolerância à seca. A sua madeira é moderadamente dura e resistente, de alta qualidade para produção de peças serradas para construções e confecção de chapas. Além de madeira, o *P. oocarpa* também produz resina em quantidade viável para extração comercial.

A área plantada com *Pinus* no Brasil está concentrada principalmente na região sul do país (83,0%) devido às condições edafoclimáticas e à localização dos principais centros processadores desse tipo de madeira, seguido do sudeste (14,3%), centro oeste (1,4%) e por fim o nordeste com 1,3%. A utilização de *Pinus* na indústria madeireira brasileira tem sido crescente. No ano de 2011 a produção industrial brasileira de madeira serrada de *Pinus* foi de 9,1 milhões de m³, sendo 89% consumido pelo mercado interno. Dessa forma, considerando o abalo econômico que afetou o mercado externo nos últimos anos, as perdas sentidas principalmente no ano de 2009 foram recuperadas em 2010 e 2011, em virtude da demanda

do mercado interno, estimulada pelo expressivo crescimento da indústria da construção civil, do mercado de embalagens e pelo impacto da política fiscal expansionista com a redução do IPI (ABRAF, 2012).

O alto consumo deve-se principalmente ao fato das empresas do setor madeireiro terem se aprimorado no reprocessamento da madeira serrada, transformando-a em produtos de maior valor agregado (PMVA), como por exemplo, portas e molduras de madeira (ABIMCI, 2008).

Apesar da facilidade e rapidez de usinagem, excelente penetração e interação com adesivos e também grande retenção de tratamento preservante, a madeira de *Pinus* no Brasil é pouco utilizada para finalidades nobres por problemas de conhecimento, utilização e cultura.

A floresta de *Pinus* é diferenciada pelo seu “uso variado” porque, após o corte, sua madeira pode ser destinada à indústria laminadora, que a utiliza para fabricação de compensados; para a indústria de serrados, que a transforma em madeira beneficiada ou é convertida em móveis; para a indústria de papel e celulose; para a indústria chapas de fibras de média densidade (MDF); para fins de construção civil como telhados; para indústria de MLC, que utiliza para fins estruturais e, mesmo o seu resíduo, tem sido aproveitado como biomassa para geração de vapor e energia (CARGNIN, 2005).

Desta maneira, qualquer crescimento da produção à base de madeira será baseado principalmente no aperfeiçoamento dos processos de industrialização da madeira, com crescentes níveis de tecnologia, produtividade, qualidade de produto e agregação de valor. A produção de madeira serrada e seu beneficiamento é um setor que apresenta as maiores possibilidades de agregar valor aos produtos, especialmente aqueles destinados ao mercado de exportação. Entre estes, destacam-se os “blocks & blanks”, que são blocos de madeira de pequenas dimensões e sem defeitos (tais como nós e imperfeições visuais). Os “blocks” podem ser emendados nos topos por meio de finger joint, formando peças mais longas, conhecidas como “blanks” (NAHUZ, 2004).

A correta utilização da madeira do gênero de *Pinus* como alternativa às madeiras tropicais utilizadas na construção civil pode ser a solução desde que sejam seguidas as recomendações de acordo com cada uso específico. Por exemplo, para elementos estruturais é imprescindível a classificação visual e mecânica da madeira, pois os defeitos influenciam nas propriedades mecânicas, possibilitando selecionar a madeira em classes de qualidade. Quando exposta ao tempo é necessário tratar a madeira de *Pinus* quimicamente.

2.1.3 Tratamento preservante na madeira de *Pinus*

Com relação à utilização da madeira, uma das características que mais causa preocupação em sua aplicabilidade é o tempo de vida útil do material em serviço.

Segundo o novo texto da ABNT NBR 7190 aprovado no ano 2013, preservação de madeiras é o conjunto de medidas preventivas e curativas adotadas para controle de agentes biológicos (fungos, insetos xilófagos e perfuradores marinhos), físicos e químicos que afetam as propriedades da madeira, adotadas no desenvolvimento e na manutenção dos componentes de madeira no ambiente construído.

Cassens et. al. (1995) afirmam que dependendo da demanda de aplicação, nem sempre madeiras com propriedades físicas e mecânicas desejadas aliadas a alta durabilidade natural estarão disponíveis, pois existem espécies onde esta última propriedade é restrita, havendo a necessidade de tratá-las. Para isso as espécies destinadas à preservação devem possuir permeabilidade suficiente para permitir a penetração e retenção da substância preservante.

No Brasil existem aproximadamente 300 usinas de preservação de madeira, distribuídas predominantemente nas regiões sudeste e sul, onde se concentram as maiores áreas reflorestadas do país. Tais indústrias possuem uma capacidade instalada para produção de 2,0 milhões de m³, embora a produção do setor corresponda a 1,5 milhões de m³. Dessa forma, cerca de 25% da capacidade instalada está ociosa. O mercado consumidor nacional de madeira tratada pode ser dividido em segmento rural, elétrico, ferroviário e construção civil. O consumo desses segmentos representa um faturamento de 750 milhões de reais por ano. Os principais produtos do segmento são mourões, cruzetas e postes roliços, onde a madeira de *Eucalyptus* é utilizada em grande volume. A madeira de *Pinus*, por sua vez, tem ocupado um espaço cada vez maior na produção de madeira tratada para o mercado (ABRAF, 2012).

A Tabela 4 apresenta as características de durabilidade natural e permeabilidade de algumas espécies de reflorestamento.

Tabela 4: Durabilidade natural e permeabilidade de algumas espécies de reflorestamento

Espécies da madeira de reflorestamento	Resistência/Durabilidade natural*		
	Fungos	Termitas (cupins)	Permeabilidade
<i>Eucalyptus Camaldulensis</i>	2-3	3	3
<i>Eucalyptus Citriodora</i>	2	2	3
<i>Eucalyptus Cloeziana</i>	1	1	3
<i>Eucalyptus Grandis</i>	4	3	3
<i>Eucalyptus Maculata</i>	3	2	3
<i>Eucalyptus Paniculata</i>	2	2	3
<i>Eucalyptus Saligna</i>	4	3	3
<i>Eucalyptus Tereticornis</i>	2-3	4	3
<i>Eucalyptus Urophylla</i>	4	3	3
<i>Pinus caribea</i>	5	3	1
<i>Pinus elliottii</i>	5	4	1
<i>Pinus oocarpa</i>	5	3	1
<i>Pinus taeda</i>	5	4	1

Fonte: Adaptado de Fagundes (2003)

*Resistência a fungos: 1 – muito durável; 2- durável a muito durável; 3 – durável; 4 – medianamente durável; 5 – pouco durável; Resistência a térmitas (cerne): 1 – muito resistente; 2 – resistente; 3 – medianamente resistente; 4 – não resistente; Permeabilidade: 1 – impregnáveis; 2 – medianamente impregnáveis; 3 – pouco impregnáveis.

A grande aplicação e uso da madeira de *Pinus* muitas vezes são limitados pela sua baixa resistência mecânica, devido principalmente a defeitos e susceptibilidade ao ataque de fungos e insetos. Devido à grande diversidade de organismos xilófagos em nosso país, a madeira de *Pinus* deve ser tratada e preservada para que tenha um melhor desempenho durante sua vida útil.

A preservação da madeira de *Pinus*, da forma como ela é praticada hoje, consiste da impregnação da madeira com substâncias tóxicas aos organismos xilófagos (fungos e insetos), a fim de que estes não possam mais utilizar a madeira como alimento para sua sobrevivência e multiplicação. Com essa prática pode-se garantir que a madeira de *Pinus* possa ser utilizada no mínimo por 15 anos sem ataques destes organismos.

A maneira mais eficiente de fazer a impregnação destas substâncias preservantes é sob pressão, por meio de autoclave, onde se aplica o produto no interior da parede celular. Este método é conhecido como método da célula cheia.

A primeira usina para preservação de madeira sob pressão chegou ao Brasil em 1900, importada da Inglaterra e instalada pelo governo brasileiro em Juiz de Fora, Minas Gerais. Em 1902 já operava tratando dormentes para estrada de ferro usando creosoto como preservante (MORAES, 1996). Atualmente está proibida a utilização do creosoto para o tratamento de

madeira, pois é um preservante oleoso proveniente da destilação do alcatrão de hulha, altamente tóxico.

O creosoto pode conter mais de 85% de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs), onde benzopireno contido no creosoto é cancerígeno. Por esta razão novas regras para a utilização de creosoto com teor estritamente limitado de benzopireno (máximo 50 ppm) foram postas em vigor. Em primeiro lugar, este regulamento foi cumprido com a norma WEI tipo B. Este creosoto contém componentes menos pesados, mas muitas frações leves, que não fixam devidamente na madeira. Devido a este inconveniente, a norma WEI tipo C foi então desenvolvida. Este creosoto é consideravelmente menos fétido (mal cheiroso) e tem uma taxa de evaporação inferior devido a uma proporção significativamente reduzida de componentes voláteis (RÖTHLISBERGER, 2013).

Os preservantes mais utilizados atualmente são o CCA (arsenato de cobre cromatado) e o CCB (borato de cobre cromatado), ambos preservantes hidrossolúveis.

De acordo com Barillari (2002), a Tabela 5 mostra em linhas gerais, os resultados obtidos por diversos autores na avaliação da durabilidade de várias espécies de madeiras, com e sem tratamento preservante, em campos de apodrecimento.

Tabela 5: Durabilidade de madeiras de *Pinus* em função da espécie e do tipo de tratamento

Espécie	Tratamento	Durabilidade	Referência
<i>Pinus elliottii</i>	Sem tratamento	8 meses	Lopes, 1984
<i>Pinus spp.</i>	Sem tratamento	< 1 ano	Fernandes et al., 1990
<i>Pinus silvestris</i>	Sem tratamento	3-5 anos	Reis, 1965
<i>Pinus spp.</i>	Hidrossolúveis (c/ pressão)	12-16 anos	Jankowsky et al., 1989
<i>Pinus silvestris</i>	CCA	+ de 15 anos	Hedley et al., 2000
<i>Pinus radiata</i>	CCA	19- 43 anos	Hedley et al., 2000
<i>Pinus radiata</i>	CCB	20 anos	Hedley et al., 2000
<i>Pinus silvestris</i>	Creosoto	+ de 15 anos	Reis, 1965
<i>Pinus silvestris</i>	Pentaclorofenol	3- 5 anos	Reis, 1965

Fonte: Barillari (2002)

A durabilidade da madeira de *Pinus* sem tratamento é muito inferior em relação à durabilidade de madeira tratada. Porém, quando tratada com preservantes hidrossolúveis, a madeira de *Pinus* ultrapassa mais de 15 anos, passando a ser considerada durável.

Utilizando a madeira como material de engenharia, o novo texto da ABNT NBR 7190 propõe a aplicação de Categorias de Uso. O propósito do Sistema de Categorias de Uso é

oferecer uma ferramenta simplificada para a tomada de decisão quanto ao uso racional e inteligente da madeira, por meio de uma abordagem sistêmica ao produtor e usuário, que garanta maior durabilidade na aplicação do material. O sistema consiste no estabelecimento de seis categorias (de 1 a 6) baseadas nas condições de exposição ou uso da madeira, na expectativa de desempenho do componente e nos possíveis agentes biodeterioradores presentes. O dormente está classificado na categoria 5, que consiste na condição de contato com o solo e água doce onde os organismos xilófagos presentes são: cupim de madeira seca, broca de madeira, cupim subterrâneo, fungo embolorador/ manchador e fungo apodrecedor (PROJETO...,2010).

2.2 Ferrovias

O mundo dispõe de diversos meios de transporte. Os mais utilizados são o rodoviário, o ferroviário, o aéreo, o fluvial e o marítimo. A viabilidade de utilização dessas diversas modalidades depende das características e exigências do material a ser transportado, distância de transportes e outros fatores (PORTO, 2004).

No Brasil, a primeira ferrovia foi inaugurada em abril de 1854. Estrada de Ferro Mauá, que ligava o Rio de Janeiro ao pé da serra de Petrópolis, com 14,5 km de extensão foi construída pelo Barão de Mauá (CORREA, 2008). O primeiro trem que circulou nesta estrada era composto de três carros de passageiros e um carro de bagagem. A locomotiva que rebocou este trem recebeu o nome de “A Baronesa”, em homenagem à mulher do Barão.

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, apresentando uma enorme extensão territorial como é o caso do Brasil.

Outra demanda importante é o transporte de passageiros nos centros urbanos. Segundo o Censo 2010 do IBGE, aproximadamente 84,3% da população nacional vive nas cidades. Contudo, o deslocamento destas pessoas é feito, principalmente, por modal rodoviário, causando grandes congestionamentos e, conseqüentemente, perdas de tempo desnecessárias. Enfatizando a importância de transporte ferroviário nestes locais.

Tendo a ferrovia uma natureza tecnológica que se caracteriza por um baixo atrito, resultante da rodagem de aço sobre aço, ela fornece a possibilidade de se formarem comboios

extensos, rebocados por uma única unidade motora, possibilitando grande economia de energia. Proporcionando com isso um menor custo por tonelada em relação ao transporte rodoviário.

