UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

José Francisco Resende da Silva

**CRUZETAS ALTERNATIVAS DE EUCALYPTUS
CITRIODORA E PINUS ELLIOTTII IMPREGNADAS
COM RESINA POLIURETANA A BASE DE OLEO DE
MAMONA SOBRE MANTA GEOSSINTÉTICA -
PROPRIEDADES ELÉTRICAS E MECÂNICAS.**

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da
Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para
a obtenção do título de Doutor em Ciências, Programa de
Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência
ORIENTADOR: Prof. Tit. Ruy Alberto Corrêa Altafim

São Carlos,

2015

¹ Trata-se da versão corrigida da tese. A versão original se encontra disponível na EESC/USP que aloja o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica

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

S586c Silva, José Francisco Resende da
Cruzetas alternativas de Eucalyptus Citriodora e
Pinus Elliottii impregnadas com resina poliuretanan a
base de óleo de mamona sobre manta geossintética -
propriedades elétricas e mecânicas / José Francisco
Resende da Silva; orientador Ruy Alberto Corrêa
Altafim. São Carlos, 2015.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas
Elétricos de Potência -- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, 2015.

1. Cruzetas. 2. Madeira. 3. Geotextil. 4. Resina
poliuretana derivada de óleo de mamona. 5. Distribuição
de energia. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **JOSÉ FRANCISCO RESENDE DA SILVA.**

Título da tese: "Cruzetas alternativas de *eucalyptus citriodora* e *pinus elliottii* impregnadas com resina poliuretana a base de óleo de mamona sobre manta geossintética – propriedades elétricas e mecânicas".

Data da defesa: 08/10/2015

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **Ruy Alberto Correa Altafim (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **Luiz Gonçalves Junior**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP - Bauru)

Aprovado

Prof. Associado **Hélio Tatizawa**
(Instituto de Energia e Ambiente/IEE - USP)

Aprovado

Prof. Associado **Ivan Nunes da Silva**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Associado **Rogério Andrade Flauzino**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

Este trabalho é dedicado aos meus Filhos Amanda e Erick, a Selma, minha esposa, a Francisco Henrique da Silva e Miriam Resende da Silva, meus pais, e a meus Irmãos queridos Marco Antonio e Paulo Cesar, que souberam compreender minha ausência, dando o seu fundamental apoio.

Ao Professor Dr. Ruy Alberto Corrêa Altafim, pela amizade e dedicação durante a orientação para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas de trabalho da Elektro: André Augusto Telles Moreira, Márcio Henrique Fernandes, Álvaro Luiz Murakami, Clarice Itokazu, Paulo de Tarso Gasparino de Souza, Thaisse Fernanda Pereira Garbelini, João Mazzon e Marcela Martins Ramos Costa pela fundamental colaboração e apoio durante os estudos e a elaboração deste trabalho.

Aos meus pais, Francisco Henrique da Silva e Miriam Resende da Silva, aos meus irmãos, Marco Antônio Resende da Silva e Paulo Cesar Resende da Silva, por todo apoio e confiança.

À minha esposa, Selma Cristina P. M. Resende da Silva, a minha filha querida, Amanda P. M. Resende da Silva e ao meu Filho querido Erick P. M. Resende da Silva que souberam compreender meus muitos momentos de ausência.

A todos os colegas, professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da EESC/USP, pela colaboração.

A ANEEL-Agencia Nacional de Energia Elétrica pelo estímulo a Pesquisa e Desenvolvimento com a visão do aprimoramento tecnológico do setor Elétrico Brasileiro.

A todos os colegas da Elektro, que sempre me incentivaram para que eu concluísse este trabalho.

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”.

Albert Einstein

Resumo

SILVA, J. F. R. Cruzetas alternativas de *Eucalyptus citriodora* e *Pinus elliottii* impregnadas com resina poliuretana a base de óleo de mamona sobre manta geossintética – Propriedades Elétricas e Mecânicas. 2015. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

Em todo o mundo, as redes aéreas de distribuição de energia elétrica levam energia a todos os consumidores. Parte destas redes utilizam cruzetas como meio de sustentação mecânica para cabos. Estas cruzetas podem atualmente ser produzidas em fibra de vidro, plásticos reciclados (Polietileno, Polipropileno de primeira produção) e outros materiais híbridos, usando polímeros e barras de aço para inserir resistência mecânica. Os custos destes materiais ainda são elevados e o seu processo de reciclagem ainda apresenta problemas no processo de logística reversa, impondo custos elevados.

Alguns países, como Noruega e Estados Unidos, usam cruzeta de madeira laminada com sucesso, como material alternativo em suportes de linhas de transmissão e de distribuição. A cruzeta tradicional de madeira nativa é ainda empregada no Brasil, com uso restrito às redes de distribuição de energia elétrica.

A aplicação contínua da madeira é atribuída principalmente ao baixo custo comparado com o de outros materiais empregados nos elementos do sistema de energia elétrica. Entretanto, considerações ambientais e baixa estimativa de vida da madeira têm mudado esta situação, conduzindo ao aumento de pesquisa nesta área. Neste trabalho foram discutidas duas espécies de madeira de reflorestamento, *Pinus elliottii* e *Eucalyptus citriodora*, impregnadas com resinas poliuretanas derivadas do óleo de mamona e revestidas com manta geotêxtil. Durante a execução dos trabalhos, foi detectada fragilidades mecânicas na madeira *Pinus elliottii*. Apenas a madeira *Eucalyptus citriodora* atende plenamente as necessidades do produto final.

É importante observar que a resina empregada é uma matéria prima totalmente nacional, e que esta pesquisa contribui para a sua aplicação no desenvolvimento de um novo produto (cruzetas de madeiras resinadas revestidas com geotêxtil), com tecnologia totalmente

brasileira, utilizando-se madeiras de reflorestamento, tipo *Eucalyptus Citriodora*. Estas cruzetas, além de respeitarem as leis ambientais, também apresentaram um excelente desempenho mecânico e elétrico, com ótimas perspectivas de instalações na rede de distribuição de energia elétrica, a um custo competitivo.

Este trabalho apresenta avanço significativo no aumento da vida útil destas madeiras, ampliando o tempo para substituições de cruzetas nas redes de distribuição de energia e contribuindo com a preservação da natureza.

Palavra Chave: cruzetas, madeira, geotêxtil, resina poliuretana derivada de óleo de mamona.

Abstract

SILVA, J. F. R. *Eucalyptus citriodora* and *Pinus elliottii* alternative crossarms impregnated with polyurethane resin castor oil based on geosynthetic blanket - Electrical and Mechanical Properties 2015. Ph.D thesis – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

Aerial distribution networks take energy to consumers worldwide. Part of these networks use cross arms as a means of mechanical support for cables. These cross arms can be currently produced on glass fiber, recycled plastics (polyethylene, polypropylene first production) and other hybrid materials, using polymers and inserting steel bars for mechanical strength. The costs of these materials are still elevated and its recycling process also presents problems in the reverse logistics process, imposing high costs.

In some countries, like Norway and USA, wood laminated cross arms have been used as an alternative material to support transmission and distribution lines with success, whereas traditional native wood cross arms are still used in Brazil restricted to energy distribution networks.

Wood application is continued mainly due to its low cost compared to other materials applied in the electric energy system. However, environmental considerations and low wood life time estimate have changed this situation leading to increased research in this area. In this work we discussed two types of wood reforestation, *Pinus elliottii* and *Eucalyptus citriodora*, impregnated with polyurethanes resins derived from castor oil and coated with a geotextile blanket.

It is important to observe that the resin employed is a national raw material, and that this research contributes to its application in the development of a new product (cross arms of resinous woods lined with a geotextile blanket) with complete Brazilian technology, using reforested wood, type *Eucalyptus citriodora*. These cross arms not only comply with environmental laws, but also present an excellent mechanical and electrical performance with great installation perspectives in the electricity distribution network at a competitive cost.

This paper presents a significant step forward in increasing the life of these woods, extending time to cross arm replacements in power distribution networks, and contributing to nature preservation.

Keywords: cross arms, wood, geotextile, polyurethane resin derived from castor oil.

Lista de figuras

FIGURA 2.1: Cadeias com baixa densidade de ligações cruzadas, ex: borrachas vulcanizadas [9].....	37
FIGURA 2.2: Usina hidrelétrica Marmelos – Minas Gerais.....	40
FIGURA 2.3: Largo da Pólvora Belém – Pará.....	41
FIGURA 2.4: Estrutura básica para a construção de sistemas aéreos no Brasil.....	41
FIGURA 2.5: Rede aérea nua.....	42
FIGURA 2.6: Formato estrutural de rede compacta com circuito duplo.. ..	44
FIGURA 2.7: Espaçador para sustentação de cabos em rede protegida compacta.. ..	45
FIGURA 2.8: Separador para sustentação de cabos em rede protegida compacta.....	45
FIGURA 2.9: Rede protegida compacta e rede com condutores nus.....	46
FIGURA 2.10: Rede Aérea com cabo pré-reunido de média tensão.....	47
FIGURA 2.11: Rede Aérea – Estrutura com Isolador Tipo Pilar.....	49
FIGURA 2.12: Rede Aérea – Estruturas para MRT.....	50
FIGURA 2.13: Fotografia comparativa de condomínio com rede convencional nua (esquerda) e rede subterrânea (direita) [24].. ..	52
FIGURA 2.14: Produção de cruzeta em Fibra de Vidro.. ..	55
FIGURA 2.15: Estrutura de suporte de linha de transmissão do tipo “H” [30].. ..	56
FIGURA 2.16: Método de ensaio de rigidez mecânica em cada cruzeta.. ..	58
FIGURA 2.17: Tensão de ruptura normalizada versus frequência, para cruzetas: forte (“strong”), fraca (“weak”) e muito fraca (“mediocre”).. ..	58
FIGURA 2.18: Estruturas de madeira laminada em linhas de transmissão de 132 kV, instaladas nas regiões de: (a) “Grana-Orkdal”; e (b) “Brattset”.....	61
FIGURA 2.19: Fundação de concreto e ferro de algumas estruturas de madeira laminada.....	61
FIGURA 2.20: Tipos de laminação: (a) na horizontal; e (b) na vertical.....	63
FIGURA 2.21: Ensaio na cruzeta.....	64
FIGURA 2.22: Comparação da deflexão entre a cruzeta de madeira maciça (SS) e a cruzeta de madeira laminada (LAM).. ..	65
FIGURA 3.1: Resina RI 3 e seus compósitos: RI 3 C10, RI 3 C15 e RI 3 C20, preparados no mesmo dia em moldes de vidro.....	70
FIGURA 3.2: Obtenção dos corpos de prova: (a) Dispositivos de corte para os ensaios de resistência à rasgo e tração mecânica; e (b) prensa hidráulica.....	70
FIGURA 3.3: Corpos de provas para os ensaios mecânicos.....	71
FIGURA 3.4: Corpo de prova confeccionado com a resina RI 3 com problema de umidade... ..	72
FIGURA 3.5: Condicionamento das cruzetas de madeira antes da impregnação com a resina.....	72
FIGURA 3.6: Pesagem de 150 g de poliol.....	73

FIGURA 3.7: Acréscimo de 100 g de pré-polímero...	73
FIGURA 3.8: Agitador à vácuo...	74
FIGURA 3.9: Acréscimo de 50 gramas de sílica no polioli, para a formação do compósito	74
FIGURA 3.10: Aplicação da resina RI 3 sobre a cruzeta de 2,4 m, na parte: (a) superior; e (b) lateral..	75
FIGURA 3.11: Impregnação do furo da cruzeta: (a) no início; (b) no meio; (c) final;e (b) retirada...	75
FIGURA 3.12: Furo com excesso de resina.....	76
FIGURA 3.13: Cruzeta de madeira de Pinus elliotti impregnada com a resina poliuretana derivada do óleo de mamona.....	76
FIGURA 3.14: Cruzeta de madeira de Eucalipto citriodora impregnada com a resina poliuretana derivada do óleo de mamona.....	77
FIGURA 3.15: Preparação das cruzetas: (a) sem resina; e (b) com resina.....	77
FIGURA 3.16: Cruzetas impregnadas com resina RI 3 e revestida com geotêxtil, em tira e em manta: (a) vista A; e (b) vista B...	78
FIGURA 4.1: Ensaio de tração mecânica na resina poliuretana RI 3...	82
FIGURA 4.2: Corpos de prova da resina RI 3 após a ruptura: (a) na máquina de ensaio; e (b) numerados.....	83
FIGURA 4.3: Variação da deformação específica do dispositivo de ensaio com a tensão de tração da resina RI 3 sem carga, após 120 horas de cura.....	84
FIGURA 4.4: Variação da deformação específica do dispositivo de ensaio com a tensão de tração da resina RI 3 com carga, após 120 horas de cura, na proporção de 1: 0,10.....	85
FIGURA 4.5: Variação da deformação específica do dispositivo de ensaio com a tensão de tração da resina RI 3 com carga, após 120 horas de cura, na proporção de 1: 0,15.....	86
FIGURA 4.6: Variação da deformação específica do dispositivo de ensaio com a tensão de tração da resina RI 3 com carga, após 120 horas de cura, na proporção de 1: 0,20.....	87
FIGURA 4.7: Valores médios da tensão de tração e do módulo de elasticidade (Módulo de Young) da resina RI 3 com e sem carga, após 120 horas de cura...	88
FIGURA 4.8: Ensaio de resistência ao rasgo na resina poliuretana RI 3: (a) Máquina Universal de ensaio; e (b) detalhe da garra.....	89
FIGURA 4.9: Corpos de prova utilizados no ensaio de resistência ao rasgo: (a) dimensões da norma [8]; e (b) de resina poliuretana RI 3.....	90
FIGURA 4.10: Corpo de prova da resina RI 3 durante a ruptura.....	90
FIGURA 4.11: Variação da deformação específica do dispositivo de ensaio com a força máxima aplicada na resina RI 3 sem carga, após 120 horas de cura.....	91
FIGURA 4.12: Variação da deformação específica do dispositivo de ensaio com a força máxima aplicada na resina RI 3 com carga após 120 horas de cura, na proporção de 1: 0,10...	92

FIGURA 4.13: Variação da deformação específica do dispositivo de ensaio com a força máxima aplicada na resina RI 3 com carga após 120 horas de cura na proporção de 1: 0,15....	93
FIGURA 4.14: Variação da deformação específica do dispositivo de ensaio com a força máxima aplicada na resina RI 3 com carga após 120 horas de cura na proporção de 1: 0,20....	95
FIGURA 4.15: Força máxima aplicada na resina RI 3 com carga após 120 horas de cura..	95
FIGURA 4.16: Corpos de prova utilizados no ensaio de dureza mecânica...	96
FIGURA 4.17: Aparelho de medir a dureza do material, escala Shore D, conforme ASTM D2240 ...	97
FIGURA 4.18: Dureza mecânica na resina RI 3 com e sem carga...	98
FIGURA 4.19: Variação da dureza mecânica na resina RI 3 com e sem carga...	98
FIGURA 4.20: Variação da deformação específica do dispositivo de ensaio com a tensão de tração da resina RI 3, após 3 meses de cura.....	100
FIGURA 4.21: Variação da deformação específica do dispositivo de ensaio com a tensão de tração da resina RI 3C10, após 3 meses de cura, na proporção de 1: 0,10 (resina:carga).....	101
FIGURA 4.22: Variação da deformação específica do dispositivo de ensaio com a tensão de tração da resina RI 3C15, após 3 meses de cura....	104
FIGURA 5.1: Corpos de prova de madeira resinada, utilizados no ensaio de tração mecânica.....	104
FIGURA 5.2: Variações críticas de temperatura (T) e umidade (“r.F.”): (a) corpos de prova dentro da câmara; e (b) ciclo de variação de 24 horas.....	105
FIGURA 5.3: Ensaio de tração mecânica na resina poliuretana RI 3: (a) Máquina Universal de Ensaios DARTEC; e (b) software DARTEC LTD.....	106
FIGURA 5.4: Medição das dimensões dos corpos de prova de madeira impregnada com resina RI 3 com carga.....	106
FIGURA 5.5: Uso do microscópio na observação da superfície dos corpos de prova.....	107
FIGURA 5.6: Fotografias microscópicas dos corpos de prova de madeira resinada: (a) antes; e (b) depois.....	107
FIGURA 6.1: Cruzeta de 2,40 metros de comprimento.....	112
FIGURA 6.2: Dispositivo do ensaio de flexão mecânica na cruzeta: (a) pontos importantes; e (b) medições realizadas.....	113
FIGURA 6.3: Medição da espessura do revestimento de resina nas cruzetas de madeira: (a) micrômetro utilizado; e (b) de eucalipto citriodora; e (c) de Pinus elliottii.....	115
FIGURA 6.4: Cruzeta de madeira de 2,4 m de Eucalipto citriodora tratada e impregnada com a resina RI 3.....	118
FIGURA 6.5: Cruzeta de madeira de 2,4 m de Citriodora tratada e não impregnada com a resina RI 3: (a) ensaio de ruptura; e (b) cruzeta rompida.....	118
FIGURA 6.6: Cruzeta de 2,4 m de madeira de Pinus Elliottii: (a) sob ensaio de ruptura; e (b) ponto de ruptura no centro da cruzeta..	121

FIGURA 6.7: Cruzeta de 2,4 m de madeira de <i>Pinus Elliottii</i> impregnada com a resina: (a) sob ensaio de ruptura; e (b) ponto de ruptura no centro da cruzeta.....	121
FIGURA 6.8: Cruzeta de madeira de <i>Pinus Elliottii</i> na balança: (a) PTCGT; e (b) PTCGM.....	125
FIGURA 6.9: Cruzeta de 2,4 m de madeira de <i>Pinus Elliottii</i> , PTCGT: (a) aplicação de 400 kgf; (b) aplicação de 560 kgf; (c) medição da flexão; e (d) ponto de ruptura no centro da cruzeta.....	126
FIGURA 6.10: Cruzeta de 2,4 m de madeira de <i>Pinus Elliottii</i> , PTCGM: (a) aplicação de 400 kgf; (b) aplicação de 560 kgf; (c) medição da flexão; e (d) ponto de ruptura no centro da cruzeta.	126
FIGURA 6.11: Cruzeta de 2,4 m de madeira de <i>Pinus Elliottii</i> , PT: (a) aplicação de 400 kgf; (b) aplicação de 560 kgf; (c) flecha no momento da ruptura; e (d) ponto de ruptura no centro da cruzeta.....	127
FIGURA 6.12: Simulação da cruzeta de madeira no ANSYS.	130
FIGURA 7.1: Permissividade elétrica relativa da resina RI 3 sem carga e com carga na proporção 1:0,20.....	132
FIGURA 7.2: Condutividade elétrica da resina RI 3 sem carga e com carga na proporção 1:0,20....	133
FIGURA 7.3: Ensaio de NBI (Nível Básico de Impulso) nas cruzetas revestidas com a resina poliuretana: (a) sistema de 140 kV; e (b) ponto de aplicação.....	134
FIGURA 7.4: Ensaio de NBI (Nível Básico de Impulso) nas cruzetas revestidas com a resina poliuretana: (a) sistema de 140 kV; e (b) pontos de aplicação.....	134
FIGURA 7.5: Cruzeta de madeira revestida com a resina poliuretana RI 3 (sem carga): (a) com o pino do isolador; e (b) sem o pino do isolador... ..	138
FIGURA 7.6: Cruzeta de Madeira cortada na EESC – USP: (a) 2,4 metros; and (b) pedaço da cruzeta próximo ao furo; (c) vista A; e (d) vista B... ..	139
FIGURA 7.7: Pedaço da cruzeta de madeira antes da impregnação: (a) vista dos dois furos; e (b) vista de um furo.....	140
FIGURA 7.8: Cinco amostras de pedaços da cruzeta de madeira depois da impregnação... ..	140
FIGURA 7.9: Verificação da suportabilidade elétrica: (a) corpo de prova sob tensão elétrica; (b) outras amostras dentro da câmara; (c) porta de acesso à câmara; e (d) quadro de comando para diferentes condições.....	142
FIGURA 7.10: Câmara de climatização: (a) montagem; e (b) parte interna.....	142
FIGURA 7.11: Montagem do ensaio de descarga parcial: (a) primeiro; (b) segundo; e (c) tinta condutiva e pincel; e (d) corpo de prova com camada de tinta condutiva dentro do furo... ..	142
FIGURA 7.12: Circuito do ensaio de descarga parcial... ..	143
FIGURA 7.13: Descarga parcial: (a) equipamento; e (b) instrumento de calibração... ..	143
FIGURA 7.14: Descargas parciais... ..	146

FIGURA 7.15: Montagem diferente: (a) corpo de prova com a camada de tinta condutiva; e (b) ruptura da amostra após 2 minutos sob 15,0 kV.....	148
FIGURA 7.16: Forma de onda típica: (a) normal; (b) descarga parcial externa; e (c) início da descarga parcial interna... ..	150
FIGURA 8.1: Protótipos de cruzetas de madeira resinadas enviadas para a Empresa Elektro Eletricidade e Serviço S.A.....	155

Lista de tabelas

TABELA 2.1: Tabela de resistência mecânica das Cruzetas de madeira.....	43
TABELA 2.2: Comparativo de custo modular por tipo de rede.....	53
TABELA 3.1: Preços médios das cruzetas de 2,4 metros... ..	79
TABELA 4.1: Ensaio de tensão de tração após 120 horas de cura da resina sem carga.....	84
TABELA 4.2: Ensaio de tensão de tração após 120 horas de cura da resina com carga na proporção de 1:0,10 (resina: carga).. ..	85
TABELA 4.3: Ensaio de tensão de tração após 120 horas de cura da resina com carga, na proporção de 1:0,15 (resina: carga)... ..	86
TABELA 4.4: Ensaio de tensão de tração após 120 horas de cura da resina, na proporção de 1:0,20 (resina: carga)... ..	87
TABELA 4.5: Valores médios da resina RI 3 e de seus compósitos, após 120 horas de cura.....	88
TABELA 4.6: Resistência ao rasgo após 120 horas de cura da resina sem carga.....	91
TABELA 4.7: Resistência ao rasgo após 120 horas de cura da resina com carga na proporção de 1:0,10 (resina: carga)... ..	92
TABELA 4.8: Resistência ao rasgo após 120 horas de cura da resina com carga na proporção de 1:0,15 (resina: carga)... ..	93
TABELA 4.9: Resistência ao rasgo após 120 horas de cura da resina com carga na proporção de 1:0,20 (resina: carga)... ..	94
TABELA 4.10: Valores médios dos ensaios de resistência ao rasgo, após 120 horas de cura.....	95
TABELA 4.11: Dureza mecânica da resina RI 3 com e sem carga, após 120 horas de cura... ..	97
TABELA 4.12: Ensaio de tensão de tração após 3 meses de cura da resina sem carga (RI 3).....	99
TABELA 4.13: Ensaio de tensão de tração após 3 meses de cura da resina, na proporção de 1:0,10 (resina: carga), RI 3C10... ..	100
TABELA 4.14: Ensaio de tensão de tração após 3 meses de cura da resina, na proporção de 1:0,15 (resina: carga), RI 3C15... ..	101
TABELA 5.1: Ensaio de tensão de tração na madeira resinada antes do envelhecimento... ..	108
TABELA 5.2: Ensaio de tensão de tração na madeira resinada depois do envelhecimento... ..	108
TABELA 6.1: Resistência à flexão mecânica de 400 kgf , Eucalipto citriodora... ..	116
TABELA 6.2: Resistência à flexão mecânica de 560 kgf , Eucalipto citriodora.	117
TABELA 6.3: Resistência de ruptura à flexão mecânica, no lado B, Eucalipto citriodora.	117
TABELA 6.4: Resistência à flexão mecânica de 400 kgf , Pinus elliottii.	119
TABELA 6.5: Resistência à flexão mecânica de 560 kgf , Pinus elliottii.	120
TABELA 6.6: Resistência de ruptura à flexão mecânica, Pinus elliottii.....	120
TABELA 6.7: Resistência à flexão mecânica para a força de 400 kgf	123

TABELA 6.8: Resistência à flexão mecânica para a força de 560 kgf. ..	124
TABELA 6.9: Resistência de ruptura à flexão mecânica...	124
TABELA 6.10: Massas das cruzetas de <i>Pinus elliottii</i>	125
TABELA 6.11: Simulados da cruzeta de madeira de <i>Eucalipto citriodora</i>	129
TABELA 6.12: Simulados da cruzeta de madeira de <i>Pinus elliottii</i>	129
TABELA 7.1: Ensaio de Tensão de Impulso na cruzeta de madeira (sem resina), no ponto 1.....	135
TABELA 7.2: Ensaio de Tensão de Impulso na cruzeta de madeira com resina pura (sem carga), no ponto 1.....	135
TABELA 7.3: Ensaio de Tensão de Impulso na cruzeta de madeira com resina (sem carga), no ponto 2.....	136
TABELA 7.4: Ensaio de Tensão de Impulso na cruzeta de madeira com resina (sem carga), no ponto 3.....	136
TABELA 7.5: Ensaio de Tensão de Impulso na cruzeta de madeira com resina com carga (na proporção de 1:0,20), no ponto 1.....	136
TABELA 7.6: Ensaio de Tensão de Impulso na cruzeta de madeira com resina com carga (na proporção de 1:0,20), no ponto 2.....	137
TABELA 7.7: Ensaio de Tensão de Impulso na cruzeta de madeira com resina com carga (na proporção de 1:0,20), no ponto 3.....	137
TABELA 7.8: Valores médios obtidos no ensaio de tensão de impulso de ruptura realizado nas cruzetas de madeira de 2,4 metros.....	137
TABELA 7.14: Peça da cruzeta de madeira, 1ª condição... ..	144
TABELA 7.15: Peça da cruzeta de Madeira de 2.4 metros, 2ª condição... ..	144
TABELA 7.16: Peça da cruzeta de madeira, 3ª condição... ..	145
TABELA 7.17: Peça da cruzeta de madeira, 4ª condição... ..	145
TABELA 7.18: Resumo dos primeiros resultados do ensaio de descarga parcial nos pedaços de madeira.	146
TABELA 7.19: Peça da cruzeta de madeira, 5ª condição.. ..	147
TABELA 7.20: Peça da cruzeta de madeira, 6ª condição... ..	148
TABELA 7.21: <i>Características Elétricas de madeiras Pinus com revestimento e sem revestimento com manta geotêxtil</i>	149
TABELA 7.22: Alteração da posição da amostra com camada condutiva dentro do furo no ensaio de descarga parcial... ..	150