Segundo a Agência Central de Inteligência dos Estados Unidos, CIA (2013) as 17 maiores malhas ferroviárias no mundo estão apresentadas na Tabela 6:

Tabela 6: Diversas malhas ferroviárias do mundo classificadas pela densidade

Ranking	País	Extensão da Malha Ferroviária (km)	Extensão territorial (km ²)	Data da informação	Densidade da malha ferroviária (km/1000km ²)
1	Alemanha	41.981	348.672	2008	120,4
2	Japão	27.182	364.485	2009	74,6
3	Itália	20.255	294.140	2008	68,9
4	Inglaterra	16.454	241.930	2008	68,0
5	Polônia	19.428	304.255	2007	63,9
6	França	29.640	640.427	2008	46,3
7	Ucrânia	21.684	579.330	2009	37,4
8	Estados Unidos	224.792	9.161.966	2007	24,5
9	Índia	63.974	2.973.193	2009	21,5
10	África do Sul	20.192	1.214.470	2008	16,6
11	Argentina	36.966	2.736.690	2008	13,5
12	China	86.000	9.569.901	2008	9,0
13	México	17.166	1.943.945	2008	8,8
14	Rússia	87.157	16.377.742	2006	5,3
15	Canadá	46.552	9.093.507	2008	5,1
16	Austrália	38.445	7.741.220	2008	5,0
17	Brasil	28.538	8.459.417	2008	3,4

Fonte: Adaptado CIA Factbook (2013)

Entre os 17 países com mais ferrovias no mundo, o Brasil ocupa a última colocação ao classificá-los por densidade da malha ferroviária (km de ferrovias/1000km² de terras). Em km de ferrovias, dentre os países que fazem parte do BRICS (Brasil, Rússia, Índia, China e África do sul) nosso país só fica a frente da África do Sul com 40% a mais de ferrovias, porém sendo praticamente 7 vezes maior em área. A Rússia tem 3 vezes mais km de ferrovias e o dobro de área, o Canadá tem 60% mais de estradas de ferro e praticamente a mesma área. Já a Índia

Tabela 7: Relação das principais empresas ferroviárias S.A., ferrovias urbanas e companhias de trens urbanos do Brasil (Continuação)

Estrada de Ferro Jari - EFJ	Companhia do Metropolitano do Rio de Janeiro - METRÔ-RJ
Estrada de Ferro do Amapá - EFA	
Estrada de Ferro Paraná Oeste S.A - FERROPAR	
Ferrovia Centro-Atlântica S.A. - FCA	Companhia Brasileira de Trens Urbanos
Ferrovia Bandeirantes S.A - FERROBAN	Companhia Brasileira de Trens Urbanos - CBTU
Ferrovia Norte Brasil - FERRONORTE S.A.	Sistema Belo Horizonte
Ferrovia Norte-Sul	Sistema João Pessoa
Ferrovia Novoeste S.A.	Sistema Maceió
Ferrovia Tereza Cristina S.A.- FTC	Sistema Natal
MRS - Logística S.A.	Sistema Recife
Rede Ferroviária Federal S.A. - RFFSA	Sistema Salvador

Fonte: ANTT (2011)

Pode-se dizer que a linha férrea é constituída de duas partes. A infraestrutura, que é constituída pela terraplanagem e todas as obras situadas abaixo do greide de terraplanagem (linhas de declividade uniforme que tem como finalidade substituir as irregularidades naturais do terreno) e a superestrutura, que são elementos que estão acima da infraestrutura, constituindo o apoio e ao mesmo tempo a superfície de rolamento para os veículos ferroviários (BRINA 1979).

2.2.1 Infraestrutura

Segundo Sucena (2007), a infraestrutura é uma sucessão de 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. A Figura 6 apresenta o esquema referente à obra de infraestrutura em aterro.

Figura 6: Esquema de obra de infraestrutura em aterro
Fonte: Adaptado de Porto (2004)

2.2.2 Superestrutura

Segundo Porto (2004), a superestrutura das estradas de ferro é constituída pela via permanente e tem a função de suportar os esforços dos veículos e transmiti-los à infraestrutura. Os elementos da via permanente (Figuras 7 e 8) são divididos em:

- Trilhos;
- Placas de apoio;
- Talas de junção;
- Fixações;
- Lastro;
- Sublastro;
- Aparelho de mudança de via;
- Dormente.

Figura 7: Desenho esquemático de uma estrutura ferroviária
Fonte: Porto (2004)

Figura 8: (a) Exemplo do aparelho de mudança de via; (b) Funcionamento de um AMV
 Fonte: (a) Hewitt equipamentos Ltda (2011); (b) Porto (2004)

2.2.2.1 Trilhos

São elementos da via permanente que guiam o veículo no trajeto e dão sustentação ao mesmo. Funcionam como viga contínua e transferem as solicitações das rodas para os dormentes, como mostra a Figura 9.

Figura 9: Contato roda trilho e dormente
 Fonte: Sucena (2007)

Segundo Brina (1979), o perfil de trilho mais utilizado é o perfil Vignole como indicado na Figura 10. O aço utilizado em sua fabricação possui ferro, carbono, manganês, silício, fósforo e enxofre. Sendo o ferro responsável por 98% da composição, os outros 2% são distribuídos no aço de acordo com as características físicas desejadas.

Figura 10: Trilho de perfil Vignole
Fonte: Brasil trilhos (2011)

Os trilhos são classificados pelo peso que apresentam por metro linear como mostra a Figura 11.

Tipos de Trilhos		Dimensões (mm)				Módulo resist. (cm³)		
TR	Kg/m	A	B	C	D	Boleto	Patim	
25	24,6	98,4	98,4	54,0	11,1	81,6	86,7	
32	32,0	112,7	112,7	61,1	12,7	120,8	129,5	
37	37,1	122,2	122,2	62,7	13,5	149,1	162,9	Via principal
45	44,6	142,9	130,2	65,1	14,3	205,6	149,7	Via secundária
50	50,3	152,4	136,5	68,2	14,3	247,4	291,7	Via principal
57	56,9	168,3	139,7	69,0	15,9	294,8	360,7	Via secundária
68	67,6	185,7	152,4	74,6	17,5	391,6	463,8	Carga

Figura 11: Tipos de trilhos e suas características
Fonte: Sucena (2007)

2.2.2.1.1 Bitola

Bitola é a distância entre os trilhos, medida entre os boletos, como mostra a Figura 12. Padronizou-se no mundo bitolas de 1,0 m chamada de bitola métrica, 1,435 m chamada de bitola normal e 1,6 m conhecida como bitola larga. A tolerância no tamanho da bitola varia em função do país, da organização ferroviária e da velocidade da via (PORTO, 2004).

Figura 12: Representação da distância entre os trilhos, denominada bitola

Segundo Brina (1979) a bitola da via é uma característica fundamental, tanto do traçado, como da exploração econômica da ferrovia. Só um profundo estudo técnico e econômico permitirá, em cada caso específico, uma escolha conveniente.

a) Vantagens e desvantagens da Bitola Métrica:

a.1) Vantagens

- curvas de menor raio;
- menor largura de plataforma, terraplenos e obras de arte;
- economia de lastro, dormentes e trilhos;
- menor resistência a tração;
- economia nas obras de arte;
- material rodante mais barato.

a.2) Desvantagens

- menor capacidade de tráfego;
- menor velocidade;
- necessidade de baldeação nos entroncamentos com outras bitolas.

Estas vantagens e desvantagens têm, entretanto, caráter relativo quanto à capacidade de tráfego. A capacidade de transporte (maiores tonelagens por trem), mesmo na bitola larga, fica limitada pela capacidade dos vagões e principalmente, dos trilhos. Existe uma carga máxima, por roda, definida em função do seu diâmetro, a qual o trilho é capaz de suportar, para que a tensão no contato roda- trilho, não ultrapasse o valor compatível com a resistência do trilho.

2.2.2.1.2 Zona de fixação do trilho

Também chamada de zona de pregação e zona de furação, é o segmento da face superior do dormente reservada à fixação das fiadas de trilhos.

Nos dormentes utilizados em ferrovias de bitola larga é a região que se estende em 50 cm a partir de 60 cm do meio (centro) do dormente (COLENCI, 2002), como indica a Figura 13:

Figura 13: Esquema do local onde é feita a fixação dos trilhos no dormente
Fonte: Colenci (2002)

A Figura 14 apresenta a área de pregação em dormentes de bitola estreita.

Figura 14: Visão em perspectiva das dimensões de dormentes de bitola estreita
Fonte: ALL (2008)

2.2.2.2 Placas de apoio

Brina (1979) comenta que placas de apoio são chapas de aço com furos necessários para a passagem dos elementos de fixação, introduzida entre o trilho e o dormente para aumentar a área de apoio entre eles.

Os furos não são alinhados, como mostra a Figura 15, para não determinarem o aparecimento de rachaduras nos dormentes de madeira.

Figura 15: Placa de apoio: vista frontal, superior e lateral
Fonte: Brina (1979)

A placa de apoio prolonga a vida útil do dormente, evitando a tendência do patim do trilho de cortar o dormente, pela ação das bordas dos patins.

A placa possui nervuras que encosta no patim de modo que todo o esforço transversal existente na via seja transmitido ao dormente pela pregação.

As dimensões das placas de apoio variam com as dimensões dos trilhos. São designadas pelas letras PA, seguidas do número que caracteriza o peso por metro do trilho correspondente. (Ex.: Um trilho do tipo TR 37 utiliza placas de apoio do tipo PA 37).

2.2.2.3 Fixações

As fixações são elementos que têm como função manter o trilho na posição correta e garantir a bitola da via. Oferecem resistência ao deslocamento longitudinal e horizontal do trilho, provocado por variação de temperatura ou frenagem dos veículos. As fixações devem permitir a substituição dos trilhos sem afrouxar seus embutimentos no dormente de madeira.

Estas fixações podem ser rígidas ou elásticas. As fixações rígidas conforme indicado na Figura 16 soltam com o tempo devido à vibração, perdendo a capacidade de resistir a esforços longitudinais. São elementos de fixação usuais em ferrovias pregos e tirefões, chamados de tirefão (PORTO, 2004).

Figura 16: Esquema de fixação rígida e exemplo de tirefão

No entanto as fixações elásticas, assim demonstradas na Figura 17, mantêm pressão constante sobre o trilho, não afrouxando-se com o tráfego.

Figura 17: Esquema de fixação elástica

2.2.2.4 Lastro

O lastro é uma base constituída de pequenas partículas cúbicas de granulometria uniforme, (geralmente pedra britada de quartzito, basalto ou granito) suas faces fraturadas proporcionam maior ângulo de atrito e maior resistência entre as partículas. A Figura 18 ilustra a utilização do lastro.

Figura 18: Lastro em loco

Segundo Brina (1979) as principais funções do lastro são:

- Distribuir esforços resultantes das cargas dos veículos, nos dormentes;
- Facilitar a drenagem da superestrutura;
- Impedir o deslocamento dos dormentes no sentido longitudinal e transversal;

Suas qualidades são:

- Permitir reconstituição de nivelamento (através de equipamentos de manutenção);
- Resistentes aos agentes atmosféricos;
- Possui elasticidade limitada, para abrandar os choques.

2.2.2.5 Sublastro

Segundo Brina (1979) o sublastro é o elemento da superestrutura intimamente ligado a infraestrutura e tem como função:

- Aumentar a capacidade de suporte da plataforma;
- Permitir relativa elasticidade ao apoio do lastro, para que a via permanente não seja rígida;
- Aumentar a resistência do leito à erosão e à penetração de água;
- A espessura do sublastro deverá ser tal que a distribuição de pressões através do mesmo acarrete, na sua base (plataforma), uma taxa de trabalho compatível com a capacidade de suporte da mesma.

Porto (2004) comenta que o sublastro evita o fenômeno do bombeamento de finos do subleito e diminui a altura necessária do lastro, uma vez que seu custo é menor. O bombeamento de finos é um processo auto-alimentado o qual ocorre na presença de solo fino, água e supersolicitação. Consiste no enrijecimento do lastro e, posterior, ruptura devido à secagem de lama proveniente do subleito bombeada pelo tráfego assim descrito na Figura 19.

Figura 19: Esquema do sublastro em perfil
Fonte: Porto (2004)

O sublastro é uma camada situada entre o lastro e o subleito, com função de filtro, impedindo a subida da lama.

2.3 Dormentes

Segundo Brina (1979) dormente é o elemento da superestrutura ferroviária instalado transversalmente aos trilhos, como mostra a Figura 20, que tem por função receber e transmitir ao lastro os esforços produzidos pelas cargas dos veículos. Os dormentes amortecem parcialmente as vibrações, proporcionam o suporte dos trilhos, permitindo a sua fixação e mantendo invariável a distância entre eles (bitola).

Figura 20: Vista geral de um trecho de via, com destaque para os dormentes

Os primeiros dormentes para o leito dos trilhos foram feitos de blocos de pedra, em 1820 nos EUA. Devido a problemas de rigidez e incapacidade de segurar a bitola, esses dormentes foram logo abandonados. Na mesma época, uma linha de Boston experimentou o uso de dormentes de madeira. Foi um sucesso e logo foi copiado pelas demais ferrovias. Os primeiros dormentes eram de carvalho, pinho, cedro, castanheira, cipreste e de outras madeiras. A abundância dessa matéria-prima, localizada sempre próxima às ferrovias, não preocupou os empresários da época sobre a sua durabilidade. Com o passar dos anos, houve um aumento no consumo de madeira, levando à necessidade de se pensar em prolongar a vida útil (SILVA, 2003).

Segundo Brina (1979), para garantir o sucesso em sua utilização, os dormentes devem possuir determinadas características básicas:

- Dimensões (comprimento e largura) que forneçam uma superfície de apoio suficiente para que a taxa de trabalho do lastro não ultrapasse certo limite;
- Espessura que lhe dê a rigidez necessária, permitindo também elasticidade;
- Proporcionar adequado isolamento elétrico entre os trilhos;
- Resistência suficiente para receber esforços;
- Alta durabilidade;
- Permitir o melhor nivelamento possível para o lastro em sua base;
- Se opor com eficácia aos deslocamentos verticais e transversais da ferrovia;
- Permitir boa fixação dos trilhos, uma fixação firme, sem ser excessivamente rígida.

Atualmente os dormentes comercializados são fabricados com os seguintes materiais: concreto, aço, plástico e madeira.

2.3.1 Dormentes de concreto

Apesar dos primeiros dormentes de concreto serem produzidos no final do século XIX, até o início da década de 1940 as ferrovias utilizavam quase que exclusivamente os dormentes de madeira. A escassez da madeira de boa qualidade em muitos países, principalmente, após a segunda guerra mundial, levou a uma grande intensificação no emprego dos dormentes de concreto (JACOB, 1982).

Segundo a Companhia Brasileira de Dormentes, ao longo dos últimos 50 a 60 anos houve um grande desenvolvimento mundial na tecnologia de projeto e fabricação de dormentes de concreto. Neste período diversos tipos de dormentes de concreto foram testados, mas apenas dois deles se mostraram realmente adequados do ponto de vista técnico e econômico, representando atualmente quase a totalidade dos dormentes de concreto utilizados em todo o mundo. Cada um deles, por sua vez, apresenta características e vantagens particulares que os tornam mais ou menos indicados para uma determinada aplicação.

- Dormente bi-bloco de concreto armado

Os dormentes de concreto bi-bloco consistem basicamente de dois blocos de concreto armado interligados por um perfil produzido em aço patinável (apresenta em média três vezes mais resistência à corrosão que o aço comum) de elevada resistência à corrosão, o que garante o desempenho dos dormentes e a manutenção da bitola mesmo sob as condições mais severas de utilização e solicitação, sem comprometer a elasticidade da via. Os dormentes são mais leves e flexíveis, proporcionam um rolamento mais suave, maior resistência lateral e asseguram maior estabilidade à via, exigindo, desta forma, menores índices de manutenção. A Figura 21 mostra o dormente bi-bloco de concreto armado (DORBRÁS, 2011).

Figura 21: Dormente bi-bloco de concreto armado
Fonte: Dorbrás (2011)

- Dormente Monobloco de concreto protendido

Os dormentes de concreto monobloco consistem de uma viga monolítica de concreto protendido. Podem ser aplicados em vias de bitola mista, com três ou quatro fiadas de trilhos, nas regiões dos aparelhos de mudança de via (AMV's), possui grande massa, por isso é utilizado para aplicações envolvendo cargas por eixo muito elevadas. Permite produção em larga escala, tendem a ser mais econômicos que os dormentes bi-bloco em virtude do menor consumo de aço por dormente. A Figura 22 ilustra o dormente de concreto protendido.

Figura 22: Dormente monobloco de concreto protendido
Fonte: Dorbrás (2011)

A norma brasileira utilizada para dormentes de concreto é a ABNT NBR11709:2010 - Dormente de concreto - Projeto, materiais e componentes. Esta Norma especifica os requisitos para o projeto dos dormentes de concreto e os requisitos para os materiais e componentes utilizados na fabricação destes dormentes.

Segundo Howe (1998) dormentes de concreto têm a capacidade de fornecer um melhor alinhamento e característica de manter a bitola do que os dormentes de madeira, porém eles são relativamente mais caros, bastante pesados e frequentemente incapazes de proporcionar uma vida útil projetada de 50 anos.

Devido a sua alta dureza estrutural, uma alta carga é transferida para o dormente de concreto que poderá levar a uma maior deterioração devido a rachaduras pela flexão (GONZÁLEZ-NICIEZA, 2008).

2.3.2 Dormentes de aço

O dormente de aço começou a ser fabricado na Alemanha, em 1891 e era vendido para vários países. Com o início da segunda Guerra Mundial (1939 a 1945), praticamente todas as indústrias passaram a produzir canhões e outras armas, deixando de fabricar os dormentes.

Segundo Brina (1979) dentre os tipos de dormentes de aço já desenvolvidos, o que oferece melhores propriedades tem a seção em forma de U invertido, curvado nas extremidades conforme Figura 23. Este sistema facilita sua fixação e se opõe ao deslocamento transversal da via. De fácil assentamento, devido a esta leveza não é recomendado para linha de tráfego muito pesado. A maior vantagem é a durabilidade, entretanto, as grandes desvantagens são: maior rigidez e difícil fixação dos trilhos. Esta fixação está sujeita a se afrouxar, necessitando frequentemente de manutenção.

Figura 23: Dormente de aço com perfil em forma de “U”: vistas lateral, superior e seção transversal

Fonte: Brina (1979)

Segundo a fabricante brasileira Hidremec, seu dormente tem o peso de 85 kg.

O IRT, Institute of Railway Technology, da Universidade de Monash é o principal centro de pesquisas ferroviárias da Austrália, e goza de um reconhecimento internacional de excelência, prestando assistência técnica para mais de 90 empresas da indústria ferroviária Australiana e mundial. O IRT está trabalhando para minimizar os custos e garantir a performance superior de dormentes de aço (BHP INSTITUTE OF RAILWAY INDUSTRY - MONASH UNIVERSITY, 2013).

Atualmente os dormentes de aço representam mais de 13% dos dormentes usados na Austrália. Os dormentes de aço podem ser intercalados com a via existente, mas em um padrão, para reduzir a variação da geometria da via e prevenir a falha precoce de dormentes em serviço (RAILWAY TRACK AND STRUCTURES, 2008).

2.3.3 Dormentes de plástico

A empresa Polywood Plastic Lumber, de New Jersey/EUA, utiliza uma mistura na fabricação de dormentes composta por 35% de poliestireno (PS) e 65% de polietileno de alta densidade (PEAD), obtendo um material mais resistente que o PEAD e mais rígido que o PS. Além da Polywood, mais duas empresas estão investindo na fabricação de dormentes de plástico reciclado: TieTek e U.S. Plastic Lumber, ambas nos EUA. A produção das três empresas difere, mas todas partem do polietileno de alta densidade reciclado, misturado e não lavado, utilizam um sistema de extrusão e realizam uma moldagem sob pressão em moldes fechados, com a finalidade de evitar vazios no interior dos dormentes. A maioria dos processos utiliza maquinário pesado e são bastante lentos. Após o preenchimento dos moldes, eles são levados para uma banheira de resfriamento e, posteriormente, são desmoldados hidraulicamente e deixados ao ar livre para o resfriamento total (PARENTE; PINHEIRO, 2008).

No processo de produção a matriz polimérica pode ser reforçada com fibras (que podem ser de carbono, vidro ou aramida), o tipo de resina e de fibra utilizadas é que proporcionam as características de resistência química e mecânica desejadas.

O resultado deste processo todo é garantir uma textura semelhante à madeira, com a qual podem ser produzidos os dormentes que passam por uma máquina de raios-X que

verifica a uniformidade da peça, atestando ou não a sua qualidade. Em seguida os dormentes devem texturizados para garantir uma melhor aderência ao lastro.

O dormente de plástico possui o mesmo formato do dormente de madeira (Figuras 24a e 24b) e pode ser usado de modo conjunto na mesma linha.

Figura 24: (a) Dormentes de plástico ao longo da via permanente; (b) elementos de fixação dos dormentes de plástico
Fonte: Michel (2011)

Segundo Schamberg (2013), gerente de manutenção da via permanente da empresa America Latina Logística – ALL, os testes com dormentes de plástico em trechos críticos da via permanente estão apresentando problemas na fixação do tirefão e ruptura à flexão de modo frágil (informação verbal).¹

2.3.4 Dormentes em 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. Eles podem ser fixados em todos os tipos de trilhos da via férrea. Dormentes de madeira são trabalháveis, fáceis de manipular, fácil substituição e não precisa de equipamentos robustos para instalação. Deste modo, mesmo em terrenos de difícil acesso eles podem ser reparados ou substituídos sem a necessidade de suporte externo na forma de qualquer mão de obra ou equipamento. Isto é particularmente atrativo em linhas de

¹ Informação fornecida por Marcelo Schamberg em São Carlos, 2013.

alta velocidade ou de alta densidade, onde se tem um alto fluxo de trens e o tempo de manutenção é limitado e restrito (RÖTHLISBERGER, 2013; ZAREMBSKI, 1993).

A elasticidade do dormente de madeira 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, reduz os efeitos dinâmicos sobre a estrutura da base, minimiza o ruído e as vibrações (RÖTHLISBERGER, 2013).

Na América do Norte, a fatia de mercado aproximada de dormentes de madeira tradicional em 2008 foi de 91,5% em comparação com cerca de 8,5% para o concreto, aço e polímeros (RAILWAY TRACK AND STRUCTURES, 2008).

As ferrovias americanas substituem cerca de 15 milhões de dormentes de madeira por ano (LAMPO, 2002).

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

Na Alemanha, as indústrias ferroviárias possuem a necessidade de substituir 11 milhões de dormentes de madeira (WOIDASKY, 2008).

Segundo Schamberg (2013), no ano de 2012 a empresa ALL substituiu 480.000 dormentes na malha já 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 (informação verbal).²

Os dormentes de madeira apresentam vantagens sobre aqueles produzidos com aço e concreto, por ter altos valores de resistência específica, por necessitar de baixo consumo de energia na sua produção, pelo baixo preço e pela possibilidade de uso da matéria-prima renovável de forma sustentada e ambientalmente correta. Para cada quilo de dormente de madeira produzido, 1,44 quilos de CO₂ são removidos da atmosfera, um quilo de O₂ é liberado para a atmosfera e 18,5 MJ de poder calórico (correspondente a 0,4 l de óleo combustível) é acumulado a partir da energia solar. No entanto, devido a fatores como a suscetibilidade e a deterioração da madeira por bactérias, insetos e fungos, é necessário que os dormentes recebam tratamento químico preservante para garantir maior resistência ao material (ALVES; SINAY, 2005; LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN, 2013).

² Informação fornecida por Marcelo Schamberg em São Carlos, 2013.

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

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 ao longo de toda peça. A medula é uma região da madeira que possui baixa resistência mecânica, assim sua presença influi negativamente nas propriedades de módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR). Nestas condições umas das soluções para a utilização de *Pinus* para dormentes seriam a utilização de produtos engenheirados de madeira, como por exemplo, a MLC, o LVL e o Parallam devido às aplicações estruturais já conhecidas destes produtos.

2.3.5 Comparação entre tipos de dormentes

Os diversos tipos de dormentes possuem vantagens e desvantagens, como apresenta a Tabela 8.

Tabela 8: Vantagens e desvantagens dos tipos de dormentes

Madeira	
Vantagens:	
<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; 	<ul style="list-style-type: none"> • 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;
Desvantagens:	
<ul style="list-style-type: none"> • Dormentes AMV – difíceis de obter; • Vida útil; 	<ul style="list-style-type: none"> • Suscetíveis ao ataque de fungos e insetos quando não tratados; • Redução da oferta;
Aço	
Vantagens:	
<ul style="list-style-type: none"> • Fácil confecção de dormentes especiais; • Relativamente resistente a sobrecargas; 	<ul style="list-style-type: none"> • Insensível ao ataque de fungos; • Mantém efetivamente a bitola;
Desvantagens:	
<ul style="list-style-type: none"> • Massa reduzida – falta de inércia; • Tráfego ruidoso; • Gasto adicional com isolamento elétrico, com sapatas para absorção de impacto; 	<ul style="list-style-type: none"> • Custo elevado de aquisição, assentamento, manuseio e manutenção da via; • Gasto energético altíssimo para produção da matéria prima e confecção do dormente;
Concreto	
Vantagens:	
<ul style="list-style-type: none"> • Manutenção da bitola; • Facilmente isolados do trilho (baixa condução de eletricidade); 	<ul style="list-style-type: none"> • Vida útil do concreto é longa; • Dão a linha maior peso, favorável a resistência e estabilidade;
Desvantagens:	
<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) 	<ul style="list-style-type: none"> • Preço elevado; • Sujeitos a avarias por manipulação inadequada nas operações de carga, descarga e transporte; • Vulnerável a solicitações excepcionais;
Plástico	
Vantagens:	
<ul style="list-style-type: none"> • Vida útil estimada em mais 50 anos; • Eletricamente não condutivo; 	<ul style="list-style-type: none"> • Impermeável à água; • Reciclagem de plásticos;
Desvantagens:	
<ul style="list-style-type: none"> • Material feito a partir do petróleo (fonte não renovável) 	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnologia em desenvolvimento e consolidação no mercado ferroviário.

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

Vantagens como ser um material de fonte renovável e possuir baixo custo energético para sua produção fazem da madeira um material sustentável do ponto de vista ambiental.

Sua facilidade de manuseio e usinagem, elevada resistência às solicitações mecânicas e isolamento elétrico, são características que proporcionam a madeira viabilidade técnica para sua utilização como dormentes.