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: Introdução...	27
CAPÍTULO 2: Pesquisa bibliográfica...	31
2.1 Introdução...	31
2.2 Óleo de mamona e as resinas poliuretanas...	31
2.2.1 Óleo de Mamona...	31
2.2.2 Aspecto agrícola e o mercado nacional....	32
2.2.3 Mercado mundial....	34
2.2.4 Resina poliuretana derivada do óleo de mamona....	35
2.3 Cargas e as propriedades de polímeros....	36
2.3.1 Introdução...	36
2.3.2 Cargas....	36
2.3.3 Propriedades dos Polímeros.....	37
2.3.3.1 Introdução.....	37
2.3.3.2 Propriedades mecânicas.....	38
2.3.3.3 Propriedades elétricas.....	38
2.4 Sistemas de Distribuição de Energia.....	39
2.4.1 Introdução.....	39
2.4.2 Redes Nuas....	40
2.4.3 Rede Protegida Compacta.....	44
2.4.4 Rede com cabos pré-reunidos de média tensão....	47
2.4.5 Redes utilizando isoladores tipo Pilar.....	48
2.4.6 Redes MRT (Monofásicas com Retorno por Terra)....	49
2.4.7 Redes Subterrâneas....	50
2.4.8 Comparativo de custos entre redes de distribuição.....	52
2.4.9 Tendências de implantação de sistemas de distribuição no Brasil....	53
2.4.10 Polímeros em sistemas elétricos de energia.....	53
2.5 Estudos sobre cruzetas de madeira laminada.....	55
2.5.1 Introdução.....	55
2.5.2 Avaliação da integridade da cruzeta de madeira por meio da utilização de redes neurais artificiais e medidor de vibração a laser.....	55
2.5.2.1 Geral.....	55
2.5.2.2 Método de inspeção.....	56
2.5.2.3 Vibração da madeira.....	57

2.5.2.4 Medição no campo....	57
2.5.3 Estrutura de madeira laminada nas linhas de transmissão da Noruega [35].....	58
2.5.3.1 Geral....	58
2.5.3.2 Argumentos para o uso de madeira laminada.....	59
2.5.3.3 Madeira laminada como material de linhas de transmissão....	59
2.5.4 Comparação das cruzetas de madeira maciça de “Douglas fir” versus as cruzetas de madeira laminada	62
2.5.4.1 Geral	62
2.5.4.2 Economia.	63
2.5.4.3 Projeto.	63
2.5.4.4 Ensaios.....	64
2.5.4.5 Resultados.	65
2.5.4.6 Conclusão da comparação.	66
2.6 Geossintéticos....	66
2.6.1 Geotexteis....	67
2.6.2 Geomembrana.....	67
CAPÍTULO 3: Processamento da resina e impregnação das cruzetas de madeira reflorestamento..	69
3.1 Introdução....	69
3.2 Confeção dos corpos de prova para caracterização da resina e de seus compósitos.....	70
3.3 Processamento da resina e sua impregnação das cruzetas madeira de reflorestamento.	72
3.4 Impregnação das cruzetas de madeira com a resina RI 3 e revestimento com o material geotêxtil....	77
3.5 Preços estimados das cruzetas de madeira de reflorestamento resinadas, de 2,4 metros....	78
CAPÍTULO 4: Ensaios mecânicos na resina poliuretana derivada do óleo de mamona - RI 3.	81
4.1 Introdução....	81
4.2 Ensaio de tração mecânica na resina, após 120 horas de tempo de cura.	81
4.2.1 Objetivo do ensaio de tração.	82
4.2.2 Procedimentos do ensaio de tração.....	82
4.2.3 Resultados do ensaio de tração mecânica realizada na resina RI 3 com e sem carga, após 120 h de tempo de cura.	82
4.3 Ensaio de resistência ao rasgo, após 120 h de tempo de cura.	89
4.3.1 Objetivo do ensaio de resistência ao rasgo....	89
4.3.2 Procedimentos do ensaio de resistência ao rasgo.	89
4.3.3 Resultados do ensaio de resistência ao rasgo, após 120 h de tempo de cura.....	90
4.4 Ensaio de dureza mecânica na resina, após 120 h de tempo de cura....	96

4.4.1	Objetivo do ensaio de dureza.....	96
4.4.2	Procedimentos do ensaio de dureza.	96
4.4.3	Resultado do ensaio de dureza realizado na resina RI 3.	97
4.5	Ensaio de tração mecânica na resina RI 3 com e sem carga, após três meses de cura.	98
4.5.1	Ensaio de tração mecânica na resina com carga, após três meses de tempo de cura. .	98
4.5.2	Resultados do ensaio de tração mecânica realizada na resina RI 3 com diferentes proporções de carga, após três meses de tempo de cura.	99
4.6	Conclusão.....	102

CAPÍTULO 5: Ensaio de tração mecânica na madeira resinada submetida às diferentes condições climáticas. 103

5.1	Introdução.....	103
5.2	Procedimentos do ensaio de tração mecânica na madeira resinada.	105
5.3	Resultados do ensaio de flexão mecânica realizado na madeira impregnada com o compósito da resina RI 3....	107
5.4	Conclusão.	108

CAPÍTULO 6: Ensaios mecânicos nas cruzetas de madeira impregnadas com a resina poliuretana - RI 3. 111

6.1	Introdução.	111
6.2	Ensaio de flexão mecânica nas cruzetas de madeira impregnadas com a resina poliuretana derivada do óleo de mamona, do tipo RI 3.	111
6.2.1	Objetivo do ensaio.	111
6.2.2	Procedimentos do ensaio de flexão mecânica nas cruzetas.	114
6.2.3	Corpos de prova.	114
6.2.4	Resultados dos ensaios na cruzeta de Eucalyptus citriodora....	115
6.2.5	Resultados dos ensaios na cruzeta de Eucalyptus citriodora....	118
6.2.6	Conclusão do ensaio da cruzeta impregnada coma resina RI 3....	121
6.3	Ensaio de flexão mecânica nas cruzetas de madeira resinadas e revestidas com material geotêxtil.	122
6.3.1	Introdução.	122
6.3.2	Procedimentos do ensaio de flexão mecânica nas cruzetas.	122
6.3.3	Resultados do ensaio de flexão mecânica nas cruzetas impregnadas e revestidas	123
6.3.4	Conclusão do ensaio de flexão nas cruzetas impregnadas e revestidas.	127
6.4	Simulação computacional com a utilização do Método de Elementos Finitos.	128
6.4.1	Geral.	128

CAPÍTULO 7: Ensaio elétrico na resina RI 3 e nas cruzetas de madeira resinadas.....	131
7.1 Introdução.....	131
7.2 Permissividade dielétrica da resina RI 3.	131
7.2.1 Corpos de prova.	131
7.2.2 Resultados dos ensaios elétricos na resina poliuretana derivada do óleo de mamona, RI 3.	132
7.3 Ensaio de NBI (Nível Básico de Impulso) em cruzetas de madeira revestidas com a resina RI 3.....	133
7.3.1 Objetivo do ensaio de NBI.....	133
7.3.2 Procedimentos do ensaio de NBI.....	133
7.3.3. Resultado do ensaio de NBI nas cruzetas.....	134
7.4 Ensaio elétrico de descarga parcial em pedaços de cruzetas de madeira resinadas....	138
7.4.1 Procedimento do ensaio de descarga parcial nos pedaços da cruzeta de madeira resinada.....	138
7.4.2 Resultados do ensaio de descarga parcial.....	143
7.4.3 Ensaio Elétricos em madeiras com e sem revestimento com mana geotêxtil	150
7.4.8 Conclusão sobre o ensaio de descarga parcial.....	150
 CAPÍTULO 8: Conclusões.....	 153
8.1 Conclusões.....	153
8.2 Trabalhos futuros.....	155
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..	 157
 ANEXO A - LISTA DE EQUIPAMENTOS.....	 163
 ANEXO B - ARTIGOS PÚBLICADOS EM REVISTA E CONGRESSO	 169
 ANEXO C - PEDIDO DE PATENTE.....	 189

Capítulo 1

Introdução

Esta tese tem como base o estudo e a análise das propriedades elétricas e mecânicas das madeiras *Pinus elliottii* e *Eucalyptus citriodora*, impregnadas com resina poliuretana derivada de óleo de mamona e revestidas com manta geotêxtil, com vista a obtenção de uma cruzeta alternativa para o sistema elétrico de distribuição de energia com menor impacto ambiental.

As cruzetas de madeira são utilizadas como meio de sustentação mecânica para isoladores e cabos de distribuição de energia elétrica. Nos últimos anos, problemas com a qualidade e durabilidade das cruzetas desencadearam estudos para seu aprimoramento, focados principalmente nos custos, legislação ambiental e vida útil.

Os custos envolvidos na substituição de uma cruzeta antes do término de seu ciclo de vida útil são altos e provocam transtornos aos consumidores por causa de desligamentos indesejáveis.

Pesquisas de inovação tecnológica, novos materiais e novos equipamentos, com maior durabilidade e maior suportabilidade elétrica e/ou mecânica, vêm contribuindo sobremaneira para a redução do DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Consumidor) e do FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Consumidor). O que assegura uma melhor qualidade no fornecimento de energia. Seguindo as tendências de países como a Noruega [1] e Estados Unidos [2], que também enfrentam leis de restrições ambientais ao uso de madeiras nativas puro cerne, este trabalho abordou o problema das cruzetas de madeira usadas nos sistemas de distribuição, os principais são [3]:

- Material fundamentalmente heterogêneo e anisotrópico;
- Vulnerável a ataque de agentes externos, com durabilidade limitada caso não passem por tratamento preservativo;
- No seu estado natural (sem preservativos), apresenta sensibilidade ao ambiente, aumentando ou reduzindo suas dimensões de acordo com as variações de umidade.

Aqui, foram desenvolvidas cruzetas com madeiras de reflorestamento, de tipo *Eucalyptus citriodora* e *Pinus elliottii* recobertas com resina poliuretana derivada do óleo de mamona [4, 5], cujos ensaios asseguraram excelentes características elétricas e mecânicas, que atendem as exigências das normas NBR 5433 [6] e NBR 5434 [7] dos sistemas de distribuição de energia elétrica. Nesse sentido, já foram construídos os primeiros protótipos para serem instalados na rede da área de teste da empresa Elektro Eletricidade e Serviços S.A., a fim de verificar seu desempenho no campo.

Em relação à engenharia elétrica, **não há pesquisas específicas da aplicação de tais resinas em cruzetas de madeira, o que mostra a importância desta Tese.**

Este trabalho atingiu o seu objetivo ao desenvolver novas cruzetas de madeira de reflorestamento, utilizando *Pinus elliottii* e *Eucalyptus citriodora*, impregnadas com resina poliuretana derivada de óleo de mamona sobre material geotêxtil e realizando a análise das propriedades elétricas e mecânicas destas por meio de ensaios em protótipos de cruzetas de 2,4 metros, realizados nas dependências da Escola de Engenharia de São Carlos, e também pelo ensaio de descarga parcial sob diferentes condições de temperatura e umidade relativa do ar nos corpos de prova de pedaços da cruzeta de madeira resinada, realizado no Laboratório de Alta Tensão da Universidade Técnica de Graz, na Áustria.

Para melhor compreensão, esta tese está dividida em nove capítulos, descritos a seguir.

No capítulo 2, encontra-se uma análise bibliográfica sobre:

- **Óleo de mamona e as resinas poliuretanas**, onde são descritos aspectos dos mercados nacional e internacional da mamona, do seu óleo, e de suas resinas derivadas;
- **Cargas e as propriedades dos polímeros**, onde são apresentados os diferentes tipos de cargas adicionadas em polímeros e as principais propriedades analisadas;
- **Sistema de distribuição de energia**, onde são apresentados os principais tipos de instalações do sistema elétrico de distribuição, incluindo-se o emprego das cruzetas de madeira; e
- **Cruzetas de madeira laminada**, empregadas nas linhas de distribuição e de transmissão em diferentes países, como Noruega e Estados Unidos. Os métodos de inspeção nesse tipo de cruzeta e a aplicação já consolidada desse tipo de cruzeta de madeira também são abordados.

No capítulo 3, são apresentados os processos de preparação: da resina e de sua impregnação na cruzeta de madeira; do revestimento das cruzetas com um material geotêxtil de poliéster, na forma de tiras e de manta; e dos corpos de prova da resina e de seus compósitos para sua caracterização. A **estimativa** de custo das cruzetas de madeira de reflorestamento resinada desenvolvida neste projeto também é descrita neste capítulo.

Os procedimentos e os resultados dos ensaios mecânicos realizados na caracterização da resina poliuretana derivada do óleo de mamona RI 3 com diferentes proporções de carga (sílica) após cento e vinte horas e após três meses de cura são expostos no capítulo 4.

No capítulo 5, são descritos os ensaios realizados nos corpos de prova de madeira impregnados com o compósito da resina RI 3 para verificar o seu desempenho, antes e depois de eles serem submetidos à câmara de climatização sob o ciclo descrito na norma IEC 60068-2-38.

No capítulo 6, são apresentados os resultados da simulação computacional em cruzetas de 2,4 metros, e os ensaios de flexão mecânica realizados nas cruzetas de madeira de *Eucalyptus citriodora* e de *Pinus elliottii*, conforme a especificação da norma técnica. Também é apresentada a análise das propriedades mecânicas das cruzetas de madeira resinadas e revestidas com o material geotêxtil em tiras e em manta, por meio do ensaio de flexão.

No capítulo 7, encontram-se descritas as análises das características elétricas da resina RI 3, o comportamento das novas cruzetas sob tensão de impulso e os ensaios de descarga parcial realizados nos pedaços de cruzetas de madeira de *Eucalyptus citriodora*, sob diferentes condições de temperatura e de umidade relativa do ar. Também é descrito os resultados de ensaios elétricos em cruzetas de pinus revestidas com manta geotêxtil.

No capítulo 8, são apresentadas as conclusões finais desta tese, juntamente com as descrições de trabalhos futuros sobre cruzetas de madeira para o sistema de distribuição de energia elétrica e outros elementos estruturais em uso pela sociedade.

Anexo a este trabalho, encontram-se a relação dos equipamentos utilizados nos ensaios elétricos e mecânicos (Anexo A) descritos nesta tese, dois artigos publicados em revista e um artigo internacional apresentado em congresso (Anexo B), conforme descrito abaixo:

1. Assagra, Y.A.O.; Altafím, R.A.P.; **Silva**, J.F.R.; Basso, H.C; Lahr, F.A.R.; Altafím, R.A.C; Ferreira, O.P, 2010. *Novo compósito de Madeira-Geotextil-Resina poliuretana para sistenas de distribuição de Energia* . In: 2010- IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition:Latin America. November, São Paulo, Brasil.
2. Assagra, Y.A.O.; Altafím, R.A.P.; **Silva**, J.F.R.; Basso, H.C; Lahr, F.A.R.; Altafím, R.A.C., 2013. Laminated Composite Based on Polyester Geotextile Fibers and Polyurethane Resin for Coating Wood Structures. *Materials Research Magazine, São Carlos, Brazil, September-October 2013, vol. 16, no. 5, pp. 1140-1147.*
3. **Silva**, J.F.R; Altafím, R.A.C.; Hirakawa, A.R., 2015. Crossarms identification with Adaptive Digital Image Processing. In: 2015-International Journal of Computer Applications, July 2015, vol 121, no 23, pp. 35-39.

Capítulo 2

Pesquisa Bibliográfica

2.1 Introdução

No estudo das propriedades elétricas e mecânicas das madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus citriodora*, impregnadas com resina poliuretana derivada de óleo de mamona, e das estruturas de distribuição, foram abordadas inúmeras literaturas, divididas, para maior facilidade, nos seguintes tópicos:

- Óleo de mamona e as resinas poliuretanas;
- Cargas e as propriedades dos polímeros;
- Sistemas de distribuição de energia; e
- Cruzetas de madeira laminada em outros países.
- Geossintéticos
- *Pinus elliottii* e *Eucalyptus citriodora*

2.2 Óleo de mamona e as resinas poliuretanas

2.2.1 Óleo de Mamona

A semente da mamona contém 50-55 % do óleo conhecido como óleo de mamona ou óleo de rícino [8]. Ele é usado em várias áreas da tecnologia e da medicina, e novas áreas estão constantemente incorporando-o às suas necessidades.

Devido à sua composição e propriedades, o óleo de mamona difere dos outros óleos vegetais. Ele é viscoso, dissolve vagarosamente no petróleo e em outros solventes orgânicos, e origina um importante lubrificante para motores que trabalham sob condições extremas de temperaturas, por exemplo, motores de avião.

Na França, Itália, Brasil, Grã-Bretanha e outros países, há muitos empreendimentos com o óleo de mamona, voltados a produzir material têxtil artificial. Deste óleo obtêm-se também produtos de perfumaria, bronzeadores e objetos de plásticos em geral.

Na Rússia [9] estudos sobre a coleção das espécies de mamonas foram iniciados por G.M. Popova em 1922, na Ásia Central. Estimam-se mais de 1200 tipos de espécies e subespécies. E, neste país, a subespécie *communis* (*earlier sanguineus*), *Persian* e *Chinese* são os mais importantes.

No Brasil, a espécie *Ricinus Communis L.* é a mais comum. Ela é uma planta oleaginosa, arbustiva, da família das Euforbiáceas [9]. Seu país de origem é, ainda hoje, motivo de controvérsias, havendo autores que afirmam ser a Ásia e outros, a África. É uma planta conhecida desde tempos remotos, tendo sido encontradas sementes em sarcófagos egípcios, há mais de 4.000 anos.

Segundo [9] a subespécie *communis* origina da região sudoeste da Ásia, e se espalhou ao longo da margem do mar Mediterrâneo e sobre o continente americano. Ela é valiosa por suas sementes grandes, resistência à seca, alta produção e pela grande quantidade de óleo. Muitas dessas subespécies requerem muito calor e possuem alta resistência ao apodrecimento, durante tempos úmidos.

A especialidade do óleo de mamona reside no fato de que 81-96 % de sua composição consiste em glicerídeos de ácido ricinoleico ($C_{18}H_{34}O_3$), que é o principal componente do óleo de mamona, formado pelo ácido oleico com uma hidroxila no 12^o carbono. Essa particularidade torna o óleo de mamona único em relação a todos os outros óleos vegetais e animais, conferindo-lhe certas peculiaridades de comportamento e aplicação. Isso possibilita a produção de derivados específicos nas reações com sua hidroxila.

O grupo de hidroxila no óleo de mamona [8] explica esta única combinação das propriedades físicas, relativa viscosidade alta, gravidade específica e solubilidade limitada dentro de um solvente alifático de petróleo. A uniformidade e confiabilidade de suas propriedades físicas são demonstradas por um longo tempo de uso do óleo de mamona como padrão absoluto de viscosidade. Por causa deste grupo de hidroxila extremamente polar, ele é compatível com uma grande variedade de resinas naturais e sintéticas.

2.2.2 Aspecto agrícola e o mercado nacional

A mamona é uma planta de clima tropical e subtropical, razão de se encontrar no Brasil excelentes condições de cultivo. Necessita de chuvas regulares no início de sua vegetação, precipitação mínima de 500 mm durante o ciclo de desenvolvimento e de períodos secos na fase de maturação dos frutos. A temperatura ideal encontra-se entre 25 °C e 30 °C . E sua colheita ocorre a partir do mês de abril e se desenvolve durante um período prolongado, determinado pela degeneração das variedades cultivadas.

O uso do óleo de mamona atende ao mercado interno e externo na área de oleoquímica. O subproduto da industrialização de mamona é o farelo, que, por ser tóxico, é utilizado como adubo, e, caso passe pelo processo de desintoxicação, pode ser usado como ração.

O nível tecnológico encontrado nas explorações é muito variado, tendo-se desde cultivos espontâneos até aqueles mecanizados. Isso é reflexo da predominância do pequeno produtor, que, por cultivar em pequena escala, gera uma produção espacialmente atomizada, com elevado grau de intermediação na fase de comercialização.

No Brasil, a importância da cultura da mamona varia de região para região [9]. No Nordeste, onde os riscos de ocorrência de adversidades climáticas são maiores, a exploração é freqüentemente encontrada, fazendo parte do plano agrícola das propriedades, geralmente associada a outras culturas.

A degeneração das sementes utilizadas e o desinteresse dos produtores frente aos baixos preços são fatores que justificam a situação atual da cultura da mamona na Bahia. Nesse estado, o comprador final de bagas de mamona é o industrial de óleo. Contudo, em regra, a intermediação vai desde a pessoa que troca mamona por gêneros alimentícios até o agente de compras das indústrias, passando pelo caminhoneiro. Essa distorção ocorre em virtude da dispersão da produção e do grande número de pequenos produtores, sem meios de levar sua mercadoria diretamente à indústria.

Como a mamona pode ficar estocada por mais de quatro meses sem perda de qualidade, os intermediários o fazem para oferecer posteriormente maiores volumes nos pontos de compra da indústria, obtendo margens maiores de ganho. Os custos do transporte também podem encarecer o produto.

Em termos regionais, o Nordeste é a principal região produtora de mamona, seguindo a região sudeste, que teve como principal estímulo na introdução inicial da cultura a queda nos preços do café ocorrida na década de 1950 no estado de São Paulo.

Na região centro-sul, onde as condições são mais estáveis e, ainda, existe um maior número de culturas alternativas para os produtores, a exploração da mamona é mais condicionada ao comportamento dos preços dos produtos, havendo um mais rápido ajustamento dos níveis de produção às variações de mercado.

A participação da região sul na produção da mamona é também discreta, e praticamente não é cultivada nas outras regiões do país, as quais, segundo [10], participam com muito pouco de área plantada.

A mamona, adequadamente cultivada, pode se tornar uma excelente fonte de renda para o produtor [10]. Para tanto, é necessário observar certos cuidados, por exemplo, uma temperatura ideal para o crescimento da planta e maturação dos frutos, melhor época de plantio e colheita, e um correto controle de pragas e doenças. A sua extraordinária capacidade de adaptação, a multiplicidade de aplicações industriais do seu óleo e o valor da sua torta, como fertilizante e suplemento protéico, situam-na entre as oleaginosas tropicais mais importantes da atualidade.

Não há informações precisas sobre a época de sua introdução no Brasil. A maioria dos autores considera que a mamoneira tenha sido trazida pelos colonizadores portugueses, no primeiro século do descobrimento. A multiplicidade de usos dos seus produtos fez com que o cultivo da mamoneira

passasse do caráter subespontâneo para o racional, com altos rendimentos propiciados pela tecnologia econômica.

A inclusão do óleo de mamona na pauta de exportações brasileiras ocorreu durante a II Guerra Mundial, quando se iniciou aqui o surto de industrialização das oleaginosas em geral. E com a crescente valorização do óleo de mamona no mercado internacional, o Brasil aumentou consideravelmente a sua produção para exportação, que, entre 1960/75, representou mais de 70 % das exportações mundiais.

No Brasil, encontram-se bagas dos cultivares mais pobres e mais ricos, provenientes do mesmo local de produção. Desde aquelas do grupo *Ricinus zanziberensis*, que possuem apenas 30 % de óleo, até as cultivares do grupo *Ricinus sanguineus*, que chegam a conter 66 % de óleo.

Em levantamento realizado pela Associação de Fomento à Lavoura Oleaginosa (AFLO), em 1970, foram encontrados mais de 90 tipos diferentes de sementes, demonstrando o grau de heterogeneidade da cultura na Bahia [10].

2.2.3 Mercado mundial

Os maiores produtores mundiais de mamona [10] são Índia, China, Brasil e Tailândia. Os três primeiros respondem por cerca de 90 % da produção mundial.

A evolução do seu cultivo mostra que o Brasil permaneceu como o maior produtor mundial até 1973/1974, quando era responsável por 50 % da produção total. Desde então, ela vem declinando.

A evolução das importações mundiais de óleo de mamona mostra que os maiores mercados importadores são Comunidade Européia, Rússia e Estados Unidos, no período de 1985 a 1991.

Apesar do crescimento significativo da ricinocultura na Índia e na China, acredita-se que, com os investimentos em tecnologia agrícola que estão sendo feitos pelas principais empresas industriais e comerciais de óleo de mamona e derivados, o Brasil poderá competir e crescer significativamente nos próximos anos [10].

Em termos de qualidade, é reconhecido que o óleo brasileiro constitui padrão internacional de referência, enquanto o produto originário da Índia, via de regra, não consegue atender a todas as especificações exigidas para usos que requerem processamentos mais complexos.

A maior parte da produção brasileira de óleo de mamona é destinada ao mercado externo, do qual nosso país domina mais de 60 % [9]. Portanto, conclui-se que é necessária uma política de preços mínimos para a sustentação dos preços de mercado e, paralelamente, deve-se buscar a ampliação do mercado interno brasileiro de mamona, através da intensificação de pesquisas tecnológicas industriais e o desenvolvimento de novas aplicações, como é o caso deste trabalho.

2.2.4 Resina poliuretana derivada do óleo de mamona

A resina poliuretana derivada do óleo de mamona em estudo é formada de dois componentes: o pré-polímero com terminação isocianato e o polioli. Quando curados por poliadição, esses dois componentes reagem entre si, resultando em um composto poliuretano. Na mistura dos componentes, quanto maior for a proporção do polioli, mais flexível fica a estrutura da resina. Enquanto que, se houver maior concentração de pré-polímero, mais rígida se torna a sua estrutura, que apresenta alternativas em relação à sua flexibilidade final [10].

De um modo geral, a polimerização dos poliuretanos ocorre quando um composto com dois ou mais grupos isocianatos em sua estrutura reage com um polioli, ou seja, um álcool polifuncional [12].

A equação 2.1 apresenta a composição química dos poliuretanos.

Os compostos que contêm grupos isocianatos são encontrados em duas classes distintas: os aromáticos, dos quais os mais utilizados são o difenilmetano diisocianato (MDI); o tolueno diisocianato (TDI), e os alifáticos, sendo mais utilizados o hexametileno diisocianato (HDI) e o isofurona diisocianato (IPDI). O pré-polímero estudado neste trabalho foi sintetizado a partir do MDI e de um polioli derivado do óleo de mamona.

Dependendo do material de partida empregado, os produtos da reação podem ter propriedades físicas altamente diferentes, embora quimicamente sejam bastante semelhantes. Maiores detalhes sobre a composição química da resina poliuretana derivada do óleo de mamona e suas reações encontram-se em [12] e [13].

No entanto, neste trabalho optou-se pela resina classificada como **RI 3**, que possui propriedades mecânicas diferentes das resinas RI 1 e RI 2 utilizadas no desenvolvimento de isoladores poliméricos [12], e que se destaca pelo seu baixo custo.