Muitas empresas de infraestrutura ferroviária tem a muito tempo experimentando o concreto e aço para substituição de dormentes de madeira nas ferrovias já existentes. Entretanto, esta estratégia de manutenção tem ganhado sucesso limitado. Estes materiais não demonstram ser uma alternativa viável para dormentes de madeira (MANALO et al., 2010).

A substituição de dormentes de madeira pelos dormentes de concreto e aço será difícil e custosa. Dormentes de concreto e aço possuem propriedades mecânicas incompatíveis com os dormentes de madeiras existentes (GONZÁLEZ-NICIEZA, 2008).

Levando em consideração a questão da energia para produção, e a poluição ambiental gerada, a produção do concreto e de aço emitem muito mais carbono na atmosfera.

Segundo o Australian Greenhouse Office (2006) o dióxido de carbono emitido para produção de concreto e de aço é 10 e 200 vezes maior, respectivamente, que para produção de madeira tropical.

2.4 Documentos Normativos

Neste item serão abordadas algumas recomendações normativas encontradas durante o desenvolvimento desta pesquisa.

2.4.1 AREMA - The American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association, AREMA/2009 - Manual for Railway Engineering

A norma norte americana AREMA/2009, já consolidada e com suas 1292 paginas, aborda diversos itens envolvendo os projetos desde a infraestrutura até superestrutura ferroviária. Além de especificar os ensaios necessários para avaliação das propriedades físicas e mecânicas de dormentes, a norma fornece orientações para seleção, projeto, aplicação e requisitos mínimos para dormentes e seus componentes (trilho, ligações, lastro, sublastro e subleito) considerando: a qualidade de cada componente, método de fabricação, instalação e

manutenção; a durabilidade e o modo de avaliação específico da degradação do material; a direção, magnitude e frequência de cargas de tráfego impostas; o efeito do clima e fatores ambientais, como temperatura e luz solar; a economia geral de instalação e manutenção, e a necessidade de apoiar e orientar veículos ferroviários, enquanto restringe repetidas forças laterais, verticais e longitudinais.

Suas especificações têm por referência as organizações como a American Society for Testing and Materials (ASTM), a American Concrete Institute (ACI), American Wood Preservers Association (AWPA), ou outras sociedades técnicas.

2.4.2 ABNT NBR 7190:1997 Projetos de Estruturas de Madeira (revista)

A norma de madeiras ABNT NBR 7190:1997 Projetos e Estruturas de Madeira foi revista e atualizada, sendo no ano de 2013 aprovada em consulta pública e até o momento está aguardando publicação. O novo texto normativo apresenta as condições gerais que devem ser seguidas no projeto e na execução das estruturas correntes de madeira, tais como pontes, pontilhões, coberturas, pisos e cimbres. Com base nas propriedades físicas e mecânicas da madeira e de seus produtos engenheirados derivados, fornece critérios para cálculo de elementos estruturais e ligações, recomendações no processo de produção de produtos engenheirados, classificação de peças estruturais, aplicações do material, suas classes de usos e a durabilidade da madeira. A norma fornece critérios para os chamados “defeitos existentes na madeira”, devido às características de crescimento da árvore (PROJETO...,2010).

Sendo o dormente um produto estrutural e de madeira, muitas das recomendações deste referida norma podem e devem ser a ele aplicadas de forma a utilizar a madeira na sua forma mais racional.

2.4.3 ABNT NBR 7511:2013 Dormentes de madeira – Requisitos e métodos de ensaio

Tendo em vista a necessidade de reformulação da norma brasileira de dormentes, ABNT NBR7511:2005 Dormentes de madeira, formou-se a CE-06:100.01 - Comissão de Estudo de Dormentes e Lastros.

Baseando-se na norma americana AREMA/2009, a CE-06:100.01 definiu as propriedades mecânicas de dormentes que deveriam ser analisadas e realizou os devidos ajustes para realidade brasileira. O autor deste presente trabalho foi um dos responsáveis pela tradução da norma AREMA/2009 para o idioma português.

Sendo assim a CE-06:100.01 definiu os seguintes ensaios mecânicos necessários que foram incorporados pela nova ABNT NBR 7511:2013 Dormentes de madeira – Requisitos e métodos de ensaio:

- Determinação da resistência (módulo de ruptura – MOR) e rigidez (módulo de elasticidade – MOE) do dormente à flexão;
- Determinação da resistência convencional do dormente à compressão normal às fibras através da placa de apoio;
- Determinação da resistência ao arrancamento do tirefão do sistema de fixação da placa de apoio do trilho;
- Determinação da capacidade do tirefão em manter a resistência ao movimento lateral. A carga deve ser aplicada na direção paralela às fibras da madeira.
- Determinação da resistência do dormente à penetração de um corpo no sentido normal às fibras da madeira.

De acordo com a ABNT NBR 7511:2013 Dormentes de madeira – Requisitos e métodos de ensaio os dormentes de madeira possuem dois tipos de formato. O dormente serrado, que tem seu formato prismático e o dormente de duas faces, sendo seu formato semirrolço.

O dormente serrado (prismático) deve ter a forma de um paralelepípedo regular com as faces serradas e as arestas vivas (Figura 25 a). O dormente de duas faces (semirrolço) deve ter duas faces horizontais serradas e duas faces laterais abauladas (Figura 25 b).

Figura 25: Ilustração dos dormentes (a) prismático em perspectiva; (b) semirrolado

Fonte: ABNT NBR7511 (2013)

Legenda: Ø diâmetro, a altura (cm), b largura (cm), L comprimento (cm).

O dormente serrado deve ter as dimensões nominais conforme a Tabela 9. Para bitola métrica com carga por eixo igual ou superior a 270kN (27 tf), deve ser usado dormente serrado de 24cm x 17cm x 230cm.

Tabela 9: Dimensões nominais e tolerâncias dos dormentes prismáticos de acordo com ABNT NBR 7511:2013 Dormentes de madeira – Requisitos e métodos de ensaio

Bitola m	Largura (b) cm		Altura (a) cm		Comprimento (L) cm	
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
Métrica (1,000)	22	24	16	18	190	205
	22	26	16	19	220	235
Normal (1,435)	22	26	16	19	260	270
Larga (1,600)	24	26	17	19	260	285

NOTAS: 1 - A medida não deve ser feita em região de esmoado.

2 - Para utilização das dimensões mínimas recomenda-se verificar as características da via permanente.

Fonte: ABNT NBR7511 (2013)

O dormente de duas faces (semi-rolado) deve ter as dimensões nominais mínimas conforme a Tabela 10.

Tabela 10: Dimensões nominais e tolerâncias dos dormentes semi-rolados de acordo com a ABNT NBR 7511:2013 Dormentes de madeira – Requisitos e métodos de ensaio

Bitola (m)	Diâmetro (Φ) cm	Altura (a) cm	Comprimento (L) cm
Métrica (1,000)	28	16+20	200+50
	30	17+20	230+50
Normal (1,435)	30	17+20	265+50
Larga (1,600)	30	17+20	280+50

Nota: Para dormente semi-rolados, devem ser verificados somente a altura e o comprimento.

Fonte: ABNT NBR7511 (2013)

Quanto aos defeitos esta norma afirma que não pode haver presença de casca e qualquer tipo de deterioração biológica (fungos apodrecedores e insetos). A presença de alburno, em qualquer quantidade, não descaracteriza a qualidade do dormente produzido. O dormente pode apresentar no máximo dois dos seguintes defeitos:

- a) Arqueamento (curvatura no plano horizontal), desde que regular e com flechas avaliadas no comprimento total do dormente inferior a 3cm (ver Figura 26);
- b) Encurvamento (curvatura no plano vertical), desde que com flechas avaliadas no comprimento total do dormente inferior a 2cm (ver Figura 27);
- c) Esmoadado (desquinado ou quina morta), somente em uma face do dormente, desde que asseguradas as dimensões mínimas indicadas na Tabela 11 (ver Figura 28);
- d) Saliência e/ou reentrância de até 2cm, desde que fora da zona de fixação;
- e) Nó são (nó vivo), desde que fora da zona de fixação das chapas;
- f) Nó vazado (nó morto ou cariado) ou furos de brocas, desde que com diâmetro inferior a 2,5cm, profundidade menor que 5cm e desde que fora da zona de fixação das chapas. A soma dos diâmetros médios não deve exceder 5cm;
- g) Rachadura (fenda fora do topo do dormente), desde que se localize fora da zona de fixação das chapas, com comprimento máximo de 15cm e abertura máxima de 2mm (ver Figuras 30 e Tabela 12);
- h) Fendilhamento (fenda no topo do dormente), com comprimento máximo de 15 cm e abertura máxima fora da zona de fixação de 3 mm (ver Figuras 29 e 30 e Tabela 12);

Figura 26: Arqueamento

Figura 27: Encurvamento

Legenda:
a altura
b base
d base reduzida
 devido ao esmoado
r altura reduzida
 devido ao esmoado

Figura 28: Esmoado

Dimensões aceitas de esmoado são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11: Dimensões de esmoado em centímetros

Dimensão nominal do dormente	Zona de fixação		Fora da zona de fixação	
	<i>d</i>	<i>r</i>	<i>d</i>	<i>r</i>
2,00 x 0,22 x 0,16	20	14	15	9
2,30 x 0,24 x 0,17	22	15	17	10
2,65 x 0,24 x 0,17	22	15	17	10
2,80 x 0,24 x 0,17	22	15	17	10

Legenda:
a altura
b largura
c comprimento da fenda
e abertura da fenda

Figura 29: Dormente serrado – Fendilhamento

Legenda:
 Ø diâmetro
a altura
e abertura da fenda
c comprimento da racha

Figura 30: Dormente de duas faces – Fendilhamento e rachadura

Dimensões aceitas de fenda e rachas são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12: Dimensões máximas de fendas e rachas

Dormente serrado (prismático)		Dormente de duas faces (não prismático)	
<i>c</i>	<i>e</i>	<i>e</i>	<i>c</i>
15 cm	2 mm	3 mm	15 cm

2.4.4 Documentos empresariais

As seguir apresenta-se alguns documentos criados por empresas do ramo ferroviário no Brasil com o objetivo de receberem dormentes com qualidade mínima para as solicitações mecânicas e do meio ambiente.

2.4.4.1 América Latina Logística – ALL

Para o recebimento dos dormentes de bitola estreita (dormentes de 2 metros), a empresa criou um documento (ALL, 2008) para um maior controle de qualidade, onde são necessárias as seguintes verificações:

1. Comprimento: 1,95 a 2,05m.
2. Largura: 0,20 a 0,24m.
3. Altura: 0,15 a 0,17m.
4. Diferenças dimensionais só serão aceitas uma em cada peça.
5. Alburno ou brando: até 10 % do volume.
6. Esmoado ou desquinado na área de pregação: só pode ser aceito em um dos lados e se sobrar face plana com no mínimo 20 cm de largura permitindo um perfeito assentamento da placa de apoio.
7. Esmoado ou desquinado fora da área de pregação: Aceito em uma face podendo ser, nos dois cantos se tiver no máximo 2,5 x 2,5cm e em um canto até 5 x 5cm.

8. Empeno: a tolerância para o empeno na face superior é de 1cm de flecha vertical e nas laterais 5cm de flecha horizontal.

9. Trinca ou rachado: não pode atingir a área de pregação principalmente linhas dos tirefões ou 4,00cm da lateral do dormente e ter mais que 5mm de abertura e 30cm de comprimento.

10. Anti-rachante: deve ser colocado nos topos de todos os dormentes dispositivos anti-rachante nas medidas de 10,5 x 16,0 ou 12,2 x 17,9cm, dormentes que chegarem sem este dispositivo devem ser refugados.

11. Rachadura longitudinal: desde que fora da linha dos tirefões com profundidade menor que 2,00 cm.

12. Casca: os dormentes devem ser entregues se casca.

13. Podre ou ardido: dormente que apresente esta patologia deve ser refugado.

14. Nós cariados ou perfurados e furo de broca: desde que fora da zona de fixação e os orifícios tenham menos do que 2,5 cm de diâmetro e 5,0 cm de profundidade.

15. Todos os dormentes devem ser marcados com a identificação do fornecedor. Esta marca é fornecida pela ALL.

16. Observar principalmente se a classificação indicada na nota fiscal esta em acordo com a carga em tipo e quantidade.

17. Na inspeção dos dormentes devem ser observados as 4 faces.

As espécies de *Eucalyptus* mais utilizadas pela empresa são apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13: Espécies de *Eucalyptus* mais utilizadas pela ALL

<i>Paniculata</i>	<i>Capitellata</i>	<i>Urophylla</i>	<i>Acmenioides</i>
<i>Propinqua</i>	<i>Tereticornis</i>	<i>Citriodora</i>	<i>Maculata</i>
<i>Siderophloia</i>	<i>Bosistoana</i>	<i>Camaldulensis</i>	<i>Maidenii</i>
<i>Punctata</i>	<i>Microphylla</i>	<i>Botryoides</i>	<i>Umbra</i>
<i>Sideroxylon</i>	<i>Pilularis</i>	<i>Creba</i>	<i>Rostrata</i>

Porém devido à miscigenação das espécies de eucalipto no Brasil a empresa aceita amostras de madeira de eucalipto que não se enquadrem nesta relação.