Resinas de mesma origem estão sendo aplicadas com sucesso em próteses na medicina [12]. Em relação à engenharia elétrica, **não há pesquisas específicas da aplicação de tais resinas em cruzetas de madeira, o que mostra a importância deste trabalho.**

2.3 Cargas e as propriedades de polímeros

2.3.1 Introdução

A fabricação dos produtos plásticos é constituída basicamente de polímeros designados resinas. No entanto, estas resinas não são utilizadas isoladamente, pois, antes de serem introduzidas nas máquinas que as transformam (injetoras, extrusoras, etc.), recebem a adição de substâncias chamadas de cargas.

As cargas, apesar de concentrarem uma porcentagem pequena da composição, têm grande importância devido às suas funções variadas como a modificação da cor e da apresentação do produto final, melhoria das propriedades deste produto ou, ainda, a melhora na facilidade da desmoldagem. "A mistura da resina com as cargas recebe o nome de composto ou compósito, o qual em seguida é transformado em produto final, mediante a utilização de diferentes técnicas de processamento" [14].

2.3.2 Cargas

As cargas são substâncias normalmente sólidas, nas quais uma das funções é diminuir o custo do produto final, reduzindo-se a quantidade de polímero empregada. Esses aditivos também são chamados de substituintes de volume, pois há a introdução de uma carga de baixo custo no composto a ser transformado, dentro de certos limites que não alterem as propriedades do produto final, constituindo-se uma vantagem econômica.

As cargas são classificadas em granulares e fibrosas, sendo alguns exemplos das primeiras o carbonato de cálcio, o pó de amianto, a mica, a farinha de madeira, a casca de frutos, o negro de fumo e a **sílica**. Como exemplo das cargas fibrosas, podem ser citadas as fibras de amianto, de vidro, celulósicas e sintéticas.

As propriedades finais do polímero são afetadas pela incorporação das cargas e é importante que se limite a quantidade a ser adicionada à resina a valores abaixo das aplicações críticas [14]. Normalmente, as cargas aumentam a resistência dos polímeros nas várias condições de serviço.

Uma das funções das cargas é melhorar o comportamento do produto final para uma aplicação particular. É exemplo disso a aplicação de amianto, que, adicionado ao PVC, lhe confere melhor estabilidade dimensional. Há também a dispersão do pó de borracha no seio do poliestireno, que melhora a sua resistência ao choque, obtendo-se assim o poliestireno - antichoque. Ao adicionar-se pó de borracha ao poliestireno para melhorar sua resistência ao choque, são introduzidas alterações nas suas características mecânicas, como o módulo de elasticidade e a tensão de ruptura em tração, que diminuem.

As cargas fibrosas, como é o caso do vidro e do amianto, têm um papel importante no reforço dos polímeros. As propriedades mecânicas, nomeadamente a resistência à tração e ao choque, melhoram com a introdução do reforço de fibras. O vidro, por ter uma boa resistência química, torna-

se um material muito interessante como reforço de polímeros para diversas aplicações como: tubos, louça sanitária, reservatórios, chapas onduladas, etc.

2.3.3 Propriedades dos polímeros

2.3.3.1 Introdução

Sob o ponto de vista do comportamento mecânico, os polímeros são divididos em três grandes grupos, sendo eles as borrachas ou elastômeros, plásticos e fibras. Essas fases geralmente são associadas à expressão "resina", durante a sua aplicação, e serão descritas nos itens subseqüentes:

a) Elastômeros

São polímeros que podem ser estirados repetidamente, adquirindo duas vezes o seu comprimento original à temperatura ambiente. No entanto, após a retirada do esforço mecânico causador do estiramento, o material volta rapidamente ao seu comprimento inicial em virtude de um baixo número de ligações à temperatura ambiente.

"As borrachas vulcanizadas possuem cadeias com baixa densidade de ligações cruzadas conforme pode-se ver na figura 2.1. Quanto aos elastômeros termoplásticos, apresentam características elastoméricas mesmo não sendo vulcanizados, isto é, mesmo sendo estruturalmente termoplásticos" [16].

Figura 2.1: Cadeias com baixa densidade de ligações cruzadas, ex: borrachas vulcanizadas [16].

"As borrachas, em função das suas propriedades gerais, podem se dividir em borrachas comuns (como a borracha natural, o SBR e a borracha butílica), borrachas resistentes a óleos (como o policloropreno e a borracha nitrílica) e borrachas especiais (como os elastômeros fluorados e os elastômeros de poliuretano)" [16].

b) Plásticos

O termo é de origem grega e significa "adequando a moldagem", sendo atualmente aplicado a um grande e variado número de materiais sintéticos. O componente principal desses materiais é o polímero orgânico sintético, e a característica principal é o estado de fluidez que os plásticos assumem,

durante um determinado estágio do seu processamento, tornando-os passíveis de serem moldados por ação isolada ou conjunta de calor. No estágio final, assumem o estado sólido.

c) Fibras

Estes materiais são definidos pela condição geométrica de alta relação entre comprimento e diâmetro. Os polímeros empregados na forma de fibras são termoplásticos orientados no sentido do eixo da fibra (sentido longitudinal). As principais fibras poliméricas são: náilons, poliésteres lineares saturados - principalmente o poli (tereftalato de etileno), poli (acrilonitrila) e fibras poliolefínicas.

No entanto, o conjunto das propriedades de maior interesse para a avaliação do desempenho dos polímeros pode ser dividido nos seguintes grupos: propriedades mecânicas, térmicas, elétricas, óticas, resistência química, solubilidade e gerais [17]. Logo, neste item serão abordadas as propriedades de maior relevância para o comportamento dos polímeros diante da sua aplicação como material básico na confecção de cruzetas.

2.3.3.2 Propriedades mecânicas

O comportamento mecânico de um polímero pode ser caracterizado por suas propriedades de "tensão-deformação", ou seja, a partir do momento em que se aplica uma tensão em um polímero para deformá-lo até provocar uma ruptura.

O comportamento mecânico dos plásticos é fortemente afetado pelo tempo de atuação das solicitações, assim como pela temperatura.

Os parâmetros ou grandezas que caracterizam o comportamento mecânico dos polímeros devem vir sempre associados às condições de temperatura do ensaio e ao tempo de atuação da solicitação. Isso considerando-se que a temperatura e o tempo são fatores externos que afetam diretamente o comportamento mecânico desses materiais.

As principais propriedades mecânicas analisadas neste projeto foram:

- tração (módulo de elasticidade e resistência à tração);
- flexão;
- cisalhamento;
- dureza; e
- resistência ao rasgo.

A resistência à tração dos polímeros é geralmente determinada em corpos-de-prova com forma de halter, na sua seção mais estreita. Os corpos de prova são colocados entre as garras de um equipamento de tração, onde é aplicada uma velocidade de "afastamento" constante. A ruptura depende de como essa força é aplicada. Enquanto que o comportamento à flexão é determinado

através de um corpo de prova em forma de barra retangular, apoiado em suas extremidades, sendo a força aplicada no meio do vão. Os elementos mais importantes que se determinam são o módulo de elasticidade “E” e a resistência à flexão.

2.3.3.3 Propriedades Elétricas

Assim como os polímeros são maus condutores de calor, são também maus condutores de eletricidade [17].

A temperatura influencia a maioria das propriedades elétricas desses isolantes. As principais características dos materiais poliméricos são: rigidez dielétrica, resistividade, constante dielétrica, fator de potência e fator de dissipação, descritas a seguir:

- Rigidez dielétrica – Esta propriedade indica em que grau um material é isolante; é medida pela tensão elétrica que o material pode suportar antes da ocorrência de perfuração do material isolante.
- Resistividade Volumétrica – A resistência de materiais isolantes à passagem da corrente elétrica é medida como resistividade volumétrica entre as faces de uma unidade cúbica, para um dado material e uma dada temperatura. Os polímeros são péssimos condutores, oferecendo alta resistência à passagem de corrente elétrica.
- Constante dielétrica – Esta propriedade é uma característica correlacionada à energia eletrostática que pode ser armazenada em um capacitor que tem o material como dielétrico. É medida pela razão entre a capacitância do capacitor contendo como isolante o material em questão e a capacitância do mesmo sistema, porém o material isolante é o ar; e
- Fator de potência - Esta propriedade é a razão entre a potência dissipada pelo material isolante e a máxima potência que seria fornecida ao sistema, mantendo-se os mesmos valores de diferença de potencial e intensidade de corrente. Esta é uma medida relativa da perda dielétrica do material, quando o sistema age como isolante, e é usada como medida de qualidade do isolante.

2.4 Sistemas de Distribuição de Energia

2.4.1 Introdução

As décadas finais do século XIX foram marcadas por importantes e profundas transformações na sociedade brasileira, sendo o palco da introdução do uso da eletricidade em nosso país. No início, seu principal uso era na área de iluminação e transportes urbanos.

Um marco histórico na produção de energia no país foi a construção da Usina Hidrelétrica de Ribeirão do Inferno, em 1883, destinada aos serviços de mineração em Diamantina, Minas Gerais,

movimentando bombas d'água para desmonte de terreno diamantífero. Em 5 de setembro de 1889, foi implantada a Usina Hidrelétrica de Marmelos, no rio Paraibuna, em Juiz de Fora, considerada o “marco zero” da história do setor de energia elétrica brasileiro e da América Latina por ter sido a primeira unidade de geração hidrelétrica construída especificamente para o atendimento de serviços públicos urbanos [18], ver a foto da figura 2.2.

Figura 2.2: Usina hidrelétrica Marmelos – Minas Gerais.

Os sistemas de distribuição de energia apresentam diversos formatos construtivos, cada um selecionado segundo quesitos econômicos, estéticos, e outros relacionados ao meio ambiente, relevo, tipos de construção e necessidades do cliente.

Nos próximos itens, serão abordados alguns tipos construtivos de redes de distribuição utilizados no Brasil e no mundo, destacando-se os abaixo relacionados:

- Redes Nuas;
- Rede Protegida Compacta;
- Rede Isolada – Pré-reunido de média tensão;
- Redes que utilizam isoladores do tipo Pilar; e
- Redes MRT (Monofásicas com Retorno por Terra).

2.4.2 Redes Nuas

A distribuição de energia elétrica desde o início da eletrificação de nossas cidades usa diversos tipos de construção para o seu transporte, como as cruzetas para suporte dos isoladores e cabos de energia (ver detalhe do Largo da Pólvora, em Belém do Pará no século XIX, na figura 2.3).

Figura 2.3: Largo da Pólvora, Belém do Pará.

Atualmente, as normas brasileiras NBR-5433 [6] e NBR-5434 [7] especificam as formas de empregar as cruzetas de madeira ou cruzetas de concreto. Na figura 2.4, encontra-se ilustrada uma estrutura básica para sistemas aéreos de distribuição, e na figura 2.5, o seu emprego em uma rede de distribuição aérea na área de concessão da Elektro - Eletricidade e Serviços SA. Podem ser vistos também, nesta foto, o aspecto técnico construtivo de uma rede de distribuição e a importância do desempenho da cruzeta, que devem garantir a sustentação dos cabos sem que toquem nas estruturas aterradas ou no solo.

Figura 2.4: Estrutura básica para a construção de sistemas aéreos no Brasil.

Figura 2.5: Rede aérea nua.

As cruzetas de madeira Nativa apresentam vida útil de até 12 anos [19], sendo necessária a sua substituição após este período.

Desta forma, define-se uma cruzeta de madeira como sendo “peça de madeira sensivelmente retilínea, sem emendas, destinada a suportar condutores e equipamentos de redes aéreas de distribuição de energia elétrica” [20].

As cruzetas dos atuais sistemas de distribuição de energia elétrica no Brasil são produzidas a partir da madeira, concreto armado, termofixos (fibra de vidro) e termoplásticos. As cruzetas de madeira representam quase que a totalidade de cruzetas instaladas em uso no país, cujos padrões na maioria são muito similares aos das concessionárias distribuidoras de energia.

Do ponto de vista de NBI (Nível Básico de Impulso), as cruzetas de madeira se destacam diante das de concreto e metal, por proporcionarem um melhor isolamento e facilitarem a extinção dos arcos elétricos, quando ocorrem sobretensões.

Um exemplo do comportamento do NBI em uma estrutura com cruzeta de ferro e uma com cruzeta de madeira pode ser obtido:

- Quando da utilização da cruzeta de ferro. Nesse caso, o NBI da rede fica limitado ao do isolador, ou seja, próximo dos 100 kV e, para que se possam alcançar os 300 kV recomendados pela norma, seria necessário instalar um conjunto de três pára-raios a cada 300 metros de rede com resistência de aterramento $R_{at} \leq 200 \, \Omega$ com a troca dos três isoladores de 15 kV das estruturas pelos de 25 kV.
- No caso da utilização de cruzetas de madeira, o NBI da rede fica limitado pelo valor da fase B, devido ao pino do isolador estar mais próximo da mão francesa, o que implica em um NBI em torno de 109 kV, tendo as demais fases um valor superior a 300 kV. Portanto,

para alcançar os mesmos 300 kV recomendados pela norma, seria necessário instalar um pára-raio na fase B a cada 300 metros de rede com uma resistência de aterramento $R_{at} \leq 100 \, \Omega$, o que reduz os custos da instalação anterior.

Quanto à suportabilidade mecânica, as cruzetas de madeira devem atender à norma NBR 8458 [20], conforme tabela 2.1 abaixo:

Tabela 2.1: Tabela de resistência mecânica das Cruzetas de madeira.

Comprimento L (mm)	Descrição do Carregamento	Resistência F (daN)	Flecha (mm)	
			Máxima	Residual Máxima
2000	Nominal	400	75	3
	Máximo Excepcional	560	100	5
	Mínimo de Ruptura	800	-	-
2400	Nominal	400	115	5
	Máximo Excepcional	560	163	8
	Mínimo de Ruptura	800	-	-
5000	Nominal	400	95	4
	Máximo Excepcional	560	132	7
	Mínimo de Ruptura	800	-	-
6000	Nominal	400	140	6
	Máximo Excepcional	560	200	10
	Mínimo de Ruptura	800	-	-

Nestas situações, observando-se os aspectos técnicos e econômicos, há uma tendência ao uso de cruzetas de madeira de puro cerne ou cerne alburno seco [21]. Entretanto, segundo as leis ambientais de nosso país, as madeiras retiradas de florestas são proibidas para esta finalidade, sendo, muitas vezes, extraídas de forma ilegal.

Dessa forma, as cruzetas atualmente oferecidas no mercado encontram-se nos limites das normas, apresentando vida útil de até 5 anos [22]. Cruzetas com baixo desempenho mecânico e curta vida útil podem provocar desligamentos indesejados no sistema. Tais desligamentos são monitorados pelos órgãos reguladores, e cada concessionária tem padrões de tempo e quantidade de desligamento que podem ocorrer em suas áreas de concessão ao longo de um ano.

O governo federal, por meio de sua agência reguladora ANEEL e o governo estadual, através da CSPE, regulamentam os índices de DEC (Duração Equivalente por Consumidor – em horas por

ano) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Cliente – em número de Interrupções por ano) das concessionárias [23].

Os valores de DEC e FEC são calculados em função das interrupções que ocorrem no sistema elétrico. Esses indicadores refletem a qualidade e continuidade dos serviços prestados pelas concessionárias a seus clientes.

Dessa forma, as concessionárias desenvolvem estudos que permitem a redução dos desligamentos indesejáveis em suas redes e, conseqüentemente, dos indicadores DEC e FEC.

Outras formas de redes aéreas foram sendo propostas ao longo dos anos tanto no Brasil, quanto no exterior. Nos tópicos subseqüentes, algumas delas serão descritas e analisadas quanto à sua aplicabilidade.

2.4.3 Rede Protegida Compacta

Por definição, rede protegida compacta é “uma rede que emprega cabos protegidos numa configuração compacta, separados por espaçadores poliméricos em formato losangular e sustentados por um cabo mensageiro” [24].

Os cabos são de alumínio ou cobre dotado de cobertura protetora de composto extrudado de polímero termofixo ou termoplástico, cuja cobertura tem a função de reduzir a corrente de fuga em caso de contato do cabo com objetos aterrados e diminuir o espaçamento entre condutores.

Na figura 2.6, está representado o formato de uma rede protegida compacta utilizada no Brasil.

Figura 2.6: Formato estrutural de rede compacta com circuito duplo.

Além dos cabos, que têm a sua isolação constituída de materiais poliméricos, há polímeros também nos espaçadores e separadores cujos formatos podem ser visualizados nas figuras 2.7 e 2.8.

Figura 2.7: *Espaçador para sustentação de cabos em rede protegida compacta.*

As fases A, B e C apresentadas na figura 2.8 representam a notação adotada para representar o defasamento angular entre os três condutores. O espaçador é um acessório de material polimérico de formato de losângulo cuja função é a sustentação e separação dos cabos protegidos na rede compacta ao longo do vão, mantendo o isolamento elétrico da rede.

Figura 2.8: *Separador para sustentação de cabos em rede protegida compacta.*

O separador é um acessório de material polimérico de formato vertical cuja função é a sustentação e separação dos cabos protegidos na rede compacta, em situações de conexões entre fases (“flying-tap”), mantendo o isolamento elétrico da rede [24].

A figura 2.9 mostra duas redes de distribuição de energia. À esquerda, pode-se ver uma rede protegida compacta e à direita, uma rede aérea com condutores nus.

Figura 2.9: Rede protegida compacta e rede com condutores nus.

A rede protegida compacta apresenta um conforto visual melhor do que as redes com condutores nus. Outro aspecto interessante nesta figura é a confirmação de um dos fatores que influenciam a sua aplicação, ou seja, a arborização intensa. Nestes locais, o toque dos cabos com a arborização pode ocorrer desde que seja eventual e não permanente.

O uso da rede compacta se aplica em:

- regiões arborizadas, pela maior confiabilidade deste tipo de rede ao toque de galhos de árvores, por permitir menor área de podas e possibilitar um maior espaçamento na periodicidade das podas de árvores, além do cabo messageiro servir como proteção da rede contra a queda de galhos;
- áreas com frequentes ações de vandalismo. Neste caso, a implantação da rede protegida compacta deve ser somente nos trechos em que é detectado o vandalismo;
- locais com congestionamento de circuitos, pela possibilidade de instalação de até quatro circuitos na mesma estrutura, principalmente em saídas de subestações;
- circuitos onde se exige um alto índice de confiabilidade devido às características dos consumidores especiais;
- locais com redes próximas às edificações;
- locais com grande incidência de descargas atmosféricas;
- áreas rurais próximas à vegetação preservada por lei.

Não é recomendada a rede protegida compacta em regiões litorâneas e zonas industriais poluídas (locais de atmosfera agressiva) pelo fato de empregar cabo protegido não isolado, que, sob presença de contaminação, passa a conduzir correntes superficiais na cobertura polimérica, causando o fenômeno de trilhamento elétrico (“tracking”) [24]. Para estas situações, devem ser estudadas soluções alternativas para cada caso específico, como:

- elevação do nível básico de impulso da rede (NBI), mantendo-se a configuração compacta;
- mudança para rede isolada.

Nesse caso, alguns aspectos de preocupação com este tipo de construção são:

- Qualidade dos espaçadores e separadores. Se o fabricante cometer algum equívoco no processo produtivo, esses elementos importantíssimos para a sustentação mecânica podem falhar e ocasionar sérios danos aos cabos e, conseqüentemente, desligamento do sistema; e
- Seu custo é cerca de 1,3 vez maior do que o de uma rede nua.

2.4.4 Rede com cabos pré-reunidos de média tensão

Uma alternativa para a construção de redes aéreas de distribuição é a aplicação de cabos pré-reunidos isolados [25]. Esse tipo de aplicação aumenta a isolação da rede (NBI), permitindo num mesmo poste haver mais circuitos do que numa rede nua convencional.

Observa-se, na figura 2.10, o aspecto construtivo de uma rede com cabo pré-reunido de média tensão.

Figura 2.10: Rede Aérea com cabo pré-reunido de média tensão.

A aplicação de cabos pré-reunidos em sistema de distribuição aéreo ocorrerá quando houver dificuldades locais para a instalação da rede aérea convencional, tais como [25]:

- locais com arborização intensa, onde deve ser preservada a ecologia, ou onde é proibida a poda de árvores;
- locais onde as ruas são estreitas e a rede aérea convencional acarrete problema de segurança com relação à proximidade de luminosos, marquises, janelas e sacadas das edificações;

- locais com alto índice de poluição ambiental salina e/ou industrial;
- ruas onde as estruturas estejam congestionadas e seja necessária a instalação de novos alimentadores; saídas de subestação, para evitar congestionamento de estruturas, com circuitos aéreos convencionais.

Ainda, pode-se aplicar nas seguintes condições especiais [25]:

- saída de subestação, como alternativa econômica à utilização de cabos subterrâneos;
- travessias sob viadutos, linhas de transmissão, etc., como alternativa econômica à utilização de cabos subterrâneos;
- travessias sobre rios, através de pontes, como alternativa técnica ao circuito aéreo convencional com estruturas especiais ou como alternativa econômica ao cabo subterrâneo;
- quando a carga a ser alimentada justifique a aplicação do cabo pré-reunido, aumentando a confiabilidade do sistema.

Destacam-se abaixo os problemas encontrados neste tipo de construção:

- As emendas dos cabos. A maioria dos desligamentos ocorridos com este tipo de rede são oriundos de problemas com os pontos de emenda do cabo. Isso ocorre devido a erros no processo de reconstituição do cabo nos pontos de emenda;
- Custo elevado. Ele é 1,85 vez maior do que o de uma rede nua.

2.4.5 Redes utilizando isoladores tipo Pilar

Uma alternativa de construção de redes aéreas de distribuição é o uso de isoladores do tipo pilar.

A construção de redes aéreas com isoladores do tipo pilar evita o uso de cruzetas para sustentação de cabos. Isso ocorre em função de a instalação desses isoladores ser feita através do pino de fixação ao poste ou de suporte [26]. Seu principal problema são os pássaros, que fecham curto entre ferragens e cabos.

Pode-se observar na figura 2.11 as estruturas construtivas que utilizam isolador tipo pilar.

Figura 2.11: Rede Aérea – Estrutura com Isolador Tipo Pilar.

2.4.6 Redes MRT (Monofásicas com Retorno por Terra)

Considerando-se a necessidade de compatibilizar os custos de implantação de sistemas de eletrificação rural com a economia das áreas a serem eletrificadas, os sistemas de redes monofilares com retorno por terra servem como opção de atendimento aos consumidores de baixa renda [27].

O sistema MRT aplica-se ao atendimento de consumidores em regiões ou áreas rurais com baixa densidade de carga que não exijam, a curto e médio prazo, interligação ou ampliação de sistemas elétricos [28].

Podem ser observadas na figura 2.12 as formas estruturais construtivas para os sistemas MRT.

Figura 2.12: Rede Aérea – Estruturas para MRT.

Apesar de seu custo mais baixo, há problemas graves com relação às proteções dos sistemas dos quais os MRT derivam. Para evitar-se que os sistemas fiquem desbalanceados, procura-se inserir cargas limitadas por fase do sistema trifásico.

Desta forma, por questões de proteção contra defeitos fase-terra, as cargas atendidas em MRT deverão ser balanceadas de maneira que, em qualquer ponto do alimentador (trancos, subtrancos e ramais trifásicos), a corrente residual ($I_N = I_A + I_B + I_C$) não ultrapasse 6A [27].

Quando a opção for pela construção de sistemas MRT, faz-se necessário um acompanhamento rigoroso das cargas instaladas em cada fase do sistema [28].

Um outro ponto de atenção é a análise da resistividade do solo, pois dela dependerá o retorno de corrente pelo solo. Se um aterramento for mal executado, corre-se o risco de morte de animais e pessoas.

2.4.7 Redes Subterrâneas

As redes subterrâneas caracterizam-se por apresentar índices de interrupção extremamente baixos e pela extinção da poluição visual das redes nuas.

São constituídas por construções civis associadas às montagens elétricas, sendo necessário providenciar a abertura de valas para a instalação de dutos, caixas de passagem, bases de concreto para equipamentos e compartimentos subterrâneos para a instalação de equipamentos.

Esse tipo de rede apresenta um alto custo de implantação, principalmente devido aos seguintes fatores:

- Necessidade de execução de obras civis (abertura de valas para a instalação de dutos, caixas de passagem, bases de concreto para equipamentos, etc.);
- Utilização de materiais e equipamentos totalmente isolados e compatíveis com a tensão do sistema;
- Utilização, em algumas situações, de equipamentos submersíveis;
- Planejamento das redes subterrâneas com recursos de alimentação por duas ou mais fontes, bem como instalação de chaves seccionadoras em pontos estratégicos para transferência de cargas, a fim de facilitar a localização de defeitos;
- Necessidade de projetar as redes subterrâneas (redes elétricas e obras civis) para atender a um planejamento de longo prazo, pois o atendimento de necessidades de aumento de cargas e novas demandas, pelas características técnicas inerentes a cada uma das soluções, é menos flexível para a rede subterrânea do que para a aérea;
- Por provocar maiores transtornos no caso de intervenção na rede, substituição de equipamentos e condutores, construção de novos circuitos, etc.

Devido aos altos custos de implantação e de manutenção da rede subterrânea, esse tipo de construção é recomendado para:

- Locais com alta densidade de carga (centros comerciais, alta concentração de prédios, etc.);
- Revitalização de centros urbanos;
- Cidades históricas;
- Condomínios residenciais (figura 2.13).

Figura 2.13: Fotografia comparativa de condomínio com rede convencional nua (esquerda) e rede subterrânea (direita) [29].

As vantagens da implantação de uma rede subterrânea são apresentadas a seguir:

- Desempenho superior sob o aspecto de continuidade de fornecimento. Isso ocorre por serem menos susceptíveis a interferências do meio ambiente (arborização, descargas atmosféricas, animais, etc.), abaloamento e vandalismos;
- Se projetada e construída adequadamente, a rede subterrânea requer menor número de intervenções de manutenção.

Apresentam-se, a seguir, as desvantagens da rede subterrânea:

- maior dificuldade na localização de defeitos, provocando um aumento no tempo de desligamento;
- custo de manutenção maior do que o da rede convencional nua, devido à necessidade de mão-de-obra com maior especialização e qualificação, utilização de equipamentos especiais e próprios para redes subterrâneas, reparo e obras civis.