2.4.4.2 VALE S.A.

Os dormentes devem ser serrados na forma de um paralelepípedo retangular. Não são admitidos dormentes serrados com moto-serra no sentido longitudinal do dormente.

O processo de secagem deve ser feito à sombra até que se atinja o teor de umidade menor ou igual à umidade do ponto de saturação das fibras da madeira, para permitir adequada penetração e retenção do produto preservativo. Para a impregnação de produto preservativo hidrossolúvel o teor de umidade médio deverá estar abaixo de 30%. A secagem em estufa não é permitida.

Após o atendimento do teor de umidade máximo exigido, o fornecedor deverá solicitar a visita da fiscalização para a realização da inspeção in natura. Somente após a aprovação na inspeção in natura os dormentes poderão ser entalhados, furados e submetidos a tratamento.

A operação de entalhe e furação deverá ocorrer antes da entrada dos dormentes na autoclave para impregnação sob pressão.

É indispensável que toda a parte permeável (alburno) do dormente seja impregnada com produto preservativo. Entendendo-se por retenção, a quantidade de preservativo contida de maneira uniforme no dormente de madeira, expressa em quilogramas de ingrediente ativo por metro cúbico de madeira tratável. Exige-se uma retenção mínima de 9,6 kg/m³.

Caso não seja atingida a retenção mínima exigida, o lote poderá ser retratado mais uma vez. Os furos utilizados para controles diversos deverão ser preenchidos com tarugos de eucalipto tratado.

Assim que os dormentes estiverem com os índices de retenção e penetração dentro do exigido na presente especificação, o fornecedor deverá comunicar a VALE para execução de inspeção pós-tratamento.

A fiscalização deverá ter entrada livre das usinas de tratamento, nos horários de trabalho, sendo realizada por funcionários da VALE ou prepostos indicados por ela.

Os dormentes devem ter garantia mínima de 8 anos, a contar a partir do ano de preservação.

2.4.4.3 Rede Ferroviária Federal S.A – RFFSA

A Rede Ferroviária Federal S.A. - RFFSA (1979), em seu documento técnico - EVA 15, classifica os dormentes ferroviários em 3 classes, sendo:

1ª Classe: madeiras de grande resistência físico-mecânica, podendo ser utilizadas, inclusive, nas linhas principais de tráfego pesado;

2ª Classe: madeiras de resistência físico-mecânica mediana, passíveis de aproveitamento nos desvios e pátios das linhas de tráfego pesado e nas linhas principais de tráfego médio;

3ª Classe: madeiras para utilização, de preferência, nas linhas de tráfego leve e muito leve.

2.4.5 Considerações aos documentos normativos e empresariais

A norma AREMA/2009 apresenta-se muito completa sobre engenharia ferroviária, isso demonstra a vasta experiência norte americana em engenharia ferroviária, servindo de referência para o mercado ferroviário brasileiro. A norma ABNT NBR 7190:1997 Projetos de Estruturas de Madeira tem o objetivo de propiciar suporte a projetos e estruturas de madeira, sendo o dormente um produto estrutural, que suporta cargas elevadas, a norma brasileira de madeiras é muito útil para elaboração da norma brasileira de dormentes de madeira. A ABNT NBR 7511:2013 Dormentes de madeira – Requisitos e métodos de ensaios agora renovada e atualizada traz uma grande contribuição ao mercado ferroviário brasileiro através da padronização de ensaios físicos e mecânicos em dormentes de madeira, assim como critérios para o controle de qualidade, importantíssimos para confiabilidade deste elemento estrutural.

A empresa ALL possui um documento com critérios a serem avaliados no recebimento de dormentes e a espécies de eucalipto usuais pela companhia. Mas não aborda ensaios físicos e mecânicos a serem realizados.

A empresa VALE não aceita dormentes secos em estufa, provavelmente devido à dificuldade de secagem em estufa da madeira de *Eucalyptus* por parte das empresas, dificultada ainda mais devido a grande geometria e tamanho dos dormentes quando comparados a peças comerciais serradas. A secagem a sombra é mais lenta e gradual gerando

menos tensões internas e defeitos na madeira em comparação com a secagem em estufa. Mas com programas de secagem adequados é possível secar a madeira de eucalipto, resta saber se existe viabilidade econômica para esta prática. Talvez seja assunto de estudos futuros sobre a viabilidade técnica e econômica na secagem de dormentes de eucalipto. A recomendação do entalhe antes do tratamento em autoclave e o preenchimento quando fizer furos para controle de qualidade é importante para a durabilidade da peça. A retenção mínima de ingrediente ativo de $9,6\text{kg/m}^3$ é satisfatória. Não se obteve acesso a qual metodologia utilizada pela empresa VALE do quesito pós-tratamento.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental compreendeu a avaliação do desempenho de dormentes de madeira serrada de *Eucalyptus paniculata* e *Eucalyptus rostrata* e a produção e avaliação de desempenho de dormentes de madeira laminada colada (MLC) de *Pinus oocarpa* colados com adesivo Purbond. Todos dormentes possuíam dimensões padrão de bitola estreita, 200 cm x 22 cm x 16 cm, comprimento, largura e altura respectivamente.

3.1 Madeira

Os dormentes de MLC foram produzidos com madeira da espécie *Pinus oocarpa*, tratados com preservante CCA pela empresa Catalana Artefatos de Madeira – CAM, da cidade de Catalão no estado de Goiás.

Os dormentes de eucalipto foram fornecidos por uma empresa de logística que compra dormentes de serrarias do Brasil para instalação em suas ferrovias. A Figura 31 apresenta os dormentes de eucalipto.

Figura 31: Dormentes de eucalipto

Os dormentes foram ensaiados quando atingiram o teor de umidade de 12%.

3.2 Adesivo

O adesivo utilizado para a colagem das lâminas de madeira que compõem o dormente foi o Purbound HB S309. É uma resina sintética monocomponente à base de poliuretano, contendo 100% de sólidos (não contém solvente), resistente a água, recomendada para colagem de elementos estruturais. Depois de exposto ao ar esse adesivo tem um tempo de aplicação de 30 minutos e tempo de cura de 75 minutos. Pode ser aplicado com pincel ou aplicadores industriais. Sua cura pode ser feita à temperatura ambiente.

Por se um adesivo monocomponente não requer preparo ou mistura, sendo aplicado diretamente na face da madeira.

3.3 Classificação das Lamelas

As lamelas de *Pinus oocarpa* utilizadas na produção dos dormentes de MLC (Figura 32) apresentavam comprimento de 2,20 m e seção transversal variável, conforme apresentado na Tabela 14.

Figura 32: Lote de lamelas de *Pinus oocarpa* utilizado para produção dos dormentes

Tabela 14: Dimensões nominais da seção transversal das lamelas utilizadas na produção dos dormentes de MLC.

Altura (pol)	Largura (pol)
1	5
1,5	3
1,5	4
2	5

Antes da sua utilização, todas as lamelas foram classificadas por meio de análise visual e mecânica.

3.3.1 Classificação visual das lamelas

Para a realização da classificação visual da madeira de *Pinus oocarpa* adotaram-se os critérios estabelecidos pela SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU- SPIB. As regras do SPIB, como todas as outras regras de classificação visual em vigor nos Estados Unidos, são baseadas na norma ASTM D245-93 para o estabelecimento dos critérios de classificação.

As regras do SPIB foram aplicadas na avaliação das seguintes características das lamelas: nós e defeitos de secagem, definindo-se as classes: SS, S1, S2, S3 e F.

Os nós podem ser classificados quanto à posição em: no centro da face larga, no canto da face larga e na face estreita como mostra a Figura 33.

Figura 33: Faces da madeira e incidência de nós de face, no centro e canto
Fonte: SPIB (1994)

A proporção da área da face da madeira ocupada por um nó, ou por um conjunto destes, não deve ultrapassar os limites estabelecidos na Tabela 15 para cada uma das classes de madeira.

Tabela 15: Porção máxima da face ocupada por um nó

Posição	SS	S1	S2	S3	F
Face estreita e canto da face larga	20%	25%	33%	50%	Acima
Centro da face larga	35%	45%	50%	60%	Acima

Fonte: SPIB (1994).

No caso de dois ou mais nós próximos, onde a peça possui fibras inclinadas em torno do conjunto de nós, são considerados como um nó único. As peças classificadas como “F” foram descartadas.

A Figura 34 mostra a realização da classificação visual.

Figura 34: Classificação visual das lamelas

As peças de madeira com defeitos de secagem como: encurvamento, encanoamento, arqueamento e torcimento foram descartadas, sendo consideradas insatisfatórias para a confecção dos dormentes.

Após a classificação visual metade do lote foi submetida ainda à classificação mecânica não destrutiva.

3.3.2 Classificação mecânica não destrutiva das lamelas

Após a classificação visual, metade do lote inicial com as lamelas já classificadas nas classes SS, S1, S2 e S3, foram classificadas mecanicamente. A classificação mecânica foi realizada com a técnica da vibração transversal, na qual frequência natural de vibração do material é correlacionada com sua rigidez na flexão. Utilizou-se o equipamento Metriguard Modelo 340-E. Este é composto por: dois tripés metálicos tendo uma célula de carga de um lado e um apoio metálico em outro, que em seguida a tábua é colocada e recebe um golpe suficiente para fazê-la vibrar. Esta pode ser realizada através de uma ferramenta manual, como por exemplo, um martelo. A célula de carga capta a frequência natural de vibração até que a vibração cesse em função do amortecimento, transferindo o sinal da frequência de vibração para um programa computacional que realiza a leitura das ondas geradas determinando a massa e o módulo de elasticidade da peça.

A Figura 35 ilustra o aparato geral do equipamento para a determinação do MOE a a Figura 36 ilustra o dispositivo de aquisição do sinal.

Figura 35: Equipamento para a determinação do MOE por vibração transversal

Figura 36: Equipamento de vibração transversal utilizado nos ensaios

Antes do início dos trabalhos de classificação o equipamento foi calibrado utilizando-se para isso uma barra de alumínio de MOE conhecido.

Após os ensaios mecânicos são obtidos os valores do MOE para cada uma das lamelas para posterior montagem das vigas de MLC, que depois de aplainadas e coladas tornam-se o dormente propriamente dito.

3.4 Produção dos dormentes de MLC

Os dormentes de MLC foram confeccionados no processo produtivo da empresa CAM de Catalão/GO, respeitando todas as recomendações de normas internacionais para produção de MLC. O teor de umidade das lamelas foi controlado entre 8 e 12% de modo a garantir a qualidade da colagem. Todos os dormentes produzidos foram de bitola métrica: 2m x 0,16m x 0,22m. Todas as lamelas utilizadas partiram do mesmo lote.

3.4.1 Ensaios preliminares

Para que o dormente tenha as condições para uso na ferrovia, suas propriedades devem atingir os valores mínimos recomendados pela norma ABNT NBR 7511:2013 Dormentes de madeira – Requisitos e métodos de ensaios. Como citado no item 2.3.4 o dormente de *Pinus*

serrado não atinge os valores de MOE e MOR para utilização em ferrovias, por isso foram realizados ensaios preliminares em dormentes de MLC, com dimensão de bitola estreita, produzidos utilizando diversas configurações de lamelas. A Tabela 16 apresenta a seção transversal de cada tipo de configuração, suas densidades e resultados de resistência e rigidez.

Tabela 16: Configuração preliminar e resultados dos ensaios

Configuração	Configuração da seção transversal	Densidade (kg/m ³)	MOE MOR	
			(MPa)	
C1			590	9678 52
C2			568	10316 71
C3			623	9810 55
C4			566	10666 60

A configuração C1 utiliza lamelas estreitas e maior quantidade de adesivo com relação às demais configurações. Lamelas estreitas demandam maior tempo de montagem, e sendo o adesivo mais caro que a madeira impacta em maior custo na fabricação do dormente.

A configuração C2 tem por característica a disposição das lamelas na direção vertical, sendo necessária a utilização de lamelas com largura na dimensão da altura do dormente.

A configuração C3 tem a disposição das lamelas na direção horizontal, sendo necessária a utilização de lamelas com largura na dimensão da largura do dormente.

Tanto C2 como C3 necessitam de lamelas mais largas com relação às demais configurações. Quanto mais larga a peça, maior a probabilidade de encontrar defeitos, como nós, resultando em um menor aproveitamento de peças do lote de lamelas.

A configuração C4 é uma combinação das três configurações, onde se busca utilizar peças de seção transversal maiores que da C1 e menores que de C2 e C3. Com base na configuração da seção transversal e nos resultados dos ensaios preliminares foi possível definir a configuração do C4 como a mais adequada.

O arranjo da configuração C4 em comparação com C2 e C3 tem como grande vantagem a utilização de lamelas com menor incidência de defeitos. Em comparação com C1 a configuração escolhida alia a facilidade de montagem e redução na quantidade de adesivo utilizado.

Com isso a escolha da configuração da seção transversal C4 foi definida visando a otimização na utilização de lotes de lamelas, reduzindo a perda na classificação de peças, seja no aproveitamento da tora na serraria ou na utilização do lote na indústria. Aliando resistência e rigidez aos dormentes com a redução de perdas de peças, seja no aproveitamento da tora na serraria ou no lote já na indústria.

Outro ponto importante a ser destacado na escolha é com relação ao efeito do cisalhamento na flexão. A configuração escolhida garante que o cisalhamento máximo ocorra na madeira e não na linha de cola. Fato importante pensando na variabilidade que possa existir na colagem durante o passar do tempo.

Após a escolha da configuração de montagem adequada, foram produzidos 11 dormentes em processo industrial, como apresentado no item a seguir.

3.4.2 Esquema de montagem das vigas de Madeira Laminada Colada

Os dormentes de MLC foram produzidos com o arranjo da configuração C4, considerando-se:

- CAT-2: dormentes confeccionados com as lamelas classificadas apenas visualmente com relação aos defeitos, onde as lamelas com melhor classificação visual foram dispostas nas regiões mais solicitadas mecanicamente. O módulo de elasticidade de cada peça não foi levado em consideração para a disposição, por isso chamada então de disposição aleatória.

- CAT-3: dormentes confeccionados com as lamelas classificadas visual e mecanicamente, onde as lamelas com maiores módulos de elasticidade e maior qualidade com relação aos defeitos foram dispostas nas regiões mais solicitadas mecanicamente (extremidades) e distribuídas por ordem decrescente até o centro do dormente.

Por questões internas da indústria, para CAT-2 foram produzidos 6 dormentes e para CAT-3 foram produzidos 5 dormentes, totalizando 11 dormentes em MLC.

3.4.3 Colagem das lamelas

Antes da colagem da viga, as lamelas passaram por um beneficiamento, onde foram desgrossadas e desempenadas. Este processo deve ser realizado pouco tempo antes da aplicação do adesivo, pois os poros da madeira neste momento estão abertos, obtendo de uma colagem com melhor qualidade.

O adesivo foi distribuído uniformemente com aplicador industrial, de forma automatizada na superfície das lamelas, como mostra a Figura 37.

Figura 37: Aplicação automatizada do adesivo nas lamelas

Após receber o adesivo as lamelas foram unidas, para prevenir suas excessivas exposições ao ar, perda de umidade e, conseqüentemente, sua cura antes do desejado. Após coladas as lamelas, os dormentes foram levados para prensagem (Figura 38). A pressão foi de

0,8 MPa, sendo mantida por 75 minutos. Após a retirada dos dormentes da prensa, eles ficaram estocados ao ar por 7 dias.

Figura 38: Prensagem das lamelas do dormente

A Tabela 17 apresenta as recomendações do fabricante de adesivo e o procedimento adotado pelo presente trabalho.

Tabela 17: Detalhamento das recomendações de fabricante e a forma como foi conduzida a colagem do presente trabalho

Etapas e características	Recomendação do fabricante	Procedimento utilizado
Espalhamento do adesivo		
Instrumento ou máquina	Passadeira de adesivo/pincel	Passadeira de adesivo
Gramatura (cada face)	180 g/m ²	180 g/m ²
Prensagem a frio		
Pressão de prensagem	0,6 a 0,8 MPa	0,8 MPa
Temperatura ambiente	20° C	25° C
Minutos de prensagem	75	75
Umidade da madeira	8 a 12%	Entre 8 e 12 %
Tempo para utilização das peças já coladas com temperatura ambiente acima de 20°C	12 horas	7 dias

A Figura 39 apresenta os dormentes produzidos em MLC.

Figura 39: Dormentes produzidos em MLC

3.5 Caracterização de dormentes

Com o objetivo de avaliar as propriedades mecânicas dos dormentes produzidos, seguiram-se as premissas, métodos de cálculo e 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}) e dureza Janka (f_H). A Tabela 18 apresenta a quantidade de corpos de prova utilizados por ensaio para os dormentes das condições CAT-2, CAT-3, *Eucalyptus rostrata* (ER) e *Eucalyptus paniculata* (EP) serrados.

Tabela 18: Quantidade de corpos de prova dos dormentes por propriedade mecânica investigada

Propriedades	Número de corpos de prova			
	CAT-2	CAT-3	ER	EP
Rigidez à flexão (MOE)	6	5	2	4
Resistência à flexão (MOR)	6	5	2	4
Compressão normal – placa ($f_{c90,p}$)	12	10	4	8
Arrancamento lateral de tirefão (Ra_0)	12	10	4	7
Arrancamento normal de tirefão (Ra_{90})	12	10	4	8
Dureza Janka (f_H)	12	10	4	8

Um corpo de prova de EP foi impossibilitado de ser ensaiado, devido à presença de uma rachadura anelar durante o corte do dormente para sua retirada, que dividiu o corpo de prova em duas partes.

Para avaliação das propriedades de umidade e densidade foram adotados os procedimentos do ANEXO B da norma ABNT NBR 7190:1997 Projetos de Estruturas de Madeira.

Além dos dormentes feitos em MLC, foram avaliados também os dormentes em madeira maciça das espécies de *Eucalyptus rostrata* e *Eucalyptus paniculata*, espécies usualmente utilizados na fabricação de dormentes para ferrovias.

3.5.1 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 17 dormentes como indicado na Tabela 19.

Tabela 19: Quantidade de dormentes para ensaio de flexão

Tipos de dormentes	MLC		Eucalipto Maciço
	CAT-2	CAT-3	
Quantidade	6	5	6

As dimensões dos corpos de prova para o ensaio de flexão foi referente à bitola métrica, sendo apresentada na Figura 40.

Figura 40: Dimensão dos corpos de prova para ensaio de flexão
Fonte: Porto (2004)

Este ensaio consiste na aplicação de uma carga no centro da viga bi apoiada, medindo-se a flecha em relação à carga aplicada. Conforme se depreende da Figura 41.

Figura 41: Esquema de ensaio de flexão
Fonte: ABNT NBR7511 (2013)

A carga, avaliada com o auxílio de anel dinamométrico, foi aplicada no centro da viga a uma velocidade de 127 mm por minuto, com o auxílio de um pistão hidráulico. Os deslocamentos abaixo do ponto de aplicação da força foram determinados com o auxílio de um relógio comparador, como indicado na Figura 42.

Este ensaio foi realizado com o dormente em duas posições: normal e invertida. No primeiro dos casos aplica-se o carregamento até uma deformação de $L/200$. Em seguida, a

carga é retirada, o dormente é invertido e aplicado o carregamento até uma deformação de $L/200$, posteriormente, ainda nessa segunda posição, o dormente foi rompido.

Figura 42: Realização do ensaio de flexão

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 deve ser seccionado para que sejam retirados os corpos de prova para realização dos ensaios de arrancamento normal às fibras, arrancamento lateral às fibras e compressão normal – placa. A Figura 43 apresenta uma sugestão do autor para a retirada destes corpos de prova de dormentes de 2,8m e 2m.

Figura 43: Esquema de retirada dos corpos de prova

Para que esta sugestão seja seguida recomenda-se nos dormentes de 2m, como os utilizados neste estudo, a diminuição do comprimento dos corpos de prova a serem retirados.

3.5.2 Ensaio de compressão normal - placa

Este ensaio possui 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 é 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 é a da placa de apoio. A placa de apoio deve possuir comprimento, largura e espessura de 36cm x 20cm x 2,5cm, apresentada na Figura 44.

Figura 44: Esquema de ensaio de compressão normal às fibras
Fonte: ABNT NBR7511 (2013)

Para dormentes de 2 metros recomenda-se o corpo de prova com dimensões no comprimento, largura e altura de 60cm x 22cm x 16cm respectivamente.

O procedimento de ensaio deve seguir os seguintes critérios:

A carga de compressão é 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.

A deformação ocorrida na peça é medida com o auxílio de um relógio comparador, sendo que a máxima deformação elástica permitida pela norma é 6,35 mm com uma carga mínima de 45 toneladas.

Em seguida o conjunto é descarregado, após a liberação da carga, a deformação residual máxima não deverá ultrapassar 3,175 mm após 1 minuto de liberação da carga. A Figura 45 ilustra a realização do ensaio.

Figura 45: Ensaio de compressão normal às fibras

3.5.3 Ensaio de arrancamento normal de tirefão

Neste ensaio o objetivo é 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 46.

Figura 46: Esquema de ensaio de arrancamento normal de tirefão
Fonte: ABNT NBR7511 (2013)

Para dormentes de 2 metros recomenda-se o corpo de prova com dimensões no comprimento, largura e altura de 35cm x 11cm x 16cm respectivamente. O tirefão com dimensões 15,8mm de diâmetro (rosca interna) e 165,1mm de comprimento é introduzido na madeira com uma profundidade de 114,3mm. Nos corpos de prova primeiramente foi realizada uma pré-furação com broca de 15mm e 19mm de diâmetro (para dormentes de MLC e *Eucalyptus* respectivamente) a fim de facilitar a fixação do tirefão no dormente. A Figura 47 apresenta o tirefão instalado com o suporte para ensaio.

Figura 47: Tirefão fixado

O arrancamento do tirefão foi realizado em uma máquina universal AMSLER (Figura 48) com uma taxa de carregamento de 1" (25,4mm) por minuto.

Figura 48: Ensaio de arrancamento normal de tirefão

3.5.4 Ensaio de arrancamento lateral de tirefão

Este ensaio tem o objetivo de 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 utilizam-se dois tirefões instalados a 90° com as fibras da madeira e solicitados a uma força paralela às fibras como mostrado na Figura 49. Para dormentes de 2 metros de formato recomenda-se o corpo de prova com dimensões no comprimento, largura e altura de 40cm x 11cm x 16cm respectivamente. O tipo de tirefão e sua instalação foram as mesmas adotadas no item 3.5.3.

Figura 49: Esquema de ensaio de arrancamento lateral
Fonte: ABNT NBR 7511 (2013)

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

Este ensaio foi realizado na máquina universal AMSLER (Figura 50), com o auxílio de um relógio comparador.

Figura 50: Ensaio de arrancamento lateral

3.5.5 Ensaio de dureza Janka

A dureza é a resistência que a madeira oferece à penetração de outro corpo. Este ensaio é contemplado na nova norma de dormentes, ABNT NBR 7511:2013 Dormentes de madeira – Requisitos e métodos de ensaios.

O implemento utilizado para esta finalidade é mostrado em corte na Figura 51, apresentada a seguir.

Figura 51: Esquema de ensaio para a determinação da dureza Janka
Fonte: ABNT NBR 7190 (1997)

Devido ao dormente sofrer esforços de penetração somente na direção normal às fibras da madeira, o ensaio leva em consideração apenas esta direção, conforme a Figura 52:

Figura 52: Ensaio de dureza Janka na direção normal às fibras

Os corpos de prova utilizados para este ensaio são provenientes de: Ra₉₀ e Ra₀.

3.6 Análise estatística

Para investigar a influência do posicionamento das lamelas classificadas mecanicamente nas propriedades mecânicas investigadas, utilizou-se a análise de variância (ANOVA), ao nível de 5% de significância, tendo a equivalência entre as propriedades mecânicas como hipótese nula (H_0), e a não equivalência como hipótese alternativa (H_1). P-valor da ANOVA inferior a 5% implica em rejeitar H_0 , aceitando-a em caso contrário.

O teste de Anderson-Darling foi utilizado para verificação da normalidade nas distribuições por resposta investigada, e o teste F e de Levene para avaliação da homogeneidade entre variâncias, validando o modelo da ANOVA. O nível de significância estipulado para os testes de normalidade e equivalência entre variâncias foi de 5%. Para o teste de Anderson Darling, a hipótese nula consistiu em assumir equivalência entre as médias dos dois tratamentos, e a não equivalência como hipótese alternativa. Para o teste F e de Levene, a hipótese nula consistiu em assumir equivalência entre variâncias, e a não equivalência como hipótese alternativa. P-valor superior ao nível de significância dos testes implica em aceitar H_0 , rejeitando-as em caso contrário.

Por se tratar de uma ANOVA com dois níveis para o fator investigado, não se faz necessário o emprego posterior de testes de contraste, como é o caso do teste de comparações múltiplas de Tukey. Acusada significância, o melhor tratamento é apresentado por meio de gráfico de efeitos principais (PANZERA *et al.*, 2013). Com relação aos quesitos sobre os resíduos da ANOVA (ver Apêndice), a normalidade, homogeneidade e independência foram investigadas com auxílio do teste de Anderson-Darling e dos gráficos de resíduos versus valores ajustados e resíduos versus ordem de observação, respectivamente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos testes aplicados aos dormentes são apresentados como valor médio a 15% e 22% de teor de umidade para os dormentes em MLC e para os dormentes de *Eucalyptus* respectivamente. A Tabela 20 apresenta os valores de peso e densidade aparente para os dormentes estudados, assim como os valores de norma para a densidade das respectivas espécies.

Tabela 20: Resultados de peso e densidade dos dormentes

Dormentes	Peso (kg)		Densidade aparente (kg/m ³)	
	Presente trabalho		NBR7190:1997	IPT:1956
<i>MLC de Pinus oocarpa</i>	42	600	538	-
<i>Eucalyptus rostrata</i>	58	822	-	870
<i>Eucalyptus paniculata</i>	76	1077	1087	-

O dormente em MLC de *Pinus oocarpa* é 28% e 45% mais leve que o *Eucalyptus rostrata* e *Eucalyptus paniculata* respectivamente.

Durante a perda de umidade os dormentes de *Eucalyptus rostrata* apresentaram rachaduras em toda extensão, suficientes para ocasionar a perda de ligação entre o tirefão e o dormente (Figura 53). Este problema que ocorre em algumas espécies de *Eucalyptus* pode vir a causar abertura de bitola na via férrea e consequentemente um descarrilamento do trem, comprometendo a segurança na ferrovia. Pode-se notar também que as chapas dentadas não foram eficientes para evitar o problema.