2.4.8 Comparativo de custos entre redes de distribuição

No Brasil, predomina a construção e manutenção de sistemas aéreos de distribuição com redes nuas. As áreas rurais apresentam o maior índice de utilização dessas redes. Todas as grandes concessionárias de distribuição de energia no Brasil fazem uso delas. No Canadá, a empresa BChydro atende a Colúmbia Britânica e faz uso de redes aéreas com instalação de cruzetas. O uso de cruzetas na Union Electric Company, empresa que atende o Noroeste dos Estados Unidos, também é motivo de estudos por parte de cientistas.

Portanto, observando-se os custos comparativos da tabela 2.2 de implantação das redes, verifica-se por que, no Brasil e no mundo, principalmente em países menos desenvolvidos, a utilização de redes aéreas com cruzetas ainda é vantajosa.

Tabela 2.2: Comparativo de custo modular por tipo de rede.

Tipo de rede	Custo (Pu *)
Rede Nua (com cruzeta)	1,00
Rede Protegida Compacta	1,30
Rede Isolada – Pré-reunido de Média Tensão	1,85
Rede Subterrânea	7 a 13

* Pu (Por unidade monetária) - Os números foram calculados comparando-se com a rede nua - Fonte Elektro e Servel (Empresa especializada em projeto e construção de redes subterrâneas) [29].

2.4.9 Tendências de implantação de sistemas de distribuição no Brasil

Os sistemas de distribuição de energia elétrica no Brasil têm como principais formas construtivas as apresentadas nos itens anteriores. Os estudos e a melhoria na qualidade dos materiais, bem como o aumento do consumo, têm reduzido os custos de implantação de determinados tipos de redes.

Podem-se citar as tendências de implantação de sistemas de distribuição de energia no Brasil conforme segue:

- Sistema de distribuição aéreo com uso de Rede Protegida Compacta: Utilizado em áreas urbanas e rurais. Custo apenas 1,3 vez maior do que o das redes nuas [30]. Custo com tendência de redução. Esse tipo de rede apresenta uma performance melhor do que a das redes nuas, principalmente em regiões arborizadas.
- Redes subterrâneas: A utilização de redes subterrâneas ocorre em áreas urbanas, cidades históricas, na revitalização de centros urbanos e em condomínios de alto padrão. Sua grande desvantagem é o custo, que pode atingir patamares de 7 a 13 vezes maiores do que o de uma rede nua [30]. Muito importante ressaltar que as redes subterrâneas apresentam uma menor vulnerabilidade do que as redes aéreas, conseqüentemente o número de interrupções é muito pequeno.
- Sistema MRT: Aplicável em áreas de baixo consumo e baixa renda, para atendimento principalmente às propriedades rurais. Sua grande desvantagem é a limitação de carga instalada por fase, devido aos problemas que causa aos sistemas de proteção [27].

2.4.10 Polímeros em sistemas elétricos de energia

O uso de isoladores construídos à base de compostos poliméricos, em sistemas elétricos externos, ocorre há aproximadamente 53 anos [16]. Eles compreendem uma gama de materiais e formulações.

Entre os materiais utilizados, está a resina bisfenol epóxi, a qual era comercialmente usada para aplicações em recinto fechado na década 1940.

Na década seguinte, a resina epoxy cicloalifática foi usada na Inglaterra para aplicações internas devido ao seu melhor comportamento [16].

Os isoladores poliméricos para linhas de transmissão começam a ser produzidos nos EUA e na Europa em meados de 1975, e diferentes materiais foram utilizados para a confecção de isoladores poliméricos [32].

Inicialmente, esses materiais incluíam borracha etileno propileno (EPR) a qual foi feita pela CERAVER da França em 1975, Ohio Brass dos Estados Unidos em 1976, Sediver dos Estados Unidos em 1977 e Lapp dos Estados Unidos em 1980.

A borracha de Silicone (SIR) foi manufaturada por Rosenthal na Alemanha em 1976 e ganhou confiança nos Estados Unidos em 1983.

Em 1986, a Ohio Brass introduz uma liga de monômero etileno propileno (EPM) e borracha de silicone, a qual foi, em 1989, modificada para monômero etileno propileno dieno (EPDM) e a combinação da borracha de silicone [16].

Pesquisas recentes com resinas poliuretanas à base de óleo de mamona [33 e 34] mostram um novo material para ser utilizado na confecção de elementos isolantes para uso nos sistemas elétricos.

Atualmente, são fabricados isoladores poliméricos em todo o mundo e o seu consumo vem aumentando gradativamente.

No ano de 2001, iniciou-se um trabalho de pesquisa e desenvolvimento de cruzeta à base de termofixo. O material selecionado para tal desenvolvimento foi a fibra de vidro. Em julho de 2001, foi manufaturada a primeira cruzeta à base dessa fibra. Nos ensaios elétricos, esta resina apresentou uma condutividade superficial, provocando trilhamento na peça. As empresas envolvidas nesta pesquisa procuraram modificar a composição da resina e do processo produtivo para que ela apresentasse resultados satisfatórios nos ensaios elétricos.

Em 2015 a cruzeta em termofixo ainda apresenta problemas operacionais de campo, principalmente na posição de seus furos, onde a concentração de esforços e ao passar por aperto de parafusos nas estruturas nas estruturas, as cruzetas apresentam rachaduras e passam a comprometer sua vida em serviço. Estudos atuais apontam para um aumento na espessura da parede da cruzeta (ela tem 3 mm a 4 mm de espessura) e reforço nestes.

A figura 2.14 apresenta o equipamento de pultrusão utilizado na fabricação da cruzeta em fibra de vidro [30].

Figura 2.14: Produção de cruzeta em Fibra de Vidro.

O polímero utilizado na cruzeta da figura 2.14 foi o polipropileno reforçado com 40% de fibra de vidro, produzido pela empresa Borealis OPP e denominado SG616, conforme [30].

2.5 Estudos sobre cruzetas de madeira laminada

2.5.1 Introdução

As empresas concessionárias de energia elétrica convivem com altos custos de manutenção na rede de energia elétrica devido aos problemas de falhas e de defeitos em cruzetas de madeira. Somando-se a isso os aspectos ambientais, as cruzetas de madeira têm sido tema de vários trabalhos científicos, e sua importância motivou o desenvolvimento desta pesquisa.

Neste item serão apresentados alguns estudos realizados com cruzetas de madeira, em linhas de transmissão em outros países, como a Noruega e os Estados Unidos, os métodos de inspeção nesse tipo de cruzeta e a aplicação já consolidada de cruzeta de madeira laminada, conforme serão descritos nos itens subsequentes.

2.5.2 Avaliação da integridade da cruzeta de madeira por meio da utilização de redes neurais artificiais e medidor de vibração a laser [35]

2.5.2.1 Geral

Um problema significativo detectado pelas concessionárias de energia elétrica é a degradação e falha de cruzetas de madeira nas estruturas de suporte das linhas de transmissão. Neste trabalho é

proposto um método não-destrutivo, sem necessidade de contato, e confiável, o qual pode, rapidamente e a custo razoável, avaliar a integridade estrutural dessas cruzetas. O método utiliza um helicóptero com vibrômetro a laser para medir vibrações induzidas na cruzeta pela máquina elétrica (rotor) do helicóptero. A técnica de rede neural artificial (RNA) é aplicada, neste caso, utilizando-se esses espectros de vibração para avaliar a tensão de ruptura da cruzeta. O tipo de RNA empregada é a rede neural artificial re-alimentada (RNARA), a qual, após o seu treinamento, pode discernir confiavelmente o estado da cruzeta e definir se é necessário substituí-la ou não, com base no espectro de vibração.

2.5.2.2 Método de inspeção

As linhas de transmissão de alta tensão da Noruega são normalmente estruturas de suporte de madeira do tipo “H”, ilustrada na figura 2.15.

Figura 2.15: Estrutura de suporte de linha de transmissão do tipo “H” [36].

Nestas estruturas, a cruzeta é tipicamente a primeira parte a falhar. O seu apodrecimento, torna-as fracas e eventualmente elas tendem a quebrar. Esse tipo de falha causa interrupções no sistema elétrico, altos custos de reparos, e ocasiona uma situação muito perigosa.

As concessionárias devem realizar inspeções regulares dessas cruzetas para assegurarem confiança e segurança. Devido ao grande número de cruzetas em serviço, o método para testar a integridade dessas cruzetas deve ser rápido, barato, preciso e não destrutivo. Entre as técnicas de inspeções mais comuns, encontra-se a inspeção de subida, que envolve a subida na estrutura, o toque nela com um martelo; o julgamento da rigidez da cruzeta é baseado no resultado do som. Uma outra técnica de inspeção comum é a inspeção visual, que é freqüentemente desempenhada com o auxílio de um helicóptero. Esse método é subjetivo e somente detecta a aparência exterior da madeira. Apesar desses sérios inconvenientes, as duas técnicas continuam largamente usadas, tendo em vista serem relativamente rápidas, não muito caras, e não destrutivas.

Há outras técnicas de avaliação alternativas que prometem resultados mais confiáveis, como: perfurar ou lascar a madeira, ou utilizar onda de tensão, ultra-som, resistividade elétrica, infravermelho, radar e tomografia. Entretanto, todas elas, embora não destrutivas também, requerem um sensor em contato com a cruzeta, um tempo relativamente longo para obter dados de medição, e/ou somente testam uma área local da cruzeta, em vez de avaliar o comprimento inteiro da cruzeta. Essas desvantagens das técnicas de avaliação excederam o custo e também diminuíram a sua aplicação envolvendo milhares de estruturas de suporte de transmissão.

2.5.2.3 Vibração da madeira

Quando uma barra mecânica é excitada pela energia acústica, a barra vibra. As frequências de vibração resultantes dependem do comprimento da barra e da massa (para uma dada seção). A degradação da madeira, primeiramente devido a fungos (putrefação) e insetos, proporciona na cruzeta uma alteração nas suas frequências de vibração para um dado tipo de excitação. O método de investigação empregado neste trabalho utiliza excitação acústica de banda larga para induzir vibração na cruzeta. A vibração é medida, convertida para o domínio da frequência, e a análise dos dados é desempenhada utilizando-se rede neural artificial (RNA).

2.5.2.4 Medição no campo

Devido à localização remota das cruzetas das linhas de transmissão, a plataforma de medida é baseada no uso de helicóptero. A vibração das cruzetas é induzida pela energia acústica de banda larga emitida pela máquina (rotor) do helicóptero. O dispositivo de medição da vibração é um vibrômetro a laser comercialmente disponível, com um alcance típico de alguns pés. No campo de ensaio, o helicóptero é capaz de pairar aproximadamente 16 pés das cruzetas, embora o alcance do laser deva ser estendido, de acordo com a situação.

Enquanto o helicóptero está em movimento, os dados da vibração são adquiridos, convertidos no domínio da frequência e salvos em um computador “laptop”. O sistema de aquisição de dados também salva em coordenadas GPS (latitude/altitude), logo que o espectro parte da estrutura. Uma medida típica (vibração e coordenada GPS) requer que o helicóptero paire em cada estrutura por 1 ou 2 segundos.

Após a coleta de dados, algumas amostras dessas cruzetas são removidas da instalação e submetidas ao ensaio de resistência de ruptura, semelhantemente às suas instalações no campo (nos postes), conforme demonstra a figura 2.16.

Figura 2.16: Método de ensaio de rigidez mecânica em cada cruzeta [34].

Como o propósito deste trabalho é estimar a tensão de ruptura da cruzeta de madeira com base nas características de vibração, a figura 2.17 apresenta uma parte do espectro de vibração de três cruzetas excitadas pela fonte de banda larga.

Figura 2.17: Tensão de ruptura normalizada versus frequência, para cruzetas: forte (“strong”), fraca (“weak”) e muito fraca (“mediocre”) [35].

Para analisar a relação complexa e não linear entre a tensão de ruptura e o conteúdo espectral, foi utilizada a técnica de rede neural artificial.

2.5.3 Estrutura de madeira laminada nas linhas de transmissão da Noruega [36]

2.5.3.1 Geral

A madeira laminada na Noruega tem sido usada como um material alternativo para suporte de linhas de transmissão há muitos anos. Primeiramente, ela foi usada somente como cruzeta, e depois

como estrutura inteira (postes de madeira laminada). Como cruzeta, ela tem sido usada principalmente em linhas de 66 e de 132 kV, com condutores de médio tamanho.

A madeira laminada tem várias vantagens, o que a torna interessante como alternativa na utilização de postes tradicionais de madeira e de torres de treliças de aço.

Durante os últimos anos, o interesse pelo uso de estrutura de madeira laminada e impregnada com creosoto tem aumentado na Noruega. Mais de 700 estruturas têm sido construídas por diferentes tipos de linhas aéreas, e a experiência tem sido muito boa.

Este trabalho discute as estruturas de madeira laminada como uma alternativa para os postes tradicionais de madeira e para as torres de treliças com propriedades mecânicas e econômicas significativas.

2.5.3.2 Argumentos para o uso de madeira laminada

Os argumentos para o uso de madeira laminada são:

- A necessidade de condutores pesados e vãos longos requer postes altos e largos, os quais se encontram numa crescente escassez no fornecimento;
- Com o crescente custo dos postes naturais, as estruturas de madeira laminada podem proporcionar custos menores;
- Recentemente têm aumentado as exigências das leis ambientais na construção de linhas aéreas. E muitas pessoas consideram a estrutura de madeira mais aceitável do que torres de treliça de aço nesse aspecto;
- O crescente uso de helicóptero na construção de linhas aéreas fazem da estrutura de madeira laminada uma alternativa interessante. Um poste laminado pode ser 30% mais leve do que um poste natural com a mesma resistência;
- O uso de madeira laminada permite maior possibilidade de construção de uma melhor estrutura de arquitetura;
- Em madeira laminada, há menos risco de haver material não-homogêneo, e a carga mecânica específica pode ser de 20 a 30% maior do que em postes naturais.

2.5.3.3 Madeira laminada como material de linhas de transmissão

A madeira laminada na Noruega é feita com lamelas de pinho escocês ("*Pinus Sylvestris*"). A colagem é realizada com pressão mínima de 6 kgf/cm².

O feixe laminado pode ser colado junto com diferentes seções cruzadas, por exemplo, o perfil T, onde um adesivo especial é utilizado no espaço intermediário.

Depois da colagem das diferentes partes da estrutura, elas são impregnadas com creosoto por meio do método de “Rüping”. O peso específico do laminado impregnado com creosoto é próximo do peso específico do poste natural impregnado com creosoto (0,620 a 0,650), e as suas principais características são descritas nos itens subsequentes.

a) Propriedades mecânicas

A carga mecânica específica em um poste laminado pode ser maior devido ao menor risco de não-homogeneidade. Na Noruega, tem-se verificado que a tensão de curvatura é 30% maior do que em postes naturais.

A rigidez também é maior, e o módulo de elasticidade da madeira laminada é 20% maior do que para postes naturais.

b) Custo do uso de madeira laminada

A comparação dos custos da estrutura de madeira laminada com os da torre de treliças de aço é muito complexa, porque é necessário fazer cálculos alternativos para cada projeto específico. Para a linha com circuito duplo descrito neste trabalho, o projeto demonstrou que o custo com a estrutura laminada foi quase o mesmo da torre de treliça de aço.

c) Experiência na construção e estiramento da linha

Geralmente, o uso de estrutura de madeira laminada não causa problemas especiais na construção e no estiramento da linha.

O feixe de madeira requer mais cuidado do que o poste natural no manuseio durante o transporte. O transporte por helicóptero é recomendado, mas não é necessário se o terreno permite um transporte térreo normal.

A figura 2.18 apresenta dois modelos de estruturas de madeira laminada de duas linhas de transmissão de 132 kV, instaladas em terrenos montanhosos e acidentados no meio do país (Noruega) e que estão em condição de serviço desde o início da década de 1980.

Figura 2.18: Estruturas de madeira laminada em linhas de transmissão de 132 kV, instaladas nas regiões de: (a) “Grana-Orkdal”; e (b) “Brattset – Grana” [36].

A estrutura da figura 2.18-(a) pertence a um circuito de linha de transmissão duplo de 40 km de comprimento e 216 metros de vãos, localizado a altitudes de 20 a 600 metros acima do nível do mar, com velocidade máxima do vento adotada de 40 m/s e com carga máxima de gelo de 4,0 a 7,0 kg/m. As fundações desse tipo de torre são semelhantes às das torres metálicas comuns, compostas por concreto e ferro, conforme demonstra a figura 2.19.

Figura 2.19: Fundação de concreto e ferro de algumas estruturas de madeira laminada.

Já a estrutura da figura 2.18-(b), também de madeira laminada, pertence a um circuito de linha de transmissão simples de 28 km de comprimento, localizado a altitudes de 400 a 750 metros acima do

nível do mar, com velocidade máxima do vento adotada de 50m/s e com carga máxima de gelo de 4,0 a 8,0 kg/m. As fundações desse tipo de torre são demonstradas na figura 2.18-(b).

A montagem das estruturas foi executada por meio de uma grande grua. Em algumas torres de difícil localização, foi utilizado com sucesso um helicóptero para o transporte e para a montagem, com um peso total de aproximadamente 3.000 kg. O tempo necessário para a montagem da torre da linha de circuito duplo foi menor comparado com o de uma torre de treliça de aço.

O excesso de creosoto sobre algumas torres criou alguns problemas para os eletricitistas de linha, que tiveram de tomar cuidados especiais de menor contato com esse produto.

d) Experiência de serviço

O uso de estrutura de madeira laminada não tinha mostrado problemas do ponto de vista mecânico ou eletrotécnico. Inspeções provaram que as estruturas encontravam-se nas mesmas condições de quando construídas. No entanto, não foi possível o exame da madeira laminada debaixo da terra. O movimento (“creep”) da madeira tinha sido muito pequeno, e não foi necessário apertar os seus parafusos.

A delaminação não tinha sido observada, e não abriu vãos entre os feixes colados com o adesivo. A superfície do acabamento em aço estava em excelente condição e nenhuma corrosão foi observada.

Neste caso, os pássaros pica-paus não tinham atacado a estrutura laminada na linha de 132 kV. Portanto, uma observação criteriosa estava sendo realizada após um ataque desta natureza em um poste oco laminado em uma das linhas de 66 kV.

2.5.4 Comparação das cruzetas de madeira maciça de “Douglas fir” versus as cruzetas de madeira laminada [36]

2.5.4.1 Geral

As cruzetas de madeira têm sido usadas por década pelas concessionárias. As utilizadas pela divisão de distribuição da Companhia Elétrica União têm sido fabricadas principalmente com a madeira maciça e serrada de Douglas Fir, no noroeste dos Estados Unidos.

Por causa das exigências de resistência, as cruzetas maciças e serradas requerem material de veio denso com poucos nós, de árvores que crescem lentamente, para a sua manufatura. No entanto, devido às preocupações recentes com o meio ambiente e com corujas e seu habitat, ações legais têm proporcionado várias restrições de proteção no corte de árvores antigas. O segundo e o terceiro crescimentos mais novos não possuem geralmente grãos densos na forma maciça para satisfazer os

requisitos de resistência para as cruzetas de madeira. Com todos esses fatores, o preço da cruzeta de madeira maciça e serrada tem aumentado bruscamente, enquanto que a sua disponibilidade tem caído.

Os fabricantes de cruzetas têm sido capazes de produzir cruzetas de madeira laminada após o segundo crescimento da madeira, com resultados de resistência compatíveis com os das cruzetas de madeira maciça e serrada.

2.5.4.2 Economia

O preço de mercado é diretamente afetado pelo fornecimento e pela demanda da cruzeta de madeira. Como o fornecimento e a demanda flutuam, os preços seguem o exemplo, subindo ou descendo dependendo das direções do fornecimento e da demanda. A demanda da cruzeta de madeira tem estado, nas últimas décadas, entre o um nível estável e de aumento. No entanto, a oferta procurou atingir essa demanda de modo suficiente, e entre os anos de 1980 e 1990, a preocupação ambiental com o crescimento de árvores “antigas” tinha imposto limitações no fornecimento.

Por causa desses aumentos de preços, a empresa Elétrica União decidiu apresentar alternativas em 1990. Nessa época, as cruzetas de madeira laminadas eram mais caras que as de madeira maciça, e a partir do início de 1990, ambas vieram a ser economicamente viáveis.

2.5.4.3 Projeto

Todas as cruzetas de madeiras laminadas são projetadas de acordo com a norma ANSI 05.2-1983 - “Madeira Estrutural Laminada e Colada para uso em Estruturas”, e AITC 200-93 (*American Institute of Timber Construction*) - “Manual de Inspeção para Madeira Estrutural Laminada e Colada”. As cruzetas típicas são fabricadas com 3 ou 4 peças, laminadas no eixo horizontal ou no eixo vertical, como mostra a figura 2.20.

Figura 2.20: Tipos de laminação: (a) na horizontal; e (b) na vertical [36].

Cada laminação pode consistir em uma ou mais peças no comprimento, mas somente uma é permitida na profundidade do membro. Os requisitos relacionados às características físicas das peças de madeira diferem um pouco da especificação da madeira maciça e serrada da norma ANSI 05.3-1989.

2.5.4.4 Ensaios

A empresa Elétrica União iniciou os ensaios nas cruzetas de madeira laminada em 1992. Nessa época, a empresa tinha efetuado a sua compra inicial de cruzetas de madeira laminada para uso no campo, que foram especificadas por normas nacionais. Depois de duas falhas de cruzetas laminadas no campo, uma revisão das do estoque revelou numerosas com supostos defeitos que poderiam resultar em falhas prematuras. Os supostos defeitos incluíam nós excessivos na laminação superior, excessivo “checking”, e problemas na extremidade das juntas nos pontos críticos.

O ensaio foi realizado aplicando-se carga vertical nos extremos das cruzetas de madeira maciça e de madeira laminadas fixadas a 1/3 do seu comprimento, conforme apresenta a figura 2.21.

Figura 2.21: Ensaio na cruzeta [36].

A medição da carga e da deflexão foi realizada por meio de uma série de ensaios. As cruzetas foram carregadas até ocorrer a falha, cujo tipo também foi observado e avaliado.

A fórmula utilizada neste estudo para calcular a tensão da fibra foi [36]:

$$f = \frac{M}{s} \quad (2.2)$$

Onde: f = tensão da fibra em curvatura [psi];

M = momento da força [in-lbs];

s = módulo da seção [in^3]

O módulo da seção da cruzeta usada neste ensaio foi:

- Seção completa: $s = \text{largura} \times \text{profundidade}^2 / 6$
- Seção do furo do pino: $s = (\text{diâmetro da largura do furo}) \times \text{profundidade}^2 / 6$

O critério para a aceitabilidade da resistência da cruzeta foi determinado pela tensão da fibra no ponto de falha, conhecido como Módulo de Ruptura (MOR).

Em seguida, para calcular o valor desse módulo de ruptura, algumas condições de carregamento são assumidas. Foi usado um condutor pesado, de 954 AA, com 1/2" de gelo num vão de 350'. A carga foi de aproximadamente 700 lbs. Adicionando-se a ela um eletricitista de linha com peso

típico de 250 lbs, obteve-se o resultado de uma carga total de 950 lbs na extremidade (do pino) da cruzeta. Um fator de segurança (f.s.) de 2.2 (segundo “NESC 261”) foi aplicado, tornando a carga na cruzeta de 2100 lbs. Assumiu-se que a cruzeta falhará a uma distância de $L/3$. Para uma cruzeta de 8”, carregada a 4” da extremidade, essa distância é de 29” da extremidade do pino. O módulo da seção para uma cruzeta de $3\frac{1}{2}$ ” x $4\frac{1}{2}$ ” é de 11.8125 in^3 . Conforme a equação 2.3 [36], tem-se:

$$f = F \cdot \left(\frac{d}{S}\right) \cdot f_s \quad (2.3)$$

Onde: f = tensão MOR;

F = carga;

D = braço do momento para falha;

S = módulo da seção; e

f.s. = 2.2

Uma tensão MOR de 5100 psi é calculada. E essa tensão será usada como a resistência mínima de aceitação da cruzeta.

2.5.4.5 Resultados

Os resultados dos ensaios nas cruzetas maciças e serradas demonstraram que todas as falhas ocorreram acima do valor limite de 5100 psi. E a figura 2.22 apresenta a comparação da deflexão entre a cruzeta maciça serrada e a de madeira laminada.

Figura 2.22: Comparação da deflexão entre a cruzeta de madeira maciça (SS) e a cruzeta de madeira laminada (LAM) [36].

Conforme pode ser observado na figura 2.22, os resultados de deflexão entre a cruzeta de madeira maciça são próximos dos resultados da deflexão da cruzeta de madeira laminada.

Cabe ressaltar que as especificações entre as cruzetas são as mesmas, descritas a seguir:

- Fabricadas segundo a norma ANSI 05.2;
- Tensão da fibra de 5100 psi; e
- Espaçamento mínimo de 6” entre todas as juntas encaixadas (“finger joint”).

2.5.4.6 Conclusão da comparação

As cruzetas de madeira laminada parecem uma alternativa econômica às cruzetas de madeira maciça e serrada.

Os ensaios indicaram que ambas as laminações, a horizontal e a vertical das cruzetas laminadas e serradas, podem proporcionar os requisitos de resistência especificados para a cruzeta de madeira maciça.

O Departamento de Transmissão da empresa Elétrica União não tinha tido problemas de delaminação de cruzetas de madeira laminada, em suas aplicações no campo.

No entanto, os ensaios indicaram que a laminação vertical proporciona uma cruzeta mais resistente do que a laminação horizontal. E, devido ao tamanho da madeira para a construção, as cruzetas de laminação vertical são mais econômicas quando usadas na seção de cruzamento de 3-3/4” x 4-3/4”.

Portanto, em 1993 foi determinado que as cruzetas de distribuição da empresa Elétrica União fossem todas de madeira laminada com as especificações mencionadas anteriormente [36].

2.6 Geossintéticos

Há um aumento na produção e consumo de materiais geossintéticos em diversas aplicações das áreas de geotécnica, engenharia de transporte, hidráulica, etc. Material de custo baixo que apresenta boas características de filtração, reforço e impermeabilização quando comparado a outros materiais.

São divididos em grupos de acordo com suas características de produção e aplicação. Em relação ao uso e as vendas, os dois maiores grupos são os geotêxteis e as geomembranas [37].

2.6.1 Geotêxteis

Aproximadamente 95% dos geotêxteis são produzidos com fibras de PP (PoliPropileno) [37]. A produção de geotêxtil é efetuada basicamente utilizando quatro tipos principais de fibras poliméricas: monofilamento, multifilamento, laminete e fibrilas (múltiplos laminetes). Entretanto a classificação dos geotêxteis depende do padrão de confecção do material e não do tipo de fibra.

Podem ser do tipo geotêxtil tecido, que são obtidos por meio do entrelaçamento de fios, filamentos e outros componentes, seguindo direções preferenciais denominadas trama (sentido transversal) e urdume (sentido longitudinal) [37]. Em geral são produzidos em processo de tecelagem convencional, usando tear.

Outro tipo é o geotêxtil não-tecido. São materiais compostos por fibras ou filamentos distribuídos aleatoriamente e interligados por processos químicos, mecânicos e/ou térmicos.

Por fim o geotêxtil tricotado, produzido por entrelaçamento dos laços de um ou mais fios. O padrão de entrelaçamento dos laços é idêntico a pontos de tricô[37].

2.6.1 Geomembrana

Geomembranas são materiais com baixa permeabilidade e que possuem espessura relativamente fina. Em geral são usadas para revestimentos e coberturas de líquidos ou sólidos em instalações de armazenamento. Como exemplos pode-se citar aterros sanitários, reservatórios, canais e outras instalações com o objetivo de retenção.

Capítulo 3

Processamento da resina e impregnação das cruzetas de madeira de reflorestamento

3.1 Introdução

A resina poliuretana derivada do óleo de mamona, cuja aplicação em cruzeta é inédita neste estudo, recebeu a codificação de resina RI 3 (resina pura, sem carga). Com a finalidade de diminuir o custo final do produto e também melhorar seu desempenho, foi adicionada carga (sílica) a essa resina, formando compósitos classificados como: RI 3 C10 (resina com carga na proporção de 1:0,10), RI 3 C15 (resina com carga na proporção de 1:0,15) e RI 3 C20 (resina com carga na proporção de 1:0,20).

Cabe observar que a escolha dessa carga e as proporções utilizadas foram cuidadosamente analisadas com a preocupação de que não alterassem as características físico-químicas da resina poliuretana em estudo [39]. Este trabalho contempla somente o estudo da resina poliuretana derivada do óleo de mamona do tipo RI 3, onde outros tipos de resina poliuretana derivada do óleo de mamona, por exemplo, a resina RI 1 utilizada no desenvolvimento de isoladores poliméricos [40] não apresentou bons resultados na impregnação da cruzeta de madeira de reflorestamento devido à presença de bolhas de ar visíveis na sua superfície.

Neste capítulo, serão apresentados os processamentos laboratoriais de preparação: dos corpos de provas da resina e de seus compósitos para as suas caracterizações; da impregnação nas cruzetas de madeira de reflorestamento; e de uma nova técnica de revestimento com o material geotêxtil, que foi desenvolvida e que agrega maior resistência superficial e facilidade de impregnação em escala industrial.

E por último, também será apresentada uma **estimativa** de custos das cruzetas de madeira de reflorestamento resinadas desenvolvidas neste trabalho, conforme descrevem os itens subseqüentes.

3.2 Confeção dos corpos de prova para caracterização da resina e de seus compósitos

A resina RI 3 e os seus compósitos foram confeccionados simultaneamente para garantir a comparação dos resultados dos ensaios, em moldes de vidro com bordas de fita adesiva, conforme apresenta a figura 3.1, através do processo laboratorial semelhante ao descrito anteriormente.

Figura 3.1: Resina RI 3 e seus compósitos: RI 3 C10, RI 3 C15 e RI 3 C20, preparados no mesmo dia em moldes de vidro.

Os corpos de prova foram obtidos com dispositivos de cortes nas dimensões definidas pela norma técnica [41] e [42], e com o auxílio de um prensa hidráulica, conforme ilustra a figura 3.2.

(a)

(b)

Figura 3.2: Obtenção dos corpos de prova: (a) Dispositivos de corte para os ensaios de resistência ao rasgo e tração mecânica; e (b) prensa hidráulica.

A figura 3.3 apresenta os corpos de prova de cada material para os ensaios mecânicos de tração e de resistência ao rasgo.

Figura 3.3: Corpos de provas para os ensaios mecânicos.

Cabe ressaltar que, ao longo deste trabalho, surgiram dificuldades, como formação de bolhas de ar devido à presença de umidade nos componentes da resina, conforme demonstra a figura 3.4.

Figura 3.4: *Corpo de prova confeccionado com a resina RI 3 com problema de umidade.*

Porém, este problema foi solucionado com sucesso, acionando o fornecedor que melhorou a qualidade de sua matéria prima.

3.3 Processamento da resina e sua impregnação das cruzetas de madeira de reflorestamento

Antes da impregnação da resina na madeira, é aconselhável que as cruzetas fiquem expostas em condições normais de temperatura e umidade para a secagem natural, conforme demonstra a figura 3.5.

Figura 3.5: *Condicionamento das cruzetas de madeira antes da impregnação com a resina.*

Conforme já citado no capítulo 2, a resina poliuretana derivada do óleo de mamona do tipo RI 3 é formada por dois componentes, o pré-polímero e o polioli, na proporção de 1:1.5, com tempo de

cura total de 24 horas na temperatura ambiente. E a preparação da resina inicia-se com a pesagem do poliol (150 gramas) na balança, como ilustrado na figura 3.6.

Figura 3.6: *Pesagem de 150 g de poliol.*

Após o que, 100 gramas de pré-polímero é adicionada à mistura (vide a figura 3.7).

Figura 3.7: *Acréscimo de 100 g de pré-polímero.*

A mistura assim preparada é colocada dentro do agitador a vácuo por seis minutos, tempo máximo de processamento da resina, para depois, finalmente, ser usada na impregnação da cruzeta. Vide figura 3.8.

Figura 3.8: Agitador à vácuo.

No caso da preparação do compósito (resina com carga), 50 gramas de sílica é adicionada primeiramente ao polioliol durante cinco minutos para garantir uma mistura homogênea, conforme demonstra a figura 3.9. Depois, acrescentando-se o pré-polímero, novamente a mistura é agitada por seis minutos no vácuo.

Figura 3.9: Acréscimo de 50 gramas de sílica no polioliol, para a formação do compósito.

A sequência de impregnação é demonstrada na figura 3.10, com a resina pura, para melhor visualização. Observe-se claramente a mudança de coloração da madeira durante o processo.

(a)

(b)

Figura 3.10: Aplicação da resina RI 3 sobre a cruzeta de 2,4 m, na parte: (a) superior; e (b) lateral.

Após a aplicação da resina sobre toda a superfície da madeira, os furos da cruzeta também são impregnados com o auxílio de um tecido e de um parafuso, de modo a atravessar o orifício por completo. Vide a figura 3.11.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 3.11: Impregnação do furo da cruzeta: (a) no início; (b) no meio; (c) final; e (d) retirada.

A impregnação na cruzeta também pode ser realizada sem a aplicação de vácuo, porém, neste caso, observa-se uma diferença significativa na impregnação, com acúmulos de resina, e bolhas de ar visíveis, conforme demonstra a figura 3.12.

Figura 3.12: Furo com excesso de resina.

As cruzetas de madeira impregnadas com a resina poliuretana derivada do óleo de mamona apresentam uma cor com brilho e uma ótima aderência, conforme mostram as figuras 3.13 e 3.14, a seguir.

Figura 3.13: Cruzeta de madeira de *Pinus elliottii* impregnada com a resina poliuretana derivada do óleo de mamona.

Figura 3.14: Cruzeta de madeira de *Eucalyptus citriodora* impregnada com a resina poliuretana derivada do óleo de mamona.

3.4 Impregnação das cruzetas de madeira com a resina RI 3 e revestimento com o material geotêxtil

O material geotêxtil de poliéster, com o código industrial G200, foi aplicado no revestimento da cruzeta resinada com a finalidade de melhorar as suas características mecânicas e a sua durabilidade, e como o início do estudo de um trabalho futuro.

Os corpos de prova escolhidos foram cruzetas de madeira de *Pinus elliotti* que apresentam muitos nós e possuem quase a metade do peso das cruzetas de *Eucalyptus citriodora*.

Como forma de revestimento optou-se por colocar tiras de geotêxtil em uma cruzeta e, na outra, uma manta de geotêxtil cobrindo-a por inteiro, conforme apresenta a figura 3.15.

(a)

(b)

Figura 3.15: Preparação das cruzetas: (a) sem resina; e (b) com resina.

O processo de revestimento das cruzetas com as tiras e com manta geotêxtil foi o mesmo. Primeiramente, foi realizada a impregnação da cruzeta com a resina poliuretana derivada do óleo de

mamona com carga (sílica), em seguida foi colocada a manta geotêxtil, e por último, efetuou-se a vedação com o compósito. Utilizou-se, assim, um total de 990 gramas de compósito, sendo 825 g de resina e 165 g de sílica. O resultado é apresentado na figura 3.16.

(a)

(b)

Figura 3.16 Cruzetas impregnadas com resina RI 3 e revestida com geotêxtil, em tira e em manta: (a) vista A; e (b) vista B.

Como se pode observar, a resina aderiu muito bem na cruzeta e no material geotêxtil. Os resultados do ensaio mecânico de flexão dessas cruzetas são apresentados no capítulo 6.

3.5 Preços estimados das cruzetas de madeira de reflorestamento resinadas, de 2,4 metros

Devido à complexidade existente num cálculo de custo de um novo produto que não tem a sua linha de produção definida, neste trabalho não será apresentada a comparação exata de preço entre as cruzetas de madeira resinadas desenvolvidas e as cruzetas comerciais. Contudo, será apresentada uma comparação aproximada de custos. Este assunto, na verdade, enquadra-se melhor no trabalho futuro que fará uma análise da produção, abordando o material, processo de impregnação, revestimento com geotêxtil, mão-de-obra, gastos com encargos sociais e tributários.

Na tabela 3.1 encontra-se uma estimativa dos custos da cruzeta impregnada em comparação com outras cruzetas do mercado. No cálculo dos custos da cruzeta impregnada, foram usados o preço da cruzeta de madeira e o custo de 300 g de impregnação.

Tabela 3.1: Preços médios das cruzetas de 2,4 metros.

TIPO DE CRUZETA DE 2,4 METROS	ESTIMATIVA DE CUSTO (R\$)	ESTIMATIVA DE CUSTO (US\$)¹
Madeira tradicional / comercial	55,00	16,32
Concreto	40,00	11,98
Madeira de <i>Pinus elliottii</i>	35,00	10,38
Madeira de <i>Eucalyptus citriodora</i>	30,00	8,90
Madeira de <i>Eucalyptus citriodora</i> <i>resinada</i>	50,00	14,83

Embora as cruzetas de *Pinus elliottii* resinadas apresentem estimativa de custos menores que as tradicionais, conforme a descrição da tabela 3.1, elas não foram aprovadas neste trabalho porque possuem restrições na sua aplicação, detectadas nos ensaios mecânicos de flexão, principalmente em razão dos nós.

Ressalta-se também da tabela 3.1 que as cruzetas de madeira de reflorestamento (de *Eucalyptus citriodora*) revestidas com a resina poliuretana derivada do óleo de mamona - RI3, possivelmente apresentarão, em escala industrial, preços ainda menores que as tradicionais comerciais usadas como referência, com a vantagem de possuírem ótimas características de desempenho na rede de distribuição de energia elétrica, conforme serão apresentadas nos capítulos posteriores.

Capítulo 4

Ensaaios mecânicos na resina poliuretana derivada do óleo de mamona - RI 3

4.1 Introdução

A realização de diferentes ensaios mecânicos na resina poliuretana derivada do óleo de mamona RI 3 com e sem carga, antes de sua aplicação nos elementos do sistema de energia elétrico, foi imprescindível para todo o trabalho.

Os ensaios mecânicos apresentados neste capítulo são o de tração, o de resistência ao rasgo e o de determinação da dureza após cento e vinte horas de tempo de cura, cujos procedimentos acompanharam as orientações de normas técnicas.

No entanto, com a finalidade de verificar o comportamento desse material com o tempo de cura, foi realizado também o ensaio de tração mecânica após três meses de cura, conforme as descrições nos itens subsequentes.

4.2 Ensaio de tração mecânica na resina, após 120 horas de tempo de cura.

4.2.1 Objetivo do ensaio de tração

Determinar a tensão de tração mecânica e o módulo de elasticidade da resina RI 3, empregada como revestimento na cruzeta de madeira, em relação à proporção adequada de carga (sílica) a ser utilizada no compósito.

4.2.2 Procedimentos do ensaio de tração

Antes da descrição de todo o ensaio, é importante apresentar algumas definições, segundo [42]:

- a tensão de tração (nominal), que é a razão entre a carga ou força de tração aplicada e a área inicial mínima da seção transversal do corpo de prova, devendo ser expressa em megapascal (MPa);
- o módulo de elasticidade em tração ou módulo de Young, que é a razão entre a tensão de tração (nominal) e a deformação correspondente, abaixo do limite de proporcionalidade do material. O limite de proporcionalidade é a maior tensão que o material é capaz de suportar sem qualquer desvio de proporcionalidade entre a tensão e a deformação (*Lei de Hooke*). Esse módulo, embora não deva ser utilizado como sinônimo de rigidez, está diretamente relacionado com este comportamento mecânico. Isto é, quanto maior for o valor do módulo de Young, maior será a rigidez do polímero;

No ensaio mecânico de tração, foram empregados 5 corpos de prova com espessura em torno de 3 mm de acordo com as especificações do corpo de prova do tipo II relatado na norma ASTM D638 [42], e velocidade do ensaio de 50 mm/minuto.

A figura 4.1 apresenta fotografias dos corpos de provas submetidos aos ensaios mecânicos de tração, na Máquina Universal de Ensaio EMIC, com capacidade para 30 kN.

Figura 4.1: Ensaio de tração mecânica na resina poliuretana RI 3.

4.2.3 Resultados do ensaio de tração mecânica realizada na resina RI 3 com e sem carga, após 120 h de tempo de cura

A figura 4.2 apresenta os corpos de prova da resina RI 3 (formato do tipo II da ASTM D638) [42], utilizados no ensaio de tração da resina após a ruptura.

(a)

(b)

Figura 4.2: *Corpos de prova da resina RI 3 após a ruptura: (a) na máquina de ensaio; e (b) numerados.*

Os resultados obtidos nos ensaios de tração mecânica da resina RI 3 encontram-se nas tabelas 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, e nas figuras 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 a seguir.

Tabela 4.1: Ensaios de tensão de tração após 120 horas de cura da resina sem carga.

Identificação do corpo de prova	Força máxima (N)	Deformação específica do dispositivo (%)	Tensão de tração (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
1	46,14	151,8	2,896	6,188
2	46,73	147,7	2,779	8,150
3	46,99	147,7	3,107	6,941
4	53,47	157,4	3,811	9,146
5	50,07	141,1	2,726	7,118
Valor Médio	48,68	149,1	3,064	7,509
Coef. Var. (%)	6,330	4,025	14,45	15,34

A curva característica da variação da deformação específica do dispositivo de ensaio de tração mecânica da resina RI 3 sem carga, após 120 horas de cura, é apresentada na figura 4.3.

Figura 4.3: Variação da deformação específica do dispositivo de ensaio com a tensão de tração da resina RI 3 sem carga, após 120 horas de cura.

Tabela 4.2: Ensaio de tensão de tração após 120 horas de cura da resina com carga na proporção de 1:0,10 (resina: carga).

Identificação do corpo de prova	Força máxima (N)	Deformação específica do dispositivo (%)	Tensão de tração (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
1	90,98	167,4	5,670	7,016
2	108,8	161,4	6,129	11,10
3	87,38	170,8	5,669	6,429
4	97,65	160,4	7,774	13,41
5	85,87	167,9	6,214	7,640
Valor Médio	94,13	165,6	6,291	9,120
Coef. Var. (%)	9,948	2,718	13,77	32,99

A curva característica da variação da deformação específica do dispositivo de ensaio de tração mecânica da resina RI 3 com carga, após 120 horas de cura, na proporção de 1:0,10 (resina:carga), é apresentada na figura 4.4.

Figura 4.4: Variação da deformação específica do dispositivo de ensaio com a tensão de tração da resina RI 3 com carga, após 120 horas de cura, na proporção de 1: 0,10.

Tabela 4.3: Ensaio de tensão de tração após 120 horas de cura da resina com carga, na proporção de 1:0,15 (resina: carga).

Identificação do corpo de prova	Força máxima (N)	Deformação específica do dispositivo (%)	Tensão de tração (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
1	91,17	162,4	6,167	7,509
2	88,75	163,3	6,423	8,758
3	91,70	164,9	7,137	8,371
4	108,1	161,4	7,067	8,915
5	114,7	162,6	9,621	20,67
Valor Médio	98,88	162,9	7,283	10,85
Coef. Var. (%)	11,84	0,7927	18,83	50,91

A curva característica da variação da deformação específica do dispositivo de ensaio de tração mecânica da resina RI 3 com carga, após 120 horas de cura, na proporção de 1:0,15, é apresentada na figura 4.5.

Figura 4.5: Variação da deformação específica do dispositivo de ensaio com a tensão de tração da resina RI 3 com carga, após 120 horas de cura, na proporção de 1: 0,15.

Tabela 4.4: Ensaio de tensão de tração após 120 horas de cura da resina, na proporção de 1:0,20 (resina: carga).

Identificação do corpo de prova	Força máxima (N)	Deformação específica do dispositivo (%)	Tensão de tração (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
1	121,90	160,1	9,429	17,47
2	114,90	159,30	8,202	11,44
3	101,0	121,50	6,207	16,03
4	93,73	106,6	7,642	38,62
5	75,73	96,19	4,937	21,70
Valor Médio	101,4	128,7	7,284	21,05
Coef. Var. (%)	17,91	23,05	24,02	49,79

A curva característica da variação da deformação específica do dispositivo de ensaio de tração mecânica da resina RI 3, após 120 horas de cura, na proporção de 1:0,20 (resina:carga), é apresentada na figura 4.6.

Figura 4.6: Variação da deformação específica do dispositivo de ensaio com a tensão de tração da resina RI 3 com carga, após 120 horas de cura, na proporção de 1: 0,20.

A tabela 4.5 e a figura 4.6 apresentam os valores médios de tração e de módulo de elasticidades para a resina e para o seu compósito, após 120 horas de cura.

Tabela 4.5: Valores médios da resina RI 3 e de seus compósitos, após 120 horas de cura.

Material	Força máxima (N)	Deformação específica do dispositivo (%)	Tensão de tração (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
Resina RI 3 (sem carga)	48,68	149,1	3,064	7,509
Resina RI 3 C10 (1:0,10)	94,13	165,6	6,291	9,120
Resina RI 3 C15 (1:0,15)	98,88	162,90	7,283	10,85
Resina RI 3 C20 (1:0,20)	101,4	128,7	7,284	21,05
Valor Médio	101,4	128,7	7,284	21,05
Coef. Var. (%)	17,91	23,05	24,02	49,79

Figura 4.7: Valores médios da tensão de tração e do módulo de elasticidade (Módulo de Young) da resina RI 3 com e sem carga, após 120 horas de cura.

4.3 Ensaio de resistência ao rasgo, após 120 h de tempo de cura

4.3.1 Objetivo do ensaio de resistência ao rasgo

Determinar a proporção adequada de carga (sílica) a ser utilizada no compósito da resina RI 3 empregada como revestimento na cruzeta de madeira, em função dos resultados do ensaio de resistência ao rasgo.

4.3.2 Procedimentos do ensaio de resistência ao rasgo

O método de ensaio baseou-se na determinação da força necessária para iniciar o rasgo no material em análise. A geometria do corpo de prova neste método de ensaio produz uma concentração de tensão na menor área da amostra. A máxima tensão é atingida no início do rasgo e ela é relatada como a resistência ao rasgo, em newtons [41].

A resistência ao rasgo possui uma correlação complexa com a espessura da amostra, e a comparação dos resultados só pode ser realizada quando as espessuras variam em torno de 10% da espessura média de todas as amostras submetidas ao ensaio.

No ensaio de resistência ao rasgo, foram empregados 5 corpos de prova com espessura em torno de 3 mm, de acordo com as especificações da norma ASTM 1004 [41], e velocidade do ensaio de 51 mm/minuto. Após a verificação da espessura do corpo de prova, foi aplicada uma carga na velocidade controlada até ocorrer sua ruptura.

As figuras 4.8 e 4.9 apresentam fotografias dos corpos de provas submetidos ao ensaio de resistência ao rasgo, na Máquina Universal de Ensaio EMIC, com capacidade para 30 kN.

Figura 4.8: Ensaio de resistência ao rasgo na resina poliuretana RI 3: (a) Máquina Universal de ensaio; e (b) detalhe da garra.

(a)

(b)

Figura 4.9: Corpos de prova utilizados no ensaio de resistência ao rasgo: (a) dimensões da norma [8]; e (b) de resina poliuretana RI 3.

4.3.3 Resultados do ensaio de resistência ao rasgo, após 120 h de tempo de cura

A figura 4.10 apresenta o corpo de prova da resina RI 3 durante a ruptura no ensaio de resistência ao rasgo.

Figura 4.10: Corpo de prova da resina RI 3 durante a ruptura.

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência ao rasgo da resina RI 3 com e sem carga encontram-se nas tabelas 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9, e nas figuras 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14, a seguir.

Tabela 4.6: Resistência ao rasgo após 120 horas de cura da resina sem carga.

Identificação do corpo de prova	Espessura (mm)	Força máxima (N)
1	3,35	35,74
2	3,95	42,74
3	3,74	41,69
4	3,55	37,50
5	3,62	36,13
Valor Médio	3,64	38,76
Desvio-padrão	0,223	3,242

A curva característica da variação da deformação específica do dispositivo de ensaio com a força de ruptura (rasgo) da resina RI 3 sem carga, após 120 horas de cura, é apresentada na figura 4.11.

Figura 4.11: Variação da deformação específica do dispositivo de ensaio com a força máxima aplicada na resina RI 3 sem carga, após 120 horas de cura.

Tabela 4.7: Resistência ao rasgo após 120 horas de cura da resina com carga na proporção de 1:0,10 (resina: carga).

Identificação do corpo de prova	Espessura (mm)	Força máxima (N)
1	3,76	59,23
2	3,28	52,56
3	3,14	50,20
4	3,44	50,40
5	3,55	52,69
Valor Médio	3,43	53,02
Desvio-padrão	0,240	3,664

A curva característica da variação da deformação específica do dispositivo de ensaio de resistência ao rasgo na resina RI 3 com carga, após 120 horas de cura, na proporção de 1:0,10 (resina:carga), é apresentada na figura 4.12.

Figura 4.12: Variação da deformação específica do dispositivo de ensaio com a força máxima aplicada na resina RI 3 com carga após 120 horas de cura, na proporção de 1: 0,10.

Tabela 4.8: Resistência ao rasgo após 120 horas de cura da resina com carga na proporção de 1:0,15 (resina: carga).

Identificação do corpo de prova	Espessura (mm)	Força máxima (N)
1	2,05	45,42
2	2,39	41,04
3	2,29	43,00
4	2,16	40,84
5	2,48	43,59
Valor Médio	2,27	42,780
Desvio-padrão	0,173	1,902

A curva característica da variação da deformação específica do dispositivo de ensaio de resistência ao rasgo na resina RI 3 com carga, após 120 horas de cura, na proporção de 1:0,15, é apresentada na figura 4.13.

Figura 4.13: Variação da deformação específica do dispositivo de ensaio com a força máxima aplicada na resina RI 3 com carga, após 120 horas de cura, na proporção de 1:0,15.

Tabela 4.9: Resistência ao rasgo após 120 horas de cura da resina com carga na proporção de 1:0,20 (resina: carga).

Identificação do corpo de prova	Espessura (mm)	Força máxima (N)
1	3,62	57,33
2	3,20	54,85
3	3,33	63,49
4	3,10	51,84
5	3,00	54,59
Valor Médio	3,25	56,42
Desvio -padrão	0,240	4,405

A curva característica da variação da deformação específica do dispositivo de ensaio de resistência ao rasgo na resina RI 3, após 120 horas de cura, na proporção de 1:0,20 (resina:carga), é apresentada na figura 4.14.

Figura 4.14: Variação da deformação específica do dispositivo de ensaio com a força máxima aplicada na resina RI 3 com carga, após 120 horas de cura, na proporção de 1:0,20.

A tabela 4.10 e a figura 4.15 apresentam os valores médios obtidos no ensaio de resistência ao rasgo, após 120 horas de cura da resina e de seus compósitos.

Tabela 4.10: Valores médios dos ensaios de resistência ao rasgo, após 120 horas de cura.

Material	Espessura (mm)	Força máxima (N)
Resina RI 3 (sem carga)	3,64	38,76
Resina RI 3 C10 (1:0,10)	3,43	53,02
Resina RI 3 C20 (1:0,20)	3,25	56,42
Média	3,44	49,40
Desvio -padrão	0,195	9,370

Figura 4.15: Força máxima aplicada na resina RI 3 com carga após 120 horas de cura.

Os valores obtidos nos corpos de prova de resina com carga na proporção de 1:0,15 **não foram incluídos na comparação**, porque suas espessuras apresentaram valores inferiores ao valor médio das espessuras, com variação acima de 10% [41].

4.4 Ensaio de dureza mecânica na resina, após 120 h de tempo de cura

4.4.1 Objetivo do ensaio de dureza

Determinar a proporção adequada de carga (sílica) na resina, em função da propriedade de dureza mecânica.

4.4.2 Procedimentos do ensaio de dureza

Para o ensaio de dureza mecânica, foram utilizados corpos de prova de cada material na dimensão de 45 x 45 x 3 mm, conforme a norma ASTM D2240 (*Standard Test Method for Rubber Property – Durometer Hardness*) [41]. O material submetido ao ensaio foi a resina RI 3 sem carga e a resina RI 3 com carga nas proporções de 1:0,10 (RI 3 C10), 1:0,15 (RI 3 C15) e 1:0,20 (RI 3 C20), após 120 horas de cura, conforme demonstra a figura 4.16.

Figura 4.16: Corpos de prova utilizados no ensaio de dureza mecânica.

A figura 4.17 apresenta uma fotografia do equipamento durômetro da marca Wulstest, modelo MP3 na escala *Shore D* utilizado no ensaio de dureza mecânica. As condições do ambiente foram 21°C de temperatura e 61% de umidade relativa do ar, e a leitura da propriedade de dureza mecânica foi efetuada após 10 segundos do início do ensaio.

Figura 4.17: Aparelho de medir a dureza do material, escala Shore D, conforme ASTM D2240 [41].

4.4.3 Resultado do ensaio de dureza realizado na resina RI 3

Os resultados do ensaio na resina com e sem carga, após 120 horas de cura, encontram-se na tabela 4.11 e nas figuras 4.18 e 4.19.