Figura 53: Rachaduras dos dormentes de *Eucalyptus rostrata*

Os dormentes de *Eucalyptus paniculata* e de MLC não apresentaram este problema.

A Figura 54 apresenta os valores de norma e os resultados para de rigidez à flexão (MOE) para os dormentes pesquisados.

Figura 54: Resultados de MOE para dormentes testados

O MOE médio dos dormentes em MLC (CAT-2) apresentou valor superior aos estipulados pela norma brasileira ABNT NBR 7511:2013 referentes à Classe II. O MOE dos

dormentes em MLC (CAT-3) assim como os *Eucalyptus paniculata* serrados apresentaram valores superiores aos quesitos da norma brasileira ABNT NBR7511:2013 referentes à Classe I. Os dormentes de *Eucalyptus rostrata* apresentaram valor médio de MOE inferior a Classe II, não atingindo os requisitos mínimos de norma. Os dormentes em MLC da condição CAT-3 apresentaram valores de módulo de elasticidade 30% superiores aos valores de MOE dos dormentes em MLC da condição CAT-2. Demonstrando o benefício da classificação mecânicas das lamelas.

A Figura 55 apresenta os valores de norma para as classes de dormentes e os resultados de resistência à flexão (MOR) dos dormentes testados.

Figura 55: Resultados de MOR para os dormentes testados

O MOR médio dos dormentes em MLC (CAT-2) apresentou valor superior aos estabelecidos pela norma brasileira ABNT NBR7511:2013 referentes a Classe II. O MOR dos dormentes em MLC (CAT-3) assim como os *Eucalyptus rostrata* e *Eucalyptus paniculata* serrados apresentaram valores superiores ao estabelecido pela norma brasileira ABNT NBR7511:2013 referente à Classe I. Os dormentes em MLC da condição CAT-3 apresentaram valor médio de resistência 56% superior aos dormentes em MLC da condição CAT-2. Apresentando novamente a eficiência da classificação mecânica das lamelas.

Para a propriedade resistência à compressão normal – placa, todos os dormentes (MLC e serrados) obtiveram resultados satisfatórios. A Figura 56 apresenta os valores de tensão que devem ser atingidos por norma e os resultados obtidos nos ensaios.

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

A Figura 57 apresenta os valores permitidos para deformação elástica máxima (d_{max}) e de deformação permanente residual (d_{res}), assim como os valores obtidos nos ensaios.

Figura 57: Resultados de d_{max} e d_{res} para os dormentes testados

Os valores obtidos dos deslocamentos de placa elásticos e residuais de todos os dormentes foram inferiores aos valores limites estipulados pela norma brasileira. Os valores dos deslocamentos de placa elásticos e residuais dos dormentes em MLC da condição CAT-3 foram 11% e 20% inferiores em média ao $d_{máx}$ e d_{res} dos dormentes de MLC da condição CAT-2, demonstrando maior resistência do CAT-3.

A Figura 58 apresenta os valores de norma para resistência ao arrancamento lateral de trefão e os resultados dos dormentes ensaiados.

Figura 58: Resultados de R_{a0} para os dormentes testados

A resistência média ao arrancamento lateral de tirefão dos dormentes avaliados foi superior, em todos os casos, aos quesitos estipulados pela norma brasileira referente à Classe I. Os dormentes em MLC da condição CAT-3 foram 10% mais resistentes ao arrancamento lateral em relação aos dormentes de MLC da condição CAT-2.

A Figura 59 apresenta os valores de norma para resistência ao arrancamento normal de tirefão e os resultados dos dormentes ensaiados.

Figura 59: Resultados de R_{a90} para os dormentes testados

Os valores médios da resistência ao arrancamento normal de tirefão de todos os dormentes foram superiores aos quesitos estipulados pela norma brasileira referente à Classe

I. Os dormentes em MLC da condição CAT-3 foram 17% mais resistentes ao arrancamento normal de tirefão em relação aos dormentes de MLC da condição CAT-2.

Os valores de norma, assim como os resultados do ensaio de dureza Janka são apresentados na Figura 60.

Figura 60: Resultados de f_H para os dormentes testados

Com exceção dos dormentes de MLC da condição CAT-2, que não atingiram valor mínimo de dureza Janka de 35 MPa referente a Classe II da norma brasileira, todos os demais apresentaram valores satisfatórios, superando o limite da Classe I do referido documento normativo. Os valores de dureza Janka dos dormentes de MLC da condição CAT-3 foram em média 37% superiores a f_H dos dormentes fabricados da condição CAT-2.

As Figuras 61 e 62 ilustram respectivamente os resultados dos testes de normalidade e homogeneidade entre variâncias para as propriedades investigadas. Os resultados obtidos revelaram que as distribuições são normais e que as variâncias são equivalentes em todas as propriedades investigadas, com exceção da dureza Janka, que apresentou P-valor do teste de Anderson-Darling de 0,258 e de 0,019 para o teste F, sendo neste caso utilizada a transformada de Johnson (Equação 1), validando o emprego do modelo da ANOVA.

$$Y = 0,685572 + 0,611730 \cdot \text{Log} \left(\frac{X - 26,2635}{70,7825 - X} \right) \quad (1)$$

Figura 61: Resultados dos testes de normalidade de Anderson-Darling

Figura 62: Resultados do teste F e de Levene para avaliação da homogeneidade entre variâncias

A Tabela 21 apresenta os resultados da análise de variância (P-valor e graus de liberdade - GL) do fator disposição das lamelas, estando sublinhados os P-valores considerados significativos (P-valor <005). A disposição das lamelas na confecção dos dormentes CAT-3 foi significativa para as variáveis-resposta MOE, MOR, d_{res} , Ra_{90} e f_H , fornecendo resultados equivalentes, ou seja, não foi significativa apenas para d_{max} e Ra_0 .

Tabela 21: Resultados da análise de variância

Estat.	MOE	MOR	d_{max}	d_{res}	Ra_0	Ra_{90}	f_H
P-valor	<u>0,000</u>	<u>0,003</u>	0,225	<u>0,015</u>	0,173	<u>0,030</u>	<u>0,003</u>
GL	10	10	21	21	21	21	21

A Figura 63 apresenta os gráficos de efeitos principais dos fatores considerados significativos pela ANOVA nas propriedades investigadas.

Figura 63: Gráficos de efeitos principais

Da Figura 63 a classificação mecânica das lamelas (disposição racional) proporcionou aumentos significativos no MOE, MOR, Ra_{90} , f_H e redução no d_{res} quando comparados com os respectivos valores da condição CAT-2, evidenciando ser eficiente a metodologia de classificação mecânica individual das lamelas para formação do dormente.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

A produção dos dormentes em MLC requer um rigoroso controle de qualidade com relação disposição das lamelas, por isso a classificação mecânica dever ser realizada para atingir os valores da norma brasileira ABNT NBR 7511:2013 Dormentes de madeira – Requisitos e métodos de ensaios.

O adesivo mono componente é simples de ser utilizado, não requer misturador e não gera problema no aplicador industrial automatizado, desde que o mesmo seja operado de acordo com a especificação do fabricante.

A densidade da madeira de *Pinus* confere ao dormente de bitola métrica um peso de 42kg, facilitando sua manipulação por pessoas dentro do processo de produção, favorecendo o transporte na distribuição aos clientes, na instalação e manutenção da ferrovia.

A MLC de *Pinus oocarpa* tratada com CCA e colada com adesivo poliuretano apresentou desempenho satisfatório para sua utilização como dormentes ferroviários para Classe I, assim como para sua utilização como elemento estrutural.

Com exceção da dureza Janka dos dormentes em MLC formados da união das lamelas de forma aleatória (CAT-2), todos os demais dormentes em MLC apresentaram resultados satisfatórios para as demais propriedades investigadas quando comparados aos requisitos estabelecidos pela norma brasileira ABNT NBR 7511:2013 Dormentes de madeira – Requisitos e métodos de ensaios.

A classificação mecânica e a disposição racional das lamelas conferiram valores significativamente superiores em boa parte das propriedades investigadas, com exceção do deslocamento de placa e da resistência ao arrancamento lateral de tirefão, por apresentar resultados estatisticamente equivalentes com a condição CAT-2, evidenciando a efetividade do método de classificação mecânica e disposição racional das lamelas.

A espécie de *Eucalyptus paniculata* ultrapassou os valores recomendados por norma para a classe I em todas as propriedades investigadas, apresentando-se satisfatória para utilização como dormente ferroviário. O *Eucalyptus rostrata* apresentou problemas de secagem suficientes para causar a perda de ligação entre o tirefão e o dormente e não atingiu os requisitos mínimos de norma para a rigidez a flexão (MOE), sendo assim não apresentou propriedades mecânicas mínimas para sua utilização como dormente ferroviário.

Para trabalhos futuros sugerimos:

- O estudo do comportamento *in loco* do dormente de MLC para avaliação de sua performance com o tempo e com a classe de ferrovia.
- A pesquisa de outras espécies de florestas plantadas para utilização como dormentes, por exemplo, a Teca (*Tectona grandis*);
- A utilização de adesivos alternativos para a produção de dormentes em MLC.

REFERÊNCIAS

- AGENCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES ANTT. (2009). **Rede Ferroviária**. Disponível em: <http://201.57.54.6/InformacoesTecnicas/aett/aett_2009/2.1.1.asp>. Acesso em: 29 abr. 2011.
- ALVES, G. K. A; SINAY, M. C. F. (2005). Os dormentes ferroviários, seu tratamento e o meio ambiente. In: CONGRESSO DO RIO DE TRANSPORTES, 3., **Anais**. Rio de Janeiro: Rio de transportes, 2005. p. 1 - 8.
- AMERICA LATINA LOGISTICA (ALL) (2008). **Norma de Recebimento de Dormentes**. [s.l.].
- AMERICAN RAILWAY ENGINEERING AND MAINTENANCE-OF-WAY ASSOCIATION (2009). **AREMA: Manual for Railway Engineering – Ties**. Lanham.
- AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. (1993). ASTM D245: Standard practice for establishing structural grades and related allowable properties for visually graded Lumber. West Conshohoken.
- ANDRADE, E.N. (1961). O Eucalipto. 2.ed. **História**. São Paulo. p. 49-64.
- APRILANTI, M. D. (2010). **Influência de um corte na borda tracionada de uma viga maciça simulando uma emenda de topo na lâmina inferior de vigas laminadas coladas**. 109 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE - ABIMCI. (2008). **Estudo Setorial 2008 ano base 2007**, 56p., 2008. Disponível em: <http://www.abimci.com.br/dmdocuments/ABIMCI_Estudo_Setorial_2008.pdf> Acesso em: 11 maio 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FLORESTAS PLANTADAS. (2012). **Anuário estatístico da ABRAF 2012 ano base 2011**. Brasília: Poyry Silviconsult Engenharia Ltda. Disponível em: <http://www.abraflor.org.br/estatisticas/ABRAF12/ABRAF12-BR.pdf> Acesso em: 11 maio 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1997). **NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro.
- _____. (2005). **NBR7511: Dormentes de madeira - Requisitos e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro.
- _____. (2013). **NBR7511: Dormentes de madeira - Requisitos e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. (2012). **Anuário Estatístico da ABRAF 2012 ano base 2011**. Brasília: STCP Engenharia de Projetos.

AUSTRALIAN GREENHOUSE OFFICE. (2006). **Ago factors and methods workbook: For use in Australian greenhouse emissions reporting.** Canberra: Australian Greenhouse Office. AGO Factors and Methods Workbook.

BARILLARI, C. T. (2002). **Durabilidade da madeira do Gênero *Pinus* tratada com preservantes: Avaliação em campo de apodrecimento.** 79 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

BHP INSTITUTE OF RAILWAY INDUSTRY - Monash University (Australia). (2013). **Advancing the railway industry through technology.** Disponível em: <<http://www.eng.monash.edu.au/railway>>. Acesso em: 17 maio 2013.

BORTOLETO JÚNIOR, G. (1993). **Indicações para a utilização da madeira de seis espécies e variedades de pinus na construção civil.** 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Arquitetura, Área de Concentração: Tecnologia do Ambiente Construído, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1993.

BRASIL TRILHOS. (2011). **Trilhos nacionais.** Disponível em: <http://www.brasiltrilhos.com.br/prod_trilhos_br.php>. Acesso em: 11 maio 2011.

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

CALIL JUNIOR, C. (2002). **O Potencial do uso da madeira de *Pinus* na construção civil.** Pini Web, São Paulo, 10 abr. Disponível em: <<http://www.piniweb.com.br/construcao/noticias/o-potencial-do-uso-da-madeira-de-pinus-na-construcao-81480-1.asp>>. Acesso em: 10 abril de 2013.

CALIL JUNIOR, C.; BRITO, L. D. (2010). **Manual de projeto e construção de estruturas com peças roliças de madeira de reflorestamento.** 1.ed. São Carlos: Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos.

CALIL NETO, C. (2011) **Madeira Laminada Colada (MLC): controle de qualidade em combinações espécie-adesivo-tratamento preservativo.** 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

CARGNIN, O (2005). **Alternativas das florestas de pinus.** Disponível em: <<http://noticias.ambientebrasil.com.br/artigos/2005/09/27/21014-alternativas-das-florestas-de-pinus.html>>. Acesso em: 04 fevereiro 2013.

CASSENS, D. L. et. al. (1995). **Selection and use of preservative-treated wood.** Madison: Forest Products Society.

CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY (CIA). (2013). **Country comparison: railways.** Disponível em: <<https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/rankorder/2121rank.html#top>>. Acesso em: 18 maio 2013.

CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY (CIA). (2013). **Country Comparison: Railways.** Washington. Disponível em: <<https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/rankorder/2121rank.html#top>>. Acesso em: 18 maio 2013.

COLENCI, R. A. (2002). **Qualificação mecânica de madeiras para uso como dormente ferroviário**. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista “Júlio De Mesquita Filho” Unesp, Botucatu, 2002.

COMISSÃO DE ESTUDO DE DORMENTES E LASTROS. (2011). CE-06:100.01: **Dormente de madeira – Requisitos e métodos de ensaio**. [s.l.].

COMPANHIA BRASILEIRA DE DORMENTES (Brasil). (2010). Dormentes de concreto para vias férreas convencionais com lastro. Disponível em: <<http://dorbras.com.br/>>. Acesso em: 07 maio 2011.

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

FAGUNDES, H. A. D. (2003). **Produção de madeira serrada e geração de resíduos do processamento de madeira de florestas plantadas no Rio Grande do Sul**. 173f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Modalidade Acadêmico) – Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

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

IORELI, J. (2004). **Estudo teórico e experimental de vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro**. 108 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

GLUED LAMINATED TIMBER ASSOCIATION. (2006). GLTA, **Specifiers Guide**. Inglaterra. Disponível em: <http://www.glulam.co.uk/pdfs/Specifiers_Guide.pdf>. Acesso em: 16 maio 2013.

GONZÁLEZ-NICIEZA, C. et al. (2008). Failure analysis of concrete sleepers in heavy haul railway tracks. **Engineering Failure Analysis**, Philadelphia, v. 15, p.90-117.

HEWITT EQUIPAMENTOS LTDA. (2011). Divisão ferroviária. Disponível em: <http://www.hewittequipamentos.com.br/?page_id=2&lang=pt>. Acesso em: 23 maio 2011.

HOWE, J.P. (1996). Look for wood in crossties. **Forest Products Journal**, v. 1, p.14-16.

ICIMOTO F. H. et al. (2012). 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...CD-ROM**.

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

INTERNATIONAL TROPICAL TIMBER ORGANIZATION – ITTO. (2009). **Eucalypts and Pine dominate plantations in Brazil**. Disponível em: <http://www.fordaq.com/fordaq/news/softwood_logsprices_20767.html> Acesso em: 07 maio 2011.

JACOB, C. (1982). **Ferrovia o Caminho Certo**. São Paulo: Imprensa Oficial do Estado de São Paulo. 265 p.

LAMPO R. G. (2002). **Recycled-plastic composite railroad crossties**. Disponível em: <http://www.cif.org/Nom2002/Nom13_02.pdf>. Acesso em: 17 maio 2013.

LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN. (2013). **Entdecken Sie Hamburgs grüne Seite**. Disponível em: <forst-hamburg.de/oekologischesholz>. Acesso em: 12 mar. 2013.

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

MICHEL, F. D. (2011). **Superestrutura ferroviária: Dormentes**. Notas de aula da disciplina: Infra Ferro-hidro-aero-dutoviária do curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: http://www.producao.ufrgs.br/arquivos/disciplinas/411_aula_5_dormentes.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2011.

MILLER, R. (2007). **Rail and tramway sleepers: Product recognition, identification and presentation**, viewed 29 May 2008, <http://www.cqfa.com.au/documents/1181619278_sleepers_fact_sheet.pdf>

MORAES, M. A. F. D. (1996). **A indústria da madeira preservada no Brasil: Um estudo de sua organização industrial**. 173f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1996.

NAHUZ, M A. (2004). **Atividades industriais com madeiras de Pinus – atualidades e desafios**. São Paulo: Divisão de Produtos Florestais – IPT. Disponível em: <<http://www.ufsm.br/cepef/artigos/Atividades%20industriais%20com%20madeiras%20de%20Pinus.pdf>>. Acesso em: 26 maio 2011.

NOGUEIRA, M. C. J. A. (1991). **Indicações para o emprego de dezesseis espécies de Eucalipto na construção civil**. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Arquitetura, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1991.

PANZERA, T. H. et al. (2013). Evaluation of Compacted Cementitious Composites for Porous Bearings. **International Journal of Applied Ceramic Technology**, v. 10, p. 474-483.

PARENTE, Ricardo Alves; PINHEIRO, Libânio Miranda. Plásticos reciclados para elementos estruturais. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 10, n.47, p.75-95, 2008. Disponível em: <http://www.set.eesc.usp.br/cadernos/nova-versao/pdf/cee47_75.pdf>. Acesso em: 06 maio 2011.

PEREIRA, J. C. D. et. al. (2000). **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil**. Colombo: Embrapa Florestas. Documentos 38.

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 fev. 2011.

PROJETO de estruturas de madeira. [Sl.:s.n], 2010. **Proposta de revisão da normal brasileira ABNT NBR7190/2010**, apresentado ao XII Ebramem.

RAILWAY TRACK AND STRUCTURES. (2008). New York: Simmons-boardman Publishing Corp., v. 104, n. 1, jan. Mensal. Disponível em: <<http://www.nxtbook.com/nxtbooks/sb/rts0108/index.php>>. Acesso em: 17 maio 2013.

REDE FERROVIÁRIA FEDERAL S.A. (1979). **Justificativa para elaboração de normas para dormentes de madeira (EVA -15)**. S. L. 175 p.

RÖTHLISBERGER. (2012). **History and development of the wooden sleeper**. [s.i.], Disponível em: <<http://www.corbat-holding.ch/CMS/default.asp?ID=1816>>. Acesso em: 04 mar. 2013.

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

SHIMIZU, J. Y. (2006). *Pinus* na silvicultura brasileira. **Revista da Madeira**, Caxias do Sul, v. 16, n. 99, p. 4-14, 2006.

SILVA, J. C. (2003). A madeira de eucalipto para dormentes. **Revista da Madeira**, n. 75. Disponível em: <www.remade.com.br/revistadamadeira_materia.php?num=398&subject=Dormentes&title=A%20madeira%20de%20eucalipto%20para%20dormentes>. Acesso em: 03 maio 2011.

SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU. (1994). **Standard grading rules for Southern Pine lumber**. Pensacola.

STAMATO, G. C. (1997). **Resistência ao embutimento da madeira compensada**. 237 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

SUCENA, M. (2007). **Tecnologia ferroviária: Características principais**. Apostila do Instituto Militar de Engenharia –IME. Disponível em: <<http://www.sucena.eng.br/IME/SistFerr3.pdf>>. Acesso em: 13 maio 2011.

VALE S.A. (2009). **Dormentes de eucalipto - EFC/ EFVM - 1ª categoria**. [s.l.].

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

ZAREMBSKI, A.M. (1993). 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.

APÊNDICE

As Tabelas 22 a 26 apresentam os resultados obtidos nas seis propriedades mecânicas investigadas, sendo $\bar{x}$ a média amostral, C_v o coeficiente de variação e Mín e Máx os menores e os maiores valores, respectivamente. Na Tabela 27, $d_{\text{máx}}$ corresponde ao deslocamento obtido no corpo de prova comprimido mediante o valor de tensão de 6,44 MPa e d_{res} o deslocamento residual.

Tabela 22: Resultados dos ensaios de flexão estática

Estat.	CAT-2		CAT-3		E. rostrata		E. paniculata	
	MOE (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)
$\bar{x}$	10922	41	14198	64	9370	66	18193	118
C_v (%)	6	21	9	16	12	18	8	14
Mín	10010	29	12323	51	8611	75	16822	93
Máx.	11902	43	15761	78	10129	58	19434	129

Tabela 23: Resultados dos ensaios de resistência à compressão-placa

Força de 450kN								
Estat.	CAT-2		CAT-3		E. Rostrata		E. Paniculata	
	$d_{\text{máx}}$ (mm)	d_{res} (mm)	$d_{\text{máx}}$ (mm)	d_{res} (mm)	$d_{\text{máx}}$ (mm)	d_{res} (mm)	$d_{\text{máx}}$ (mm)	d_{res} (mm)
$\bar{x}$	1,90	0,49	1,69	0,39	2,28	0,18	0,88	0,09
C_v (%)	22	19	20	25	25	18	17	15
Mín	0,95	0,39	1,21	0,24	1,75	0,14	0,68	0,08
Máx.	2,45	0,64	2,40	0,55	3,09	0,21	1,15	0,12

Tabela 24: Resultados dos ensaios de resistência ao arrancamento lateral de tirefão

Estat.	CAT-2	CAT-3	E. Rostrata	E. Paniculata
	Ra_0 (kN)			
$\bar{x}$	11,58	12,79	12,56	13,01
C_v (%)	20	12	7	16
Mín	7,64	10,78	11,76	10,29
Máx.	15,97	15,68	13,72	16,17

Tabela 25: Resultados dos ensaios de resistência ao arrancamento normal de tirefão

Estat.	CAT-2	CAT-3	E. Rostrata	E. Paniculata
	Ra₉₀(kN)			
$\bar{x}$	40,73	47,63	46,43	79,96
<i>Cv (%)</i>	17	14	16	11
<i>Mín</i>	30,38	37,24	40,18	67,13
<i>Máx.</i>	54,39	60,27	52,92	92,61

Tabela 26: Resultados dos ensaios de dureza Janka

Estat.	CAT-2	CAT-3	E. Rostrata	E. Paniculata
	f_H (MPa)			
$\bar{x}$	30,80	42,18	47,29	97,54
<i>Cv (%)</i>	16	23	14	9
<i>Mín</i>	21,20	29,30	37,98	85,75
<i>Máx.</i>	36,90	58,60	52,68	110,01

A seguir são apresentados os gráficos de resíduos da análise de variância (ANOVA) assim como dos resultados obtidos para cada variável-resposta avaliada nesta pesquisa.

As Figuras 64 à 70 apresentam os gráficos dos resíduos da ANOVA para as propriedades investigadas.

Figura 64: Gráficos dos resíduos da ANOVA para o módulo de elasticidade na flexão: normalidade (a), independência (b) e homogeneidade (c)

Figura 65: Gráficos dos resíduos da ANOVA para o módulo de resistência na flexão: normalidade (a), independência (b) e homogeneidade (c)

Figura 66: Gráficos dos resíduos da ANOVA para o deslocamento de placa: normalidade (a), independência (b) e homogeneidade (c)

Figura 67: Gráficos dos resíduos da ANOVA para o deslocamento residual: normalidade (a), independência (b) e homogeneidade (c)

Figura 68: Gráficos dos resíduos da ANOVA para a resistência ao arrancamento lateral de tirefão: normalidade (a), independência (b) e homogeneidade (c)

Figura 69: Gráficos dos resíduos da ANOVA para aresistência ao arrancamento normal de tirefão: normalidade (a), independência (b) e homogeneidade (c)

Figura 70: Gráficos dos resíduos da ANOVA para dureza Janka: normalidade (a), independência (b) e homogeneidade (c)

As Tabelas 27 à 33 apresentam os resultados da análise de variância para as propriedades investigadas, sendo FV a fonte de variação, DP a disposição das lamelas, GL os graus de liberdade, SQ a soma dos quadrados, MQ a média dos quadrados, F a estatística F e P-valor a probabilidade P.

Tabela 27: Resultados da ANOVA para o módulo de elasticidade na flexão

FV	GL	SQ	MQ	F	P-Valor
DP (tratamento)	1	29271429	29271429	29,22	0,000
Erro	9	9016018	1001780		
Total	10	38287448			

Tabela 28: Resultados da ANOVA para o módulo de resistência na flexão

FV	GL	SQ	MQ	F	P-Valor
DP (tratamento)	1	1377,9	1377,9	15,62	0,003
Erro	9	794,2	88,2		
Total	10	2172,1			

Tabela 29: Resultados da ANOVA para o deslocamento de placa

FV	GL	SQ	MQ	F	P-Valor
DP (tratamento)	1	0,231	0,231	1,57	0,225
Erro	20	2,946	0,147		
Total	21	3,176			

Tabela 30: Resultados da ANOVA para o deslocamento residual

FV	GL	SQ	MQ	F	P-Valor
DP (tratamento)	1	0,0752	0,0752	7,06	0,015
Erro	20	0,2130	0,0106		
Total	21	0,2882			

Tabela 31: Resultados da ANOVA para a resistência ao arrancamento lateral de tirefão

FV	GL	SQ	MQ	F	P-Valor
DP (tratamento)	1	8,00	8,00	2,00	0,173
Erro	20	80,12	4,01		
Total	21	88,12			

Tabela 32: Resultados da ANOVA para a resistência ao arrancamento normal de tirefão

FV	GL	SQ	MQ	F	P-Valor
DP (tratamento)	1	259,2	259,2	5,43	0,030
Erro	20	954,1	47,7		
Total	21	1213,2			

Tabela 33: Resultados da ANOVA para a dureza Janka

FV	GL	SQ	MQ	F	P-Valor
DP (tratamento)	1	706,4	706,4	11,22	0,003
Erro	20	1259,1	63,0		
Total	21	1965,5			