Tabela 4.11: Dureza mecânica da resina RI 3 com e sem carga, após 120 horas de cura.

Medidas	RI 3	RI 3 C10	RI 3 C15	RI 3 C20
1	36	40	41	43
2	36	41	41	42
3	37	41	42	43
4	37	40	41	43
5	37	41	41	43
Média	37	41	41	43
Desvio	0,5	0,5	0,4	0,4
Padrão

Figura 4.18: Dureza mecânica na resina RI 3 com e sem carga.

Figura 4.19: Variação da dureza mecânica na resina RI 3 com e sem carga.

4.5 Ensaio de tração mecânica na resina RI 3 com e sem carga, após três meses de cura

4.5.1 Ensaio de tração mecânica na resina com carga, após três meses de tempo de cura

No ensaio mecânico de tração de caracterização da resina com diferentes proporções de carga, foram empregados cinco corpos de prova com espessura em torno de 3 mm, de acordo com as especificações do corpo de prova do tipo IV relatado na norma ASTM D638 [42], e velocidade do ensaio de 50 mm/minuto. Os corpos de prova foram confeccionados junto com os outros submetidos

aos ensaios de tração há três meses atrás, cujos resultados foram apresentados no relatório anterior. Sendo assim, aguardaram-se esses três meses (aproximadamente 2.160 horas) para analisar o comportamento dessa resina com o tempo de cura.

4.5.2 Resultados do ensaio de tração mecânica realizada na resina RI 3 com diferentes proporções de carga, após três meses de tempo de cura

Os resultados obtidos nos ensaios de tração mecânica da resina RI 3 com diferentes proporções de carga e após três meses de cura, encontram-se nas tabelas 4.12, 4.13 e 4.14 e nas figuras 4.20, 4.21 e 4.22, a seguir.

Tabela 4.12: Ensaios de tensão de tração após 3 meses de cura da resina sem carga (RI 3).

Identificação do corpo de prova	Força máxima (N)	Deformação específica do dispositivo (%)	Tensão de tração (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
1	160,0	24,08	12,44	226,4
2	201,7	27,04	12,77	241,1
3	180,6	22,71	12,83	229,5
4	138,9	18,46	11,55	214,6
5	191,8	19,40	12,82	248,7
Valor Médio	174,6	22,34	12,48	232,1
Coef. Var. (%)	14,5	15,67	4,39	5,7

A curva característica da variação da deformação específica do dispositivo de ensaio de tração mecânica da resina RI 3, após 3 meses de cura, é apresentada na figura 4.20.

Figura 4.20: Variação da deformação específica do dispositivo de ensaio com a tensão de tração da resina RI 3, após 3 meses de cura.

Tabela 4.13: Ensaios de tensão de tração após 3 meses de cura da resina, na proporção de 1:0,10 (resina: carga), RI 3C10.

Identificação do corpo de prova	Força máxima (N)	Deformação específica do dispositivo (%)	Tensão de tração (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
1	288,2	9,445	22,15	435,2
2	248,7	9,950	22,77	503,8
3	211,9	9,878	21,88	472,8
4	271,5	9,734	22,49	467,5
5	321,6	9,662	21,83	434,0
Valor Médio	268,4	9,734	22,22	462,7
Coef. Var. (%)	15,4	2,029	1,81	6,3

A curva característica da variação da deformação específica do dispositivo de ensaio de tração mecânica da resina RI3C10, após 3 meses de cura, na proporção de 1:0,10 (resina:carga), é apresentada na figura 4.21.

Figura 4.21: Variação da deformação específica do dispositivo de ensaio com a tensão de tração da resina RI 3C10, após 3 meses de cura, na proporção de 1: 0,10 (resina:carga) .

Tabela 4.14: Ensaios de tensão de tração após 3 meses de cura da resina, na proporção de 1:0,15 (resina: carga), RI 3C15.

Identificação do corpo de prova	Força máxima (N)	Deformação específica do dispositivo (%)	Tensão de tração (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
1	431,6	9,373	25,18	457,2
2	393,6	9,445	25,53	487,2
3	360,3	8,941	24,64	452,3
4	355,2	8,724	25,40	491,2
5	423,3	8,869	26,08	536,3
Valor Médio	392,8	9,071	25,36	484,8
Coef. Var. (%)	8,9	3,528	2,07	6,9

A curva característica da variação da deformação específica do dispositivo de ensaio de tração mecânica da resina RI 3C15, após 3 meses de cura, na proporção de 1:0,15, é apresentada na figura 4.22.

Figura 4.22: Variação da deformação específica do dispositivo de ensaio com a tensão de tração da resina RI 3C15, após 3 meses de cura.

4.6 Conclusão

Os valores da tensão de tração, do módulo de elasticidade, da resistência ao rasgo e da dureza mecânica aumentam com a quantidade de carga adicionada. Sendo assim, o compósito da resina RI 3 com carga na proporção de 1:0,20 apresenta os melhores resultados e, por isso, foi adotado na impregnação das cruzetas de madeira de reflorestamento.

Após três meses de cura, o acréscimo da carga (sílica) na resina poliuretana derivada do óleo de mamona aumentou as propriedades de tensão de tração mecânica da resina, em aproximadamente 78% na proporção de 1:10 e em 103% na proporção de 1:15.

Comparando-se, os resultados dos ensaios mecânicos realizados nas mesmas condições e, segundo a norma técnica ASTM D 638 [42], observa-se que, com o passar do tempo, a resina e seus compósitos aumentaram significativamente os seus valores de resistência à tração e de módulo de elasticidade. Portanto, essas resinas com e sem carga submetidas ao ensaio de tração, após 120 horas de cura, são classificadas como “plástico não rígido” (com o módulo de elasticidade abaixo de 70 MPa), e depois elas se tornam um “plástico semi-rígido” (com módulo de elasticidade maior que 70 MPa), conforme a descrição da norma ASTM D 883 [44].

Capítulo 5

Ensaio de tração mecânica na madeira resinada submetida às diferentes condições climáticas

5.1 Introdução

Neste capítulo, será apresentado o ensaio de tração mecânica da madeira (*Eucalyptus citriodora*) impregnada com a resina poliuretana derivada do óleo de mamona do tipo RI 3 com carga (sílica), após um mês de tempo de cura.

Cabe ressaltar que as amostras foram confeccionadas no mesmo dia, porém metade delas foi submetida ao ciclo de variação de temperatura (de -10oC a + 60oC) e de umidade relativa do ar (de 0% a 92%) segundo a norma técnica IEC 60068 [45]. O ensaio de tração mecânica foi realizado posteriormente no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeiras da Escola de Engenharia de São Carlos – USP, como parte da parceria do Grupo de Alta Tensão e Medidas, sob supervisão do Prof. Ruy A. C. Altafim.

Este ensaio foi realizado com o objetivo de verificar o comportamento mecânico desse novo material após a sua submissão a condições climáticas consideradas críticas, conforme será apresentado nos itens subsequentes..

5.2 Procedimentos do ensaio de tração mecânica na madeira resinada

No ensaio mecânico de tração de caracterização da madeira impregnada com a resina poliuretana derivada do óleo de mamona do tipo RI 3 com carga (sílica), foram empregados

dez corpos de prova com espessura em torno de 7 mm e com largura próxima a 50 mm, conforme apresenta a figura 5.1.

Figura 5.1: *Corpos de prova de madeira resinada, utilizados no ensaio de tração mecânica.*

Os corpos de prova foram confeccionados no mesmo dia, porém cinco deles foram submetidos a dez ciclos de 24 horas cada de variação de temperatura (de -10°C a $+60^{\circ}\text{C}$) e de umidade relativa do ar (de 0% a 92%) segundo a norma técnica IEC 60068 [43]. Os principais são:

- cinco corpos de prova de *Eucalyptus citriodora* resinado: código ECR; e
- cinco corpos de prova de *Eucalyptus citriodora* resinado e envelhecido na câmara de climatização: código ECRE.

A figura 5.2 apresenta as amostras dentro da câmara de climatização e o esquema de variação da temperatura e da umidade relativa do ar.

(a)

(b)

Figura 5.2: Variações críticas de temperatura (T) e umidade (“r.F.”): (a) corpos de prova dentro da câmara; e (b) ciclo de variação de 24 horas.

A figura 5.3 apresenta a Máquina Universal de Ensaio DARTEC LTD., com capacidade para 100 kN e com a ilustração de seu *software*.

Figura 5.3: Ensaio de tração mecânica na resina poliuretana RI 3: (a) Máquina Universal de Ensaio DARTEC; e (b) software DARTEC LTD.

As dimensões de cada corpo de prova foram cuidadosamente medidas com o auxílio de um micrômetro e de um paquímetro conforme demonstra a figura 5.4. A descrição dos equipamentos utilizados nestes ensaios encontra-se no anexo A.

Figura 5.4: Medição das dimensões dos corpos de prova de madeira impregnada com resina RI 3 com carga.

Antes e depois de os corpos de prova serem submetidos à câmara de climatização, foram observadas as suas superfícies com o auxílio de um microscópio, conforme a figura 5.5.

Figura 5.5: Uso do microscópio na observação da superfície dos corpos de prova.

5.3 Resultados do ensaio de flexão mecânica realizado na madeira impregnada com o compósito da resina RI 3

Primeiramente, é interessante observar que não ocorreu nenhum dano à superfície dos corpos de madeira impregnada com o compósito da resina RI 3 após eles terem sido submetidos às condições críticas de temperatura e de umidade nos dez ciclos da norma IEC 60068[1], conforme ilustram as fotografias da figura 5.6, obtidas no microscópio (com multiplicação de 100 vezes na imagem).

(a)

(b)

Figura 5.6: Fotografias microscópicas dos corpos de prova de madeira resinada: (a) antes; e (b) depois.

Os resultados obtidos nos ensaios de tração mecânica da madeira impregnada com o compósito da resina RI 3 encontram-se nas tabelas 5.1 e 5.2.

Tabela 5.1: Ensaios de tensão de tração na madeira resinada antes do envelhecimento.

Identificação do corpo de prova	Largura (mm)	Espessura (mm)	Força máxima (kN)
ECR 1	48,4	7,73	44
ECR 2	48,3	7,63	45,4
ECR 3	48,6	7,6	43,1
ECR 4	48,0	7,19	49,2
ECR 5	47,7	7,68	51,2
Valor Médio	48,2	7,57	46,6
Desvio Padrão	0,4	0,2	3,5

Tabela 5.2: Ensaios de tensão de tração na madeira resinada depois do envelhecimento.

Identificação do corpo de prova	Largura (mm)	Espessura (mm)	Força máxima (kN)
ECRE 1	48,2	7,92	52,6
ECRE 2	48,4	6,9	48,2
ECRE 3	48,2	7,34	55,2
ECRE 4	48,7	7,24	42,9
ECRE 5	47,8	5,95	25,9
Valor Médio	48,3	7,07	45,0
Desvio Padrão	0,3	0,7	11,6

5.4 Conclusão

Os valores de força máxima de ruptura obtidas entre os corpos de prova de madeira resinada e submetidas a diferentes tratamentos, encontram-se dentro do coeficiente de variação das propriedades da madeira de reflorestamento, que é de 18%, conforme a norma técnica da Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 7190/97 [46].

Conclui-se que não ocorreu nenhum dano à superfície dos corpos de madeira impregnada com o compósito da resina RI 3 após eles serem submetidos às condições críticas de temperatura e de umidade nos dez ciclos apresentados da norma IEC 60068 [45].

Capítulo 6

Ensaio mecânico nas cruzetas de madeira impregnadas com a resina poliuretana-RI 3

6.1 Introdução

Após a realização dos ensaios mecânicos em corpos de prova de resina e de madeira, foi realizado o ensaio mecânico de flexão diretamente nas cruzetas de madeira de 2,4 metros, conforme as especificações técnicas de operação.

Cabe ressaltar que, na confecção dos corpos de prova e nos ensaios das cruzetas de madeira deste trabalho de pesquisa, optou-se por substituir a madeira de *Eucalyptus grandis* pela madeira de *Eucalyptus citriodora*, em função de sua maior disponibilidade no mercado e também por essa segunda espécie de madeira possuir propriedades mecânicas superiores à primeira.

As simulações computacionais realizadas através do método de elementos finitos, com os dois tipos de madeiras de reflorestamento, *Pinus elliottii* e *Eucalyptus citriodora*, também são descritas neste capítulo, conforme os itens a seguir.

6.2 Ensaio de flexão mecânica nas cruzetas de madeira impregnadas com a resina poliuretana derivada do óleo de mamona, do tipo RI 3

6.2.1 Objetivo do ensaio

Verificar o desempenho das cruzetas de madeira do tipo *Eucalyptus citriodora* e do tipo *Pinus elliottii* impregnadas com a resina poliuretana derivada do óleo de mamona quando submetidas às condições de flexão mecânica, de acordo com a sua instalação na rede de distribuição de energia elétrica.

6.2.2 Procedimentos do ensaio de flexão mecânica nas cruzetas

Os procedimentos dos ensaios foram realizados conforme a Norma Técnica da ABNT (NBR 8458 - Cruzetas de madeira para rede de distribuição de energia elétrica. Abril de 1984) [20].

Os dois esforços F foram iguais e aplicados simultaneamente na face da cruzeta, segundo a figura 6.1, que identifica os pontos de fixação.

Figura 6.1: Cruzeta de 2,40 metros de comprimento.

As quatro faces da cruzeta foram submetidas ao ensaio não simultaneamente e as flechas foram medidas em ambos os topos da cruzeta.

Neste trabalho foram realizados três tipos de ensaios, do seguinte modo:

1. Foi aplicada a carga de 400 kgf e foram medidas as flechas (e seu resíduo) nas extremidades da cruzeta para verificar a sua resistência de flexão nominal ($RN = 400$ kgf);
2. Foi aplicada a carga de 560 kgf e foram medidas as flechas (e o seu resíduo) nas extremidades da cruzeta para verificar a sua resistência no limite de carregamento ($1,4 \times RN = 560$ kgf); e
3. Foi aplicada carga até ocorrer a ruptura na cruzeta (que no mínimo deve ser igual a 2 vezes a resistência nominal – 800 kgf), para determinar a resistência de flexão.

Os aparelhos utilizados no ensaio de flexão mecânica foram:

- Máquina Hidráulica: fabricante VICKERS Hidráulica Ltda., modelo XG 06 F 20. Com capacidade para 10 toneladas e com constante igual a 10,826 kgf por divisões;
- Relógio comparador: Mitutoyo, modelo BBY 051, No. 3058 F;
- Medidor de temperatura e umidade relativa do ar: Marca Templec Ltda.

O conjunto do dispositivo do ensaio encontra-se na figura 6.2.

(a)

(b)

Figura 6.2: Dispositivo do ensaio de flexão mecânica na cruzeta: (a) pontos importantes; e (b) medições realizadas.

As condições ambientais durante o ensaio foram:

- temperatura: 21°C;
- umidade relativa do ar: 61%.

6.2.3 Corpos de prova

Os corpos de prova utilizados foram:

- 3 cruzetas de madeira de 2,4 m do tipo *Eucalyptus citriodora* tratado, impregnadas com resina poliuretana derivada do óleo de mamona do tipo RI 3: códigos CTR 1, CTR 2 e CTR 3;
- 3 cruzetas de madeira de 2,4 m do tipo *Eucalyptus citriodora* tratado: código CT 1, CT 2 e CT 3.
- 3 cruzetas de madeira de 2,4 m do tipo *Pinus elliottii* tratado, e impregnadas com resina poliuretana derivada do óleo de mamona do tipo RI 3: códigos PTR 1, PTR 2 e PTR 3;
- 3 cruzetas de madeira de 2,4 m do tipo *Pinus elliottii* tratado: código PT 1, PT 2 e PT 3.

Antes do ensaio mecânico de flexão, foram retiradas três amostras de cada tipo de madeira das camadas de revestimentos de resina nas cruzetas, com o auxílio da ferramenta formão e foram medidas as espessuras com o micrômetro (Marca: TESA, com precisão de 0,005 mm), conforme ilustra a figura 6.3. As camadas de revestimentos são uniformes e as espessuras obtidas foram de aproximadamente 0,20 mm.

(a)

(b)

(c)

Figura 6.3: Medição da espessura do revestimento de resina nas cruzetas de madeira: (a) micrômetro utilizado; e (b) de *Eucalyptus citriodora*; e (c) de *Pinus elliottii*.

As amostras da cruzeta de madeira de *Eucalyptus citriodora* tratado foi retirada com maior dificuldade do que a de *Pinus elliotti*, apresentando maior aderência na madeira.

6.2.4 Resultados dos ensaios na cruzeta de *Eucalyptus citriodora*

Os resultados obtidos na cruzeta de *Eucalyptus citriodora* encontram-se nas tabelas 6.1, 6.2 e 6.3. São eles:

- as flechas e os resíduos das cruzetas sob a carga nominal de 400 kgf, que se encontram na tabela 6.1;
- as flechas e os resíduos das cruzetas sob a carga no limite de carregamento de 560 kgf, que se encontram na tabela 6.2; e
- as resistências de ruptura à flexão das cruzetas, que se encontram na tabela 6.3.

Tabela 6.1: Resistência à flexão mecânica de **400 kgf**, *Eucalyptus citriodora*.

Tipo de cruzeta	Flecha (1) do lado A (mm)	Flecha (2) do lado A (mm)	Resíduo da flecha do lado A (mm)	Flecha (1) do lado B (mm)	Flecha (2) do lado B (mm)	Resíduo da flecha do lado B (mm)	Flecha máxima- NBR 8458 (mm)	Resíduo máximo- NBR 8458 (mm)
CT 1	5.63	5.82	0.18 e 0.13	9.04	6.85	0.62 e 0.91	115	5.0
CT 2	4.93	4.71	0.07 e 0.03	6.70	6.47	0.22 e 0.25	115	5.0
CT 3	4.35	3.43	0.14 e 0.00	5.46	4.43	0.20 e 0.04	115	5.0
CTR 1	4.51	4.18	0.02 e 0.04	5.97	6.60	0.10 e 0.22	115	5.0
CTR 2	5.47	4.76	0.03 e 0.07	6.97	5.84	0.08 e 0.08	115	5.0
CTR 3	4.96	4.86	0.05 e 0.08	6.31	5.54	0.00 e 0.14	115	5.0

Tabela 6.2: Resistência à flexão mecânica de **560 kgf**, *Eucalyptus citriodora*.

Tipo de cruzeta	Flecha (1) do lado A (mm)	Flecha (2) do lado A (mm)	Resíduo da flecha do lado A (mm)	Flecha (1) do lado B (mm)	Flecha (2) do lado B (mm)	Resíduo da flecha do lado B (mm)	Flecha máxima- NBR 8458 (mm)	Resíduo máximo- NBR 8458 (mm)
CT 1	7.79	8.45	0.62 e 0.15	12.32	9.84	0.65 e 0.64	163	8.0
CT 2	6.63	6.75	0.09 e 0.05	8.70	9.35	0.14 e 0.16	163	8.0
CT 3	5.47	5.10	0.08 e 0.00	6.77	6.85	0.15 e 0.10	163	8.0
CTR 1	5.85	6.20	0.02 e 0.05	8.62	8.76	0.00 e 0.09	163	8.0
CTR 2	6.85	7.18	0.00 e 0.10	9.52	8.12	0.12 e 0.23	163	8.0
CTR 3	6.92	6.38	0.05 e 0.01	8.92	7.63	0.10 e 0.06	163	8.0

Tabela 6.3: Resistência de ruptura à flexão mecânica, no lado B, *Eucalyptus citriodora*.

Tipo de cruzeta	Resistência de ruptura (kgf)	Resistência mínima de ruptura – NBR 8458 (kgf)
CT 1	2056	800
CT 2	2316	800
CT 3	3030	800
CT – valor médio	2467	800
CTR 1	2814	800
CTR 2	2868	800
CTR 3	3203	800
CTR - Valor médio	2962	800

As figuras 6.4 e 6.5 apresentam as cruzetas de madeira do tipo *Eucalyptus citriodora* impregnada e não impregnada com a resina poliuretana, respectivamente, sob o ensaio de resistência de ruptura à flexão.

Cruzeta de madeira de 2,4 m impregnada com a resina sob ensaio de ruptura mecânica

Figura 6.4: Cruzeta de madeira de 2,4 m de *Eucalyptus citriodora* tratado, impregnada com a resina RI 3.

(a)

(b)

Figura 6.5: Cruzeta de madeira de 2,4 m de *Eucalyptus citriodora* tratado, não-impregnada com a resina RI 3: (a) ensaio de ruptura; e (b) cruzeta rompida.

6.2.5 Resultados dos ensaios na cruzeta de *Eucalyptus citriodora*

Os resultados obtidos na cruzeta de *Eucalyptus citriodora* encontram-se nas tabelas 6.4, 6.5 e 6.6. São eles:

- as flechas e os resíduos das cruzetas sob a carga nominal de 400 kgf, que se encontram na tabela 6.4;
- as flechas e os resíduos das cruzetas sob a carga no limite de carregamento de 560 kgf, que se encontram na tabela 6.5; e

c) as resistências de ruptura à flexão das cruzetas, que se encontram na tabela 6.6, a seguir.

Tabela 6.4: Resistência à flexão mecânica de 400 kgf, *Pinus elliottii*.

Tipo de cruzeta	Flecha (1) do lado A (mm)	Flecha (2) do lado A (mm)	Resíduo da flecha do lado A (mm)	Flecha (1) do lado B (mm)	Flecha (2) do lado B (mm)	Resíduo da flecha do lado B (mm)	Flecha máxima- NBR 8458 (mm)	Resíduo máximo- NBR 8458 (mm)
PT 1	18.10	18.53	0.21 e 0.35	23.40	26.90	0.87 e 1.35	115	5.0
PT 2	17.07	18.85	0.42 e 0.54	23.90	22.99	0.90 e 1.02	115	5.0
PT 3	11.70	10.22	0.28 e 0	15.44	15.94	0.42 e 0.47	115	5.0
PTR 1	7.15	6.51	0.10 e 0.10	10.98	9.15	0.38 e 0.28	115	5.0
PTR 2	8.85	8.60	0.10 e 0.03	12.50	13.23	0.10 e 0.39	115	5.0
PTR 3	12.65	11.32	0.40 e 0.00	18.36	15.37	0.47 e 0.00	115	5.0

Tabela 6.5: Resistência à flexão mecânica de 560 kgf, *Pinus elliottii*.

Tipo de cruzeta	Flecha (1) do lado A (mm)	Flecha (2) do lado A (mm)	Resíduo da flecha do lado A (mm)	Flecha (1) do lado B (mm)	Flecha (2) do lado B (mm)	Resíduo da flecha do lado B (mm)	Flecha máxima- NBR 8458 (mm)	Resíduo máximo- NBR 8458 (mm)
PT 1	23.78	27.10	0.26 e 0.35	32.61	37.25	0.39 e 1.39	163	8.0
PT 2	23.25	26.44	0.17 e 0.30	32.80	31.86	0.57 e 0.61	163	8.0
PT 3	15.84	14.57	0.24 e 0.06	22.23	23.23	0.20 e 0.51	163	8.0
PTR 1	9.35	9.50	0.09 e 0.29	14.47	12.86	0.33 e 0.22	163	8.0
PTR 2	12.00	11.87	0.18 e 0.82	16.40	19.30	0.10 e 0.39	163	8.0
PTR 3	16.85	15.74	0.08 e 0.13	23.53	22.13	0.08 e 0.15	163	8.0

Tabela 6.6: Resistência de ruptura à flexão mecânica, *Pinus elliottii*.

Tipo de cruzeta	Resistência de ruptura (kgf)	Resistência mínima de ruptura – NBR 8458 (kgf)
PT 1	1082	800
PT 2	1136	800
PT 3	1298	800
PT – valor médio	1172	800
PTR 1	1417	800
PTR 2	930 (rompeu no nó da madeira)	800
PTR 3	865 (rompeu no furo)	800
PT R- Valor médio	1071	800

As figuras 6.6 e 6.7 apresentam as cruzetas de madeira do tipo *Pinus elliottii* impregnada e não impregnada com a resina poliuretana, respectivamente, após a **ruptura à flexão**.

Figura 6.6: Cruzeta de 2,4 m de madeira de *Pinus Elliottii*: (a) sob ensaio de ruptura; e (b) ponto de ruptura no centro da cruzeta.

Figura 6.7: Cruzeta de 2,4 m de madeira de *Pinus Elliottii* impregnada com a resina: (a) sob ensaio de ruptura; e (b) ponto de ruptura no centro da cruzeta.

6.2.6 Conclusão do ensaio da cruzeta impregnada com a resina RI 3

Conforme se pode observar nos resultados apresentados, as cruzetas de madeira de *Eucalyptus citriodora* e as de *Pinus elliottii* tratados, impregnadas e não-impregnadas com a resina poliuretana derivada do óleo de mamona, apresentaram ótimas características de flexão mecânica e todas atenderam às especificações exigidas pela norma técnica NBR 8458 [20].

Contudo, no caso das cruzetas de *Pinus elliottii* que possuem muitos nós, é de extrema importância uma inspeção visual para limitar esse problema no fornecimento do lote. Conclui-se, assim, que as cruzetas de *Eucalyptus citriodora* apresentaram melhor desempenho do que as de *Pinus*, por não apresentarem esse fator limitante de forma tão expressiva.

6.3 Ensaio de flexão mecânica nas cruzetas de madeira resinadas e revestidas com material geotêxtil

6.3.1 Introdução

Neste capítulo será apresentado o desempenho das cruzetas de madeira impregnadas com a resina poliuretana derivada do óleo de mamona com carga (sílica) e com o material geotêxtil (código G200) quando submetidas às condições de flexão mecânica, e de acordo com a sua instalação na rede de distribuição de energia elétrica.

Para este ensaio, optou-se pela madeira *Pinus Elliottii* com o objetivo de aproveitar esse tipo de madeira de reflorestamento, que apresenta problemas devido à grande quantidade de nós, observando-se os seguintes procedimentos.

6.3.2 Procedimentos do ensaio de flexão mecânica nas cruzetas

Os procedimentos do ensaio de flexão mecânica foram os mesmos realizados nas cruzetas resinadas, conforme a Norma Técnica da ABNT (*NBR 8458 - Cruzetas de madeira para rede de distribuição de energia elétrica*) [20].

Neste trabalho, foram realizados estes três tipos de ensaios:

4. Foi aplicada a carga de 400 kgf e foram medidas as flechas (e seu resíduo) nas extremidades da cruzeta para verificar a sua resistência de flexão nominal ($RN = 400 \text{ kgf}$);
5. Foi aplicada a carga de 560 kgf e foram medidas as flechas (e o seu resíduo) nas extremidades da cruzeta para verificar a sua resistência no limite de carregamento ($1,4 \times RN = 560 \text{ kgf}$); e
6. Foi aplicada carga até ocorrer a ruptura na cruzeta (que no mínimo deve ser igual a 2 vezes a resistência nominal – 800 kgf), para determinar a resistência de ruptura de flexão.

Os aparelhos utilizados no ensaio de flexão mecânica foram os mesmos citados anteriormente, que se encontram no anexo A.

Os corpos de prova utilizados foram:

- 1 cruzeta de madeira de 2,4 m do tipo *Pinus Elliottii* tratado, impregnada com resina poliuretana derivada do óleo de mamona do tipo RI 3 com carga e com o material geotêxtil em forma de tiras: código PTCGT;
- 1 cruzeta de madeira de 2,4 m do tipo *Pinus Elliottii* tratado, impregnada com resina poliuretana derivada do óleo de mamona do tipo RI 3 com carga e com o material geotêxtil em forma de manta: código PTCGM; e
- 1 cruzeta de madeira de 2,4 m do tipo *Pinus Elliottii* tratado: código PT.

As condições ambientais durante o ensaio de flexão mecânica foram:

- temperatura = 21°C; e
- umidade relativa do ar = 56%

6.3.3 Resultados do ensaio de flexão mecânica nas cruzetas impregnadas e revestidas

Os resultados obtidos no ensaio de flexão mecânica nas cruzetas de madeira resinadas e revestidas com o material geotêxtil foram:

- as flechas e os resíduos das cruzetas sob a carga nominal de 400 kgf, que se encontram na tabela 6.7;
- as flechas e os resíduos das cruzetas sob a carga no limite de carregamento de 560 kgf, que se encontram na tabela 6.8; e
- as resistências à flexão das cruzetas, que se encontram na tabela 6.9, a seguir.

Tabela 6.7: Resistência à flexão mecânica para a força de 400 kgf.

Tipo de cruzeta	Flecha (1) do lado A (mm)	Flecha (2) do lado A (mm)	Resíduo da flecha do lado A (mm)	Flecha (1) do lado B (mm)	Flecha (2) do lado B (mm)	Resíduo da flecha do lado B (mm)	Flecha máxima-NBR 8458 (mm)	Resíduo máximo-NBR 8458 (mm)
PTCGT	11,90	9,90	0,80 e 0,51	15,40	13,10	2,7 e 0,60	115,0	5,0
PTCGM	10,15	11,49	0,09 e 0,55	11,20	17,54	0,18 e 1,42	115,0	5,0
PT	15,70	18,93	0,13 e 0,62	19,86	21,98	0,73 e 0,59	115,0	5,0

Tabela 6.8: Resistência à flexão mecânica para a força de 560 kgf.

Tipo de cruzeta	Flecha (1) do lado A (mm)	Flecha (2) do lado A (mm)	Resíduo da flecha do lado A (mm)	Flecha (1) do lado B (mm)	Flecha (2) do lado B (mm)	Resíduo da flecha do lado B (mm)	Flecha máxi- ma- NBR 8458 (mm)	Resíduo máximo- NBR 8458 (mm)
<i>PTCGT</i>	14,45	16,10	0,22 e 0,26	19,00	20,14	0,60 e 0,21	115,0	5,0
PTCGM	14,53	15,94	0,24 e 0,26	19,60	29,37	0,18 e 1,54	115,0	5,0
<i>PT</i>	23,20	25,98	0,25 e 0,26	28,58	30,92	1,16 e 0,99	115,0	5,0

Tabela 6.9: Resistência de ruptura à flexão mecânica.

Tipo de cruzeta	Força de ruptura (kgf)	Força mínima de ruptura – NBR 8458 [14] (kgf)
<i>PTCGT</i>	649,38	816,0
PTCGM	779,25	816,0
<i>PT</i>	757,60	816,0
<i>Média</i>	728,74	816,0
<i>Desvio Padrão</i>	69,58	0

As cruzetas de madeira submetidas ao ensaio de flexão mecânica foram colocadas numa balança conforme demonstra a figura 6.8, e os valores de suas massas (em kg) encontram-se na tabela 6.10.

Tabela 6.10: Massas das cruzetas de *Pinus elliottii*.

Tipo de cruzeta	Massa (kg)
<i>PTCGT</i>	14,7
<i>PTCGM</i>	15,0
<i>PT</i>	12,5
<i>Média</i>	<i>14,1</i>
<i>Desvio Padrão</i>	<i>1,37</i>

(a)

(b)

Figura 6.8: Cruzeta de madeira de *Pinus elliottii* na balança: (a) PTCGT; e (b) PTCGM.

As figuras 6.9, 6.10 e 6.11 apresentam as cruzetas de madeira do tipo *Pinus elliottii* submetidas ao ensaio de flexão mecânica.

(a)

(b)

Figura 6.9: Cruzeta de 2,4 m de madeira de *Pinus elliottii*, PTCGT: (a) aplicação de 400 kgf; (b) aplicação de 560 kgf; (c) medição da flexão; e (d) ponto de ruptura no centro da cruzeta.

Figura 6.10: Cruzeta de 2,4 m de madeira de *Pinus elliottii*, PTCGM: (a) aplicação de 400 kgf; (b) aplicação de 560 kgf; (c) medição da flexão; e (d) ponto de ruptura no centro da cruzeta.

Figura 6.11: Cruzeta de 2,4 m de madeira de *Pinus Elliottii*, PT: (a) aplicação de 400 kgf; (b) aplicação de 560 kgf; (c) flecha no momento da ruptura; e (d) ponto de ruptura no centro da cruzeta.

6.3.4 Conclusão do ensaio de flexão nas cruzetas impregnadas e revestidas

As cruzetas de madeira (*Pinus elliottii*) apresentam muitos nós, pontos críticos de rompimento.

Conforme se pode observar nas tabelas 6.1, 6.2 e 6.3, as cruzetas de madeira de *Pinus elliottii* tratadas impregnadas com resina, com carga (sílica) e com o geotêxtil e as cruzetas não impregnadas com a resina poliuretana derivada do óleo de mamona apresentaram carga de ruptura abaixo dos 800 daN (816 kgf) exigido pela norma técnica NBR 8458 [20], com valores maiores para as cruzetas com geotêxtil.

Os valores de resistências obtidas entre as cruzetas com os diferentes tratamentos, encontram-se dentro do coeficiente de variação das propriedades da madeira de reflorestamento, que é de 18% (NBR 7190) [46]. Embora o material geotêxtil tenha aumentado um pouco as propriedades de resistência e elasticidade das cruzetas, ele mostrou-se insuficiente para aumentar as propriedades a fim de cumprir

as exigências da norma. Contudo, o revestimento é importante para o aumento da durabilidade do material, e também no modo de ruptura a flexão, pois a resina evita o desfibramento frágil não produzindo lascas na madeira. Deste ensaio também se conclui que não será necessária a sua repetição em cruzetas de madeira de *Eucalyptus citriodora*.

6.4 Simulação computacional com a utilização do Método de Elementos Finitos

6.4.1 Geral

O Método dos Elementos Finitos (MEF) tem-se consagrado, ao longo dos anos, como uma poderosa ferramenta no mapeamento de campos elétricos e magnéticos em dispositivos e sistemas elétricos [47] e [48].

Sua difusão no meio científico e industrial nacional ocorreu a partir de meados da década de 80, com o crescimento na capacidade e redução dos custos das estações de trabalho de alto desempenho e do desenvolvimento acelerado dos microcomputadores, além da grande evolução de *softwares* aplicados ao MEF.

Neste trabalho, foi possível verificar a suportabilidade mecânica das cruzetas de madeira revestidas com a resina poliuretana derivada do óleo de mamona, empregando o *software* ANSYS, que se baseia no Método de Elementos Finitos, e comparar com os resultados dos ensaios de flexão realizados e apresentados anteriormente.

Os procedimentos empregados na simulação foram:

- **pré-processamento**, que se iniciou a partir do desenho da seção transversal da cruzeta de 2,4 metros no próprio programa *ANSYS (versão 6.1)*. Através do sistema de geração de sólido, para o ângulo de estudo, formou-se uma geometria no espaço, e as malhas foram geradas. E, finalmente, definiram-se as condições de contorno, que acompanharam as exigências da norma técnica NBR 8458 [20] e que foram apresentadas no item anterior sobre o procedimento do ensaio de flexão mecânica;
- **processamento**, em que foram realmente executadas as simulações e os cálculos das cargas em cada elemento através da geração de matrizes geométricas. Para essas simulações, empregou-se o regime estacionário, em que o tempo não afeta as grandezas elétricas envolvidas; e
- **pós-processamento**, no qual foram selecionadas as características mecânicas e realizadas as análises dos resultados.

As características mecânicas das madeiras foram tiradas da NBR 7190 [46].

A malha dos elementos foi devidamente mapeada para melhor representatividade e apresentou 3840 elementos, o que economizou tempo e esforço computacional sem perder sua confiabilidade.

Os resultados da simulação se mostraram mais próximos dos reais para a cruzeta de *Eucalyptus citriodora*, conforme apresentam as tabelas 6.11 e 6.12.

Tabela 6.11: Simulados da cruzeta de madeira de *Eucalyptus citriodora*.

CRUZETA DE 2,4 M	POSIÇÃO A: COM 400 KGF	POSIÇÃO B: COM 400 KGF	POSIÇÃO A: COM 560 KGF	POSIÇÃO B: COM 560 KGF
Deslocamento medido no ensaio real (mm)	5,73	7,95	8,12	11,08
Deslocamento medido na simulação do ANSYS (mm)	9,85	14,81	13,80	20,73
Deslocamento máximo permitido pela norma NBR 8458 (mm)	115	115	163	163

Tabela 6.12: Simulados da cruzeta de madeira de *Pinus elliottii*.

CRUZETA DE 2,4 M	POSIÇÃO A: COM 400 KGF	POSIÇÃO B: COM 400 KGF	POSIÇÃO A: COM 560 KGF	POSIÇÃO B: COM 560 KGF
Deslocamento medido no ensaio real (mm)	17,62	24,30	25,14	33,63
Deslocamento medido na simulação do Ansys (mm)	15,27	22,95	21,38	32,13
Máximo Deslocamento permitido pela norma NBR 8458 (mm)	115	115	163	163

A figura 6.12 ilustra o resultado da simulação do ensaio de flexão mecânica na cruzeta de madeira de *Eucalyptus citriodora* com a aplicação de 560 kgf na posição A.

Deslocamento máximo (MX) = 13.80 mm (Posição A)

Figura 6.12: Simulação da cruzeta de madeira no ANSYS.

Portanto, sobre as simulações computacionais, pode-se concluir que os resultados obtidos apresentaram uma boa aproximação dos ensaios mecânicos, mas revelaram dificuldades quanto à simulação de finas camadas da impregnação.

Capítulo 7

Ensaaios elétricos na resina RI 3 e nas cruzetas de madeira resinadas e revestidas com manta geotêxtil

7.1 Introdução

Os ensaios elétricos realizados no Laboratório de Alta Tensão da EESC – USP foram de determinação da constante dielétrica (permissividade dielétrica) da resina RI 3 e do Nível Básico de Impulso das cruzetas. Enquanto que o ensaio de descarga parcial nos corpos de prova de pedaços da cruzeta de madeira resinada foi realizado no Laboratório de Alta Tensão da Universidade Técnica de Graz, na Áustria, em parceria com o Grupo de Alta Tensão e Medidas do Departamento de Engenharia Elétrica da EESC – USP, sob a supervisão do Prof. Ruy Alberto Corrêa Altafim.

O ensaio de descarga parcial foi realizado sob diferentes condições de temperatura e de umidade relativa do ar, em amostras de cruzetas de madeira impregnadas com a resina poliuretana derivada do óleo de mamona com carga (sílica) [49, 50 e 51].

Cabe salientar que o objetivo do diagnóstico da descarga parcial é a detecção da destruição da isolamento elétrica como resultado da tensão elétrica, especialmente da descarga parcial, durante a operação dos dispositivos na rede elétrica [52], conforme está demonstrado nos itens subseqüentes.

7.2 Permissividade dielétrica da resina RI 3

7.2.1 Corpos de prova

Os ensaios elétricos realizados na resina RI 3 concentraram-se na determinação da permissividade e da condutividade volumétrica da resina, conforme a norma técnica ASTM D150 [51]. Nesses ensaios, foi empregada uma ponte RLC, marca HP-4084 A 20 HD – 1MHz – Precision LCR Meter, conectada a uma célula de três eletrodos (com eletrodo guarnecido), variando-se a frequência de 20 Hz a 1MHz.

Os corpos de prova foram confeccionados com a resina pura e com carga na proporção de 1:0,20 nas dimensões de 100 mm de diâmetro e de 2 mm de espessura.

7.2.2 Resultados dos ensaios elétricos na resina poliuretana derivada do óleo de mamona, RI 3

Os resultados dos ensaios elétricos realizados na resina poliuretana derivada do óleo de mamona RI 3 pura e com carga na proporção de 1:0,20, relativos à medição da permissividade elétrica e condutividade volumétrica encontram-se nas figuras 7.1 e 7.2.

Figura 7.1: Permissividade elétrica relativa da resina RI 3 sem carga e com carga na proporção 1:0,20.

Figura 7.2: Condutividade elétrica da resina RI 3 sem carga e com carga na proporção 1:0,20.

7.3 Ensaio de NBI (Nível Básico de Impulso) em cruzetas de madeira revestidas com a resina RI 3

7.3.1 Objetivo do ensaio de NBI

Este ensaio teve como objetivo determinar a tensão de impulso de ruptura e de suportabilidade nas cruzetas de madeira de 2,4 metros [54], revestidas com a resina RI 3 (pura e com carga na proporção de 1:0,20).

7.3.2 Procedimentos do ensaio de NBI

Este ensaio foi realizado nas cruzetas de 2,4 metros de madeira de *Eucalyptus citriodora* sem resina e com resina (pura e com carga na proporção de 1:0,20). Foi utilizado o Kit de Alta Tensão da HAEFELY-TRENCH, com a forma de onda padrão de 1,2/50 μ s [55], e para um nível máximo de tensão de impulso de até 140 kV.

As figuras 7.3 e 7.4 apresentam a montagem do ensaio elétrico nas cruzetas, em que foram aplicadas tensões de impulsos nos pontos críticos das cruzetas (que apresentam a menor distância entre as possíveis peças condutoras: pino do isolador e mão-francesa), nas condições ambientais de 25,5°C e de 36% de umidade relativa do ar.

(a)

(b)

Figura 7.3: Ensaio de NBI (Nível Básico de Impulso) nas cruzetas revestidas com a resina poliuretana: (a) sistema de 140 kV; e (b) ponto de aplicação.

(a)

(b)

Figura 7.4: Ensaio de NBI (Nível Básico de Impulso) nas cruzetas revestidas com a resina poliuretana: (a) sistema de 140 kV; e (b) pontos de aplicação.

7.3.3. Resultado do ensaio de NBI nas cruzetas

Os resultados do ensaio de NBI nas cruzetas de madeira revestidas com a resina poliuretana derivada do óleo de mamona RI 3 pura e com carga (na proporção 1:0,20), encontram-se na tabela 7.1 e na figura 7.6.

Tabela 7.1: Ensaio de Tensão de Impulso na cruzeta de madeira (sem resina), no ponto 1.

APLICAÇÃO DE TENSÃO DE IMPULSO	DISTÂNCIA DA ESFERA (MM)	TENSÃO DE PICO MEDIDA NO HAEFELY (KV)	BAIXA TENSÃO MEDIDA NO HAEFELY (V)	TENSÃO DE PICO MEDIDA NO OSCILOSCÓPIO (KV)
1 ^a	1,0	----	16,0	4,98
2 ^a	1,9	7,90	23,0	8,36
3 ^a	2,7	8,80	26,0	9,17
4 ^a	4,0	13,02	33,0	13,19
5 ^a	4,5	14,76	38,0	15,28
6 ^a	5,2	15,98	40,0	16,24
7 ^a	5,75	18,51	46,0	18,73
8 ^a	6,55	20,29	51,0	20,58
9^a	7,75	23,75 (rompeu)	58,0	Ruptura

Tabela 7.2: Ensaio de Tensão de Impulso na cruzeta de madeira com resina pura (sem carga), no ponto 1.

APLICAÇÃO DE TENSÃO DE IMPULSO	DISTÂNCIA DA ESFERA (MM)	TENSÃO DE PICO MEDIDA NO HAEFELY (KV)	BAIXA TENSÃO MEDIDA NO HAEFELY (V)	TENSÃO DE PICO MEDIDA NO OSCILOSCÓPIO (KV)
1 ^a	1,0	----	16,0	4,66
2 ^a	4,0	13,48	35,0	13,59
3 ^a	4,5	14,59	39,0	14,71
4 ^a	5,2	17,07	44,0	16,88
5 ^a	5,75	17,46	45,0	17,61
6 ^a	6,55	19,13	51,0	19,05
7 ^a	7,75	21,91	58,0	22,03
8 ^a	8,40	23,00	60,0	23,32
9 ^a	9,70	23,88	63,0	23,96
10 ^a	10,7	26,79	71,0	26,2
11 ^a	11,3	26,62	70,0	22,19
12^a	13,0	30,51	82,0	Ruptura

Tabela 7.3: Ensaio de Tensão de Impulso na cruzeta de madeira com resina (sem carga), no ponto 2.

APLICAÇÃO DE TENSÃO DE IMPULSO	DISTÂNCIA DA ESFERA (MM)	TENSÃO DE PICO MEDIDA NO HAEFELY (KV)	BAIXA TENSÃO MEDIDA NO HAEFELY (V)
1 ^a	11,0	29,14	76,0
2 ^a	11,0	29,48	76,0
3 ^a	11,0	30,34	79,0
4 ^a	11,0	31,11	81,0
5 ^a	11,0	32,48	85,0
6 ^a	11,0	34,40	Ruptura externa à cruzeta

Tabela 7.4: Ensaio de Tensão de Impulso na cruzeta de madeira com resina (sem carga), no ponto 3.

APLICAÇÃO DE TENSÃO DE IMPULSO	DISTÂNCIA DA ESFERA (MM)	TENSÃO DE PICO MEDIDA NO HAEFELY (KV)	BAIXA TENSÃO MEDIDA NO HAEFELY (V)	TENSÃO DE PICO MEDIDA NO OSCILOSCÓPIO (KV)
1 ^a	11,0	30,55 (rompeu)	71,0	Ruptura

Tabela 7.5: Ensaio de Tensão de Impulso na cruzeta de madeira com resina com carga (na proporção de 1:0,20), no ponto 1.

APLICAÇÃO DE TENSÃO DE IMPULSO	DISTÂNCIA DA ESFERA (MM)	TENSÃO DE PICO MEDIDA NO HAEFELY (KV)	BAIXA TENSÃO MEDIDA NO HAEFELY (V)	TENSÃO DE PICO MEDIDA NO OSCILOSCÓPIO (KV)
1 ^a	10,0	29,87	72,0	28,62
2 ^a	12,2	30,81	76,0	29,51
3 ^a	14,0	36,50 (rompeu)	88,0	Ruptura

Tabela 7.6: Ensaio de Tensão de Impulso na cruzeta de madeira com resina com carga (na proporção de 1:0,20), no ponto 2.

APLICAÇÃO DE TENSÃO DE IMPULSO	DISTÂNCIA DA ESFERA (MM)	TENSÃO DE PICO MEDIDA NO HAEFELY (KV)	BAIXA TENSÃO MEDIDA NO HAEFELY (V)	TENSÃO DE PICO MEDIDA NO OSCILOSCÓPIO (KV)
1 ^a	10,45	27,69	68,0	27,26
2 ^a	11,40	31,10	75,0	29,51
3 ^a	13,00	33,30	81,0	31,52
3^a	13,50	35,98	87,0	Ruptura

Tabela 7.7: Ensaio de Tensão de Impulso na cruzeta de madeira com resina com carga (na proporção de 1:0,20), no ponto 3.

APLICAÇÃO DE TENSÃO DE IMPULSO	DISTÂNCIA DA ESFERA (MM)	TENSÃO DE PICO MEDIDA NO HAEFELY (KV)	BAIXA TENSÃO MEDIDA NO HAEFELY (V)
1 ^a	12,0	33,80	79,0
2 ^a	12,9	35,22	83,0
3 ^a	13,4	37,00	88,0
4^a	14,5	38,98 (rompeu)	92,0

Tabela 7.8: Valores médios obtidos no ensaio de tensão de impulso de ruptura realizado nas cruzetas de madeira de 2,4 metros.

TIPO DE MATERIAL DA CRUZETA	SÓ MADEIRA	RESINA RI 3 (SEM CARGA)	RESINA RI 3 (COM CARGA)
Distância da esfera (mm)	7,75	11,67	14,0
Baixa Tensão medida no HAEFELY (V)	58,0	77,5	89,0
Tensão medida no HAEFELY (kV)	23,75	31,82	37,15

A figura 7.5 apresenta a cruzeta de madeira revestida com resina (sem carga) após a décima segunda aplicação da tensão de impulso, com um pequeno dano na superfície do material, justamente no local do pino do isolador que estava aterrado. Contudo, este fenômeno será mais bem analisado posteriormente.

(a)

(b)

Figura 7.5: Cruzeta de madeira revestida com a resina poliuretana RI 3 (sem carga): (a) com o pino do isolador; e (b) sem o pino do isolador.

7.4 Ensaio elétrico de descarga parcial em pedaços de cruzetas de madeira resinadas

7.4.1 Procedimento do ensaio de descarga parcial nos pedaços da cruzeta de madeira resinada

Os procedimentos serão apresentados por meio de ilustrações obtidas durante o trabalho, demonstradas a seguir.

A figura 7.6 mostra a cruzeta de madeira de 2,4 metros sendo cortada em pequenos pedaços próximos dos furos, que é a região crítica da estrutura.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 7.6: Cruzeta de madeira cortada na EESC – USP: (a) 2,4 metros; (b) pedaço da cruzeta próximo ao furo; (c) vista A; e (d) vista B.

A figura 7.7 apresenta um pedaço da cruzeta de madeira sem impregnação com resina, e a figura 7.8 mostra um após a impregnação com a resina poliuretana derivada do óleo de mamona, RI 3 (*Ricinus communis*).

Figura 7.7: *Pedaço da cruzeta de madeira antes da impregnação: (a) vista dos dois furos; e (b) vista de um furo*

Figura 7.8: *Cinco amostras de pedaços da cruzeta de madeira depois da impregnação.*

A figura 7.8 apresenta cinco corpos de prova impregnados com a resina RI 3 e um corpo de prova sem impregnação que foram submetidos ao ensaio de descarga parcial no Instituto de Pesquisa e de Engenharia de Alta Tensão da Universidade Técnica de Graz, na Áustria.

O primeiro teste realizado foi para verificar a suportabilidade elétrica dos corpos de prova antes de submetê-los às diferentes condições de temperatura e de umidade dentro da câmara de climatização, cujas dimensões são: 4,0 x 4,0 x 3,5 metros. Vide figura 7.9.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 7.9: Verificação da suportabilidade elétrica: (a) corpo de prova sob tensão elétrica; (b) outras amostras dentro da câmara; (c) porta de acesso à câmara; e (d) quadro de comando para diferentes condições.

Os corpos de prova foram submetidos às seguintes condições dentro da câmara de climatização (figura 7.10):

- temperatura = 60°C;
- umidade relativa do ar de 100%, 90%, 70% e 50%.

Figura 7.10: Câmara de climatização: (a) montagem; e (b) parte interna.

O ensaio de descarga parcial foi realizado também com os corpos de prova fora da câmara de climatização, conforme apresenta a figura 7.11.

Figura 7.11: Montagem do ensaio de descarga parcial: (a) primeiro; (b) segundo; e (c) tinta condutiva e pincel; e (d) corpo de prova com camada de tinta condutiva dentro do furo.

O circuito do ensaio de descarga parcial é ilustrado na figura 7.12, que é composto por um transformador, uma resistência (R), um divisor capacitivo (C_1 e C_2), e o sistema de medição de descarga parcial, que se baseia num quadrupolo (Q) e um capacitor de acoplamento (C_c) ligados ao corpo de prova (S).

Figura 7.12: Circuito do ensaio de descarga parcial.

A tensão elétrica foi aplicada numa taxa uniforme até o nível de 13,8 kV dividido por raiz de três, que resulta em 8,66 kV, em função do sistema de aterramento que fica submetido à rede elétrica de distribuição brasileira.

Os equipamentos utilizados na medição da descarga parcial e na calibração encontram-se na figura 7.13.

(a)

(b)

Figura 7.13: Descarga parcial: (a) equipamento; e (b) instrumento de calibração.

7.4.2 Resultados do ensaio de descarga parcial

Os resultados são apresentados de acordo com as diferentes condições, conforme os itens subsequentes.

a) 1ª Condição

Temperatura: 20 °C

Umidade: 50 %

Duração dentro da câmara de climatização: 0 h

Nota: ocorreu somente a descarga externa.

Tabela 7.14: Pedaco da cruzeta de madeira, 1ª condição.

TENSÃO (KV)	DESCARGA PARCIAL (PC)
1.00	30
2.00	120
3.00	300
4.00	700
5.00	1200
6.00	2000
7.00	3100
8.00	3300
8.66	3400

b) 2ª Condição

Temperatura: 60°C

Umidade: 100%

Duração dentro da câmara de climatização: 17:30 h

Nota: ocorreu somente descarga externa.

Tabela 7.15: Pedaco da cruzeta de madeira de 2.4 metros, 2ª condição.

TENSÃO (KV)	DESCARGA PARCIAL (PC)
1.00	300
2.00	500
3.00	> 10,000
4.00	20,000

c) 3º Condição

Temperatura: 59.6 °C

Umidade: 90.3%

Tabela 7.16: Peça da cruzeta de madeira, 3ª condição.

Tensão (kV)	Descarga parcial (pC)
1.0	200
2.0	500
3.0	4000
4.0	3000
5.0	3000
6.0	< 8000
7.0	<i>Breakdown</i>

d) 4º Condição

Temperatura: 59.6 °C

Umidade: 70.8 %

Tabela 7.17: Peça da cruzeta de madeira, 4ª condição.

Tensão (kV)	Descarga parcial (pC)
1.0	70
2.0	300
3.0	400
4.0	800
5.0	900
6.0	2000
7.0	* 3000
8.0	**

Notas: * A partir de 7.0 kV, foi preciso alterar o transformador de baixa tensão (de entrada de 250 V e corrente máxima de 18 A);

** Ocorreu *breakdown* na amostra de número 1.

Tabela 7.18: Resumo dos primeiros resultados do ensaio de descarga parcial nos pedaços de madeira.

Tensão AC (kV)	PD (pC) = 50% e $T = 20^{\circ}C$	PD (pC) $U = 100\%$, $T = 60^{\circ}C$ e Depois de $\cong 22$ h	PD (pC) $U = 90\%$, $T = 60^{\circ}C$ e Depois de $\cong 51$ h	PD (pC) $H = 70\%$, $T = 60^{\circ}C$ e Depois de $\cong 120$ h
1.00	30	300	200	70
2.00	120	500	500	300
3.00	300	10,000	4,000	400
4.00	700	20,000	3,000	800
5.00	1,200	Breakdown Externo na amostra não impregnada	3,000	900
6.00	2,000		8,000	2,000
7.00	3,100		Breakdown externo	3,000
8.00	3,300			Breakdown interno na amostra de N ^o 1
8.66	3,400

Figura 7.14: Descargas parciais.

e) 5ª Condição

Temperatura: 23°C

Umidade: 52%

Tabela 7.19: Peça da cruzeta de madeira, 5ª condição.

Tensão (kV)	Descarga parcial (pC)
1.00	5
2.00	5
3.00	12
4.00	50
5.00	100
6.00	200
7.00	350
8.00	350
8.66	500

Notas: 1- Aplicaram-se 8,66 kV durante 5 minutos e não ocorreu breakdown. A ruptura ocorreu somente durante o aumento da tensão para 10.4 kV (8.66 x 1,2);

2- Sugestão: usar uma camada semi-condutiva para reduzir a descarga parcial dentro dos furos da cruzeta; e

3- Este teste foi realizado em 4 amostras com resina e 1 amostra sem resina.

f) 6ª Condição

Temperatura: 23°C

Umidade: 52 %

Tabela 7.20: *Pedaco da cruzeta de madeira, 6ª condição.*

Tensão (kV)	Descarga Parcial – sem resina (pC)	Descarga Parcial com resina (pC)	Descarga Parcial com resina e com camada semi condutiva dentro do furo (pC)	Descarga Parcial - com resina e com camada condutiva dentro do furo (pC)
1.00	0.5	0.5	0.5	0.5
2.00	4.0	7.0	0.6	0.6
3.00	10.0	100.0	4.5	4.0
4.00	20.0	120.0	30.0	12.0
5.00	30.0	180.0	40.0	22.0
6.00	55.0	190.0	70.0	40.0
7.00	70.0	200.0	80.0	70.0
8.00	100.0	220.0	150.0	90.0
8.66	250.0	220.0	150.0	90.0

g) 7ª Condição

Temperatura: 23°C

Umidade: 52%

A montagem do ensaio de descarga parcial foi alterada e, em seguida, ele foi repetido na mesma amostra com a camada de tinta condutiva dentro do furo, conforme apresenta a figura 7.15.

(a)

(b)

Figura 7.15: Montagem diferente: (a) corpo de prova com a camada de tinta condutiva; e (b) ruptura da amostra após 2 minutos sob 15,0 kV.

Tabela 7.21: Alteração da posição da amostra com camada condutiva dentro do furo no ensaio de descarga parcial.

Tensão (kV)	Descarga parcial – com resina e com camada condutiva dentro do furo (pC)
1.00	0.5
2.00	0.6
3.00	2.5
4.00	8.0
5.00	20.0
6.00	60.0
7.00	90.0
8.00	100.0
8.66	100.0

A figura 7.16 apresenta as formas de onda típicas da descarga parcial nas amostras de cruzeta de madeira impregnada com resina poliuretana RI 3.

(a)

Figura 7.16: Forma de onda típica: (a) normal; (b) descarga parcial externa; e (c) início da descarga parcial interna.

7.4.3 Ensaios Elétricos em madeiras com e sem revestimento com manta geotêxtil

As características elétricas das madeiras ensaiadas com ou sem recobrimento foram determinadas por ensaios elétricos no Laboratório de Alta Tensão com o equipamento Agilent 4339B/4349B High Resistance Meters e seguindo os procedimentos estabelecidos no catálogo do Fabricante que encontra-se no site <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5964-6182E.pdf>. Os resultados desse ensaio encontra-se na tabela 7.22.

Tabela 7.22: Características Elétricas de madeiras *Pinus* com revestimento e sem revestimento com manta geotêxtil.

Tipo de material	Resistividade Volumétrica (Ωcm)	Resistividade Superficial (Ω)	Permissividade Relativa	Tangente δ	Rigidez dielétrica (kV/mm)
Pinus sem revestimento	$6,35 \cdot 10^{10}$	$5,3 \cdot 10^{11}$	6,82	0,066	2,2
Pinus revestido	$2,17 \cdot 10^{15}$	$4,25 \cdot 10^{15}$	2,74	0,014	6,18
Manta + resina	$5,34 \cdot 10^{15}$	$9,61 \cdot 10^{15}$	2,74	0,0086	10,2

7.4.4 Conclusão sobre o ensaio de descarga parcial

O comportamento da descarga parcial é um importante fator indicativo da qualidade da condição do sistema de isolamento [50]. Assim, por esse ensaio pôde-se concluir que o nível de descarga parcial nos corpos de prova de cruzeta de madeira impregnados com a resina poliuretana derivada do óleo de mamona com carga (sílica) diminui significativamente quando acrescentada uma camada

condutiva dentro dos furos, que são os pontos críticos da cruzeta em situação de falha do isolador elétrico, melhorando assim a sua operação na rede elétrica de distribuição.

Capítulo 8:

Conclusões

8.1 Conclusões.

Nos sistemas brasileiros de distribuição de energia elétrica, as cruzetas de madeira nativa são tradicionalmente usadas em larga escala, principalmente em função de seus baixos custos. Contudo, as restrições ambientais ao uso dessas madeiras nativas de puro cerne têm estimulado pesquisas em países como a Noruega e Estados Unidos, conforme descrito no capítulo 2. Observa-se também, neste capítulo, que a resina empregada (do tipo poliuretana derivada do óleo de mamona) é uma matéria-prima totalmente nacional, e esta pesquisa contribuiu para a sua aplicação, no desenvolvimento de um novo produto (cruzetas de madeiras resinadas e revestidas com manta geotêxtil), com tecnologia totalmente brasileira, empregando madeiras de reflorestamento do tipo *Eucaliptus citriodora*, que, além de respeitar as leis ambientais, também apresentou um excelente desempenho mecânico e elétrico, e com ótimas perspectivas de instalações na rede de distribuição de energia elétrica com um custo competitivo.

A partir dos ensaios mecânicos efetuados na resina RI 3 com diferentes proporções de carga, optou-se pelo compósito da resina com a proporção de 1:0,2 (resina e sílica), porque apresentou as melhores propriedades, como a tensão de tração, módulo de elasticidade, resistência ao rasgo e de dureza mecânica.

Comparando-se os resultados dos ensaios mecânicos realizados nas mesmas condições e segundo a norma técnica ASTM D 638 [42], observa-se que, com o tempo, a resina e seus compósitos aumentaram significativamente os seus valores de resistência à tração e de módulo de elasticidade. Portanto, essas resinas com e sem carga submetidas ao ensaio de tração após 120 horas de cura são classificadas como “plástico não rígido” (com o módulo de elasticidade abaixo de 70 MPa), e depois, com um maior tempo de cura, elas se tornam um “plástico semi-rígido” (com módulo de elasticidade maior que 70 MPa), conforme a descrição da norma ASTM D 883 [44]. E, de acordo com estudos de exposição ao intemperismo artificial [56], essa resina não sofre alterações capazes de prejudicar o seu desempenho.

No capítulo 5, observou-se que os valores de força máxima de ruptura obtidos entre os corpos de prova de madeira resinados e submetidos a diferentes tratamentos, encontram-se dentro do coeficiente de variação das propriedades da madeira de reflorestamento, que é de 18% (NBR 7190) [46]. No entanto, não ocorreu nenhum dano à superfície dos corpos de madeira impregnada com o compósito da resina RI 3 após eles terem sido submetidos às condições críticas de temperatura e de umidade nos dez ciclos apresentados da norma IEC 600638 [45].

Dos ensaios mecânicos e elétricos realizados nas cruzetas de madeira de reflorestamento impregnadas com resinas foram obtidos ótimos resultados. Pôde-se observar um aumento de até 30% nas propriedades de flexão e de ruptura mecânicas, e, dos ensaios elétricos, também um aumento do NBI, sendo de 34% para as cruzetas impregnadas com resina RI 3 e de 57% para o compósito RI 3 C20.

As cruzetas de madeira (*Pinus elliottii*) apresentam muitos nós, razão pela qual, quando submetidas a esforços de flexão, elas rompem no centro e próximo aos nós, justamente em seus pontos críticos. Conforme se pôde observar nas tabelas 6.7, 6.8 e 6.9, as cruzetas tratadas e impregnadas com o compósito da resina RI 3 e com o geotêxtil, e as não-impregnadas com a resina poliuretana derivada do óleo de mamona apresentaram carga de ruptura abaixo dos 800 daN (816 kgf) exigido pela norma técnica NBR 8458 [20].

Os valores de resistências obtidos com as cruzetas de *Pinus elliottii* com o material geotêxtil encontram-se dentro do coeficiente de variação das propriedades da madeira de reflorestamento que é de 18% [46]. Embora o material geotêxtil tenha aumentado um pouco as propriedades de resistência e de elasticidade das cruzetas, ele mostrou-se insuficiente para ampliar as propriedades a fim de cumprir as exigências da norma. Contudo, o revestimento é importante para o aumento da durabilidade do material, e também no modo de ruptura a flexão, pois a resina evita o desfibramento frágil não produzindo lascas na madeira.

O ensaio de envelhecimento em amostras de *Pinus elliottii* mostrou que a agressividade do ambiente pode corroer a superfície do material, mas ainda mantém o tratamento da madeira confinado em uma camada de resina. Este confinamento mantém o tratamento e reduz a agressividade de agentes biológicos que degradam a madeira. Estas cruzetas podem durar até 50 anos nas redes.

O comportamento da descarga parcial é um importante fator indicativo da qualidade da condição do sistema de isolamento. Assim, neste ensaio verificou-se que o nível de descarga parcial nos corpos de prova de cruzeta de madeira impregnados com a resina poliuretana derivada do óleo de mamona com carga (sílica) diminui significativamente quando acrescentada uma camada condutiva dentro dos furos, que são os **pontos críticos** da cruzeta em situação de **falha do isolador elétrico**, melhorando, assim, a sua operação na rede elétrica de distribuição.

As cruzetas de madeira de reflorestamento impregnadas com as resinas poliuretanas derivadas do óleo de mamona revestidas com m geotêxtil apresentam um importante aspecto ecológico, quando sobejamente atendem as leis ambientais vigentes. Somam-se a isso, os excelentes resultados dos ensaios mecânicos e elétricos - cinco protótipos de cruzeta de madeira de *Eucalyptus citriodora* impregnadas com o compósito da resina poliuretana derivada do óleo de mamona (ilustrados na figura 8.1) que estão instaladas na rede de distribuição da Empresa Elektro Eletricidade e Serviços S.A. a fim de comprovar seu desempenho em campo.

Figura 8.1: Protótipos de cruzetas de madeira resinadas enviadas para a Empresa Elektro Eletricidade e Serviço S.A.

Foi registrado um pedido de patente de invenção no INPI (Instituto Nacional da Propriedade Industrial) sob numero 018100044931 em 26 de outubro de 2010 (Anexo D).

8.2 Trabalhos futuros.

Para ampliação desta pesquisa as resinas deverão ser aditivadas com componentes anti-UV o que ampliaria sua resistência a intempéries e agressividade ambiental, ampliando a vida útil das madeiras. A inserção do aditivo ampliaria o custo do produto final, porém seria interessante avaliar a redução de dimensão da cruzeta como alternativa para as redes aéreas, considerando que a resistência mecânica destas é elevada.

O avanço para outros elementos estruturais, tais como postes, dormentes para trilhos e madeiras revestidas para construção de casas, também são objetos para estudos futuros.

ANEXO A

LISTA DE EQUIPAMENTOS

Lista de equipamentos.

Os equipamentos utilizados nos ensaios elétricos e mecânicos realizados neste projeto de cruzeta de madeira impregnada com resina poliuretana derivada do óleo de mamona encontram-se descritos a seguir:

1. Medidor de tensão de impulso:

Kit para ensaios de alta tensão da marca HAEFELY-TRENCH composto por:

a) Transformador TEO 100/10 :

- Razão: 2x220 V / 100 kV / 220 V
- Razão da corrente contínua: 2 x 17 A / 75 mA / 23 A
- Saída: 7,5 kVA, cont.
10 kVa por 1 hora
- Impedância : 5 %
- Frequência : 50 – 60 Hz
-

b) Mesa de controle, composta por:

- Transformador regulável STL 5: 230 V / 43 A, 5 kVA-cont. e 10 kVA por 2 min.
- Unidade de Controle OT 275: inclui as funções de operação do sistema de HV. Possui um plug adicional para controlar o gap entre as esferas para a geração do impulso.

c) Instrumento de Medição DMI 551, com:

- 3 canais, processador: 386 SX - 25 MHz;
- tensão de entrada: 115-230 V (automático);
- valor medido (em kV): AC – pico/ $\sqrt{2}$ ou RMS, DC – valor médio/fator ripple e Impulso: valor de pico

2. Medidor de resistência alta:

High Resistance Meter

Hewlett Packard

Modelo 4329 A

Número de série: MY43100597.

3. Medidor de capacitância e fator de dissipação dielétrica:

Precision LCR Meter

Yokogawa - Hewlett - Packard Ltd.

Modelo: 4284

Número de série: 04284-90000

Faixa de frequência: 20 Hz a 1 MHz.

4. Balança semi-nalítica

Marconi Equipamentos para Laboratórios LTDA.

Modelo: MA BS 5500

Número de série: 0.039.180-8

5. Agitador mecânico á vácuo

Marconi Equipamentos para Laboratórios LTDA.

Modelo: MA - 250

6. Transformador de tensão AC (do Laboratório da Universidade Técnica de Graz)

Messwandler – Bau GmbH Gallsbach

Modelo: TEO 100/10, 50 Hz , 5 kVA, 100 kV

Número de série: 75/42903

7. Medidor de descarga parcial (do Laboratório da Universidade Técnica de Graz)

Partial Discharge Bridge, 220 V, 50-60 Hz, 0.8 A

Tettex Instruments

Modelo: 9124

Número de série: 135.622

8. Equipamento de calibração de descarga parcial (do Laboratório da Universidade Técnica de Graz)

External Calibrator, 10-10.000 pC; 14,1-1310 pF

Tettex Instruments

Modelo: 9216

Número de série: 135.628

9. *Máquina Universal de Ensaio Mecânicos*

EMIC LTD.

Capacidade: 30 kN

Modelo: DL - 3000

Número de série: 6257

Programa: M Test Versão 3.00

10. *Máquina Universal de Ensaio Mecânicos*

DARTEC LTD.

Capacidade: 100 kN

Modelo: M1000 RH

Número de série: 92072

Programa: DARTEC *System Manager*

11. *Micrômetro Digital*

Mitutoyo

0-25 mm, 0.001 mm

Número de série: 293-805

12. *Paquímetro Digital*

Mitutoyo

0.01-150 mm

Modelo: 500-144B

Número de série: BG050347

13. *Relógio comparador*

Mitutoyo, nº 2046-08

Shock proof: 0,01 a 10 mm;

14. *Medidor de temperatura e umidade relativa do ar*

EMPEX Ltda

Número de série: 1760

15. *Máquina de ensaio de flexão*

Vickers Hidráulica Ltda.

Modelo: XG 06F20

16. Balança semi-analítica

Marconi Equipamentos para Laboratórios LTDA.

Modelo: MA BS 5500

Número de série: 0.039.180-8

17. Agitador mecânico a vácuo

Marconi Equipamentos para Laboratórios LTDA.

Modelo: MA - 250

ANEXO B

ARTIGOS PÚBLICADOS EM REVISTA E CONGRESSO

Novo compósito de madeira-geotêxtil-resina poliuretana para cruzetas de sistemas de distribuição de energia

Y. A. O. Assagra, R. A. C. Altafim, J. F. Resende, R. A. P. Altafim, H. C. Basso, F. A. R. Lahr, O. P. Ferreira

Resumo--Desde a década passada, novas leis ambientais têm surgido, dificultando e encarecendo o uso das madeiras provenientes de florestas nativas. Grande parte das cruzetas de madeira instaladas em sistemas de distribuição de energia é proveniente de árvores originárias dessas áreas. Uma alternativa de baixo custo é a utilização de madeiras oriundas do reflorestamento e impregnadas com resina poliuretana, as quais são derivadas do óleo de mamona (*Ricinus communis*). Neste contexto, tem se destacado a madeira da espécie *Eucalyptus* devido a apresentar excelentes propriedades mecânicas. Porém, durante o processo de seleção industrial, muitas peças de madeira são descartadas em função de pequenos defeitos e fissuras mesmo que essas falhas não interfiram em suas características mecânicas. Com o objetivo de diminuir o desperdício e ao mesmo tempo melhorar as características mecânicas das cruzetas, um novo processo industrial é apresentado neste trabalho. Basicamente ele consiste no envelopamento da cruzeta de madeira com um geotêxtil impregnado com resina poliuretana. Cabe ressaltar que a resina tem um papel fundamental na adesão da manta na madeira, no reforço mecânico e também como uma proteção impermeável.

Palavras-chave--compósito, cruzetas de madeira, geotêxtil, resina poliuretana, resistividade superficial e volumétrica.

I. INTRODUÇÃO

A madeira, polímero natural, é versátil e renovável, acompanha a vida do homem desde épocas remotas em suas mais diversas atividades, em especial na construção de edifícios. Para o Brasil, é um material estratégico, tendo em vista que boa parte de seu território ainda é coberto por florestas tropicais que, se corretamente manipuladas e protegidas de desastres naturais causados por fogo, insetos e doenças, podem durar longos períodos. As árvores mais antigas, quando retiradas em processo controlado, são substituídas por árvores novas que irão abastecer a oferta de

madeira das gerações futuras. Estudos têm mostrado que o ciclo de regeneração, ou campo de sustentação, pode ser igual ou ter um volume superior ao que está sendo retirado [1].

Considerando-se as potencialidades da madeira para finalidades elétricas, a mesma apresenta alta resistência em relação ao seu peso específico; tem excelente isolamento elétrica e térmica quando seca e pode ser utilizada como extintora de arco elétrico [2]. Além disso, por ser um material renovável que emprega energia solar em sua produção, contrapõe-se com outros materiais estruturais cuja produção requer processos poluentes que são antecidos por agressões ambientais consideráveis devido à obtenção de matéria-prima para sua fabricação [3-4]. Embora susceptível ao apodrecimento e ao ataque de organismos xilófagos, a madeira tem sua durabilidade natural prolongada quando previamente tratada com substâncias preservativas, podendo ser perfeitamente usada ao tempo [5, 6, 7-8].

Neste contexto, a Elektro - Eletricidade e Serviços S.A. em parceria com a Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP) vem trabalhando no projeto de novas cruzetas poliméricas e impregnadas com resina poliuretana de origem vegetal há mais de 15 anos [9-10]. Esta pesquisa já possibilitou reformular padrões de cruzetas e conseguiu colocar no mercado um produto de grande impacto ecológico. Com o intuito de aprimorar as técnicas de fabricação e atenuar o descarte de peças defeituosas, este trabalho apresenta uma nova proposta para a fabricação de cruzetas poliméricas com núcleo de madeira revestido de material geotêxtil e recoberto com resinas poliuretanas derivadas de óleo de mamona, denominadas cruzetas poliméricas naturais. A pesquisa para recobrir a madeira com geotêxtil impregnado com resina poliuretana derivada do óleo de mamona foi embasada em [11]. Portanto, neste trabalho será abordado um estudo das características elétricas e mecânicas da madeira revestida com geotêxtil e impregnada com resina poliuretana.

II. ASPECTOS RELACIONADOS AOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Nessa seção será relatada a metodologia para a elaboração do trabalho, desde o processo de preparação das amostras até a configuração dos ensaios.

Este trabalho foi financiado pelas seguintes agências de fomento: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeiçoamento Industrial (FIPAI), Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e Elektro.

Y. A. O. Assagra, R. A. C. Altafim, R. A. P. Altafim, H. C. Basso, F. A. R. Lahr, O. P. Ferreira, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil, (yuriolivato, altafim2010, altafim, hcbasso@gmail.com); frocco, osnypefe@sc.usp.br).

J. F. Resende, Elektro, Campinas, SP, Brasil, (jose.resende@elektro.com.br).

A. Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova de madeira, a princípio, foram cortados com diferentes geometrias e envoltos com manta geotêxtil. O geotêxtil utilizado é produzido com fibras de poliéster e não possui um padrão de tecelagem, o qual é conhecido comercialmente como geotêxtil não tecido. A gramatura do geotêxtil aqui empregado foi de 200 g/m². Assim, após revestir completamente a madeira com este geotêxtil, a mesma é recoberta com resina poliuretana derivada do óleo de mamona, do tipo bi-componente, conforme ilustrado na Fig. 1.

Fig. 1 - Processo de deposição do geotêxtil e resina poliuretana sobre a madeira.

Esta resina foi processada misturando-se a vácuo o polioli e o pré-polímero, na proporção 1:1,5, como pode ser visualizado na Fig. 2.

Fig. 2. Configuração laboratorial do misturador a vácuo.

Portanto, por meio da configuração laboratorial supracitada, foi possível produzir a resina, onde o vácuo auxiliou na eliminação das bolhas que eventualmente se formam durante todo o processo de mistura. No entanto, somente após 48 horas (tempo de cura da resina), o compósito final apresentou uma aparência polida e vítrea, características estas que podem ser claramente observadas por meio da Fig. 3. Cabe ainda comentar que a resina é responsável tanto pela adesão do geotêxtil à madeira quanto por sua impermeabilização.

Fig. 3. (a) corpo de prova revestido com manta geotêxtil e resina poliuretana; (b) detalhe do corpo de prova em corte transversal da composição de camadas.

Durante os ensaios mecânicos, os corpos de prova, foram cortados de forma a apresentarem geometria prismática, nas dimensões nominais de 400x18x16 mm, e a madeira utilizada foi do tipo Cupiúba (*Goupia glabra*). Entretanto, para garantir que estes corpos de prova representassem cruzetas de sistemas de distribuição de energia, estes foram mantidos em uma escala de 1:6. Para tanto, foram confeccionadas 20 amostras, sendo que 10 permaneceram em estado natural e 10 foram recobertas com o tecido geotêxtil. Os resultados obtidos por meio deste primeiro ensaio podem ser verificados na Seção III-A.

Para os ensaios elétricos, os corpos de prova foram adaptados em conformidade com as exigências da norma internacional ASTM 257 [12]. Assim, as peças de madeira foram cortadas em geometria cilíndrica, com diâmetro nominal de 100 mm e altura de 10 mm. No entanto, as amostras recobertas com tecido geotêxtil tiveram um aumento em suas dimensões passando a ter 105 mm de diâmetro e 18 mm de altura. A madeira utilizada para esse ensaio foi do tipo *Pinus sp.* Os resultados condizentes aos testes de resistividade elétrica podem ser verificados na Seção III-B.

B. Ensaio de flexão estática

Os ensaios mecânicos de flexão estática foram executados pelo método a três pontos, segundo a NBR 7190 [13]. De acordo com a norma, as extremidades das amostras devem ser fixadas em apoios e, a força, deve ser aplicada no ponto médio da peça. Com o intuito de tornar claro este ensaio, o mesmo encontra-se ilustrado na Fig. 4. Para que estes ensaios viessem a ser devidamente realizados, empregou-se uma Máquina Universal de Ensaios, modelo DL-30000 (*Digital Line*), com capacidade para 300 kN, da fabricante EMIC. Ressalta-se que de acordo com o manual fornecido pelo fabricante, a precisão de medição da prensa está em torno de 1%.

Fig. 4. Configuração do ensaio mecânico conforme estipulado pela norma NBR 7190.

C. Determinação da resistividade superficial e volumétrica

A resistividade volumétrica caracteriza a resistência elétrica que o material oferece quando uma tensão contínua é aplicada em um volume específico. Já a resistividade superficial determina a resistência que o material oferece ao longo de sua superfície diante de uma tensão contínua aplicada. O esquema de medição da resistividade é apresentado na Fig. 5.

Fig. 5. Esquema de configuração representativa dos ensaios de resistividade volumétrica e superficial.

Por meio da Fig. 5, pode-se visualizar em destaque o gerador de tensão contínua e medidor de resistividade volumétrica e superficial (1); o eletrodo superior (2); o eletrodo central (3); o eletrodo guarda (4); e a amostra (5).

Estes ensaios foram, portanto, realizados com a seguinte configuração laboratorial: uma fonte/medidor de alta resistência da empresa *Agilent*, modelo 4339B (representa o item 1 da Fig. 5) e uma célula de resistividade do mesmo fabricante, modelo 16008B (representa os itens 2, 3 e 4 da Fig. 5), os quais encontram-se dentro dos padrões solicitados pela norma ASTM 257. A tensão máxima gerada pela fonte é de 1 kV e a faixa de medição da resistividade está entre 10^3 e $1,6 \times 10^{16}$, com precisão de 0,6%.

III. RESULTADOS

Os resultados obtidos nos ensaios acima citados serão mostrados nessa seção. Como na seção II, os resultados estão divididos em duas partes, resultados mecânicos e elétricos.

A. Resultado do ensaio mecânico

De acordo com os procedimentos básicos para ensaios mecânicos, faz-se necessário um primeiro ensaio para que possa ser obtido o valor máximo de resistência mecânica da peça. Portanto, das 20 amostras iniciais, duas foram submetidas a este primeiro ensaio, sendo uma madeira nua e outra revestida. No entanto, apesar de a madeira apresentar comportamento distinto entre amostras, esse passo é extremamente necessário para a prévia configuração da Máquina Universal de Ensaios.

Desta forma, para os ensaios subseqüentes, foi empregado um total de 18 amostras. Após os ensaios foram obtidos os valores da força aplicada na madeira e da deformação ocasionada na mesma, grandezas estas que são representadas respectivamente em Newtons (N) e milímetros (mm). A partir destes valores foram traçadas retas de força por deformação para cada um dos ensaios (total de 18 ensaios) e então, tornou-se possível a obtenção de duas retas médias que representassem os 9 ensaios para madeiras nuas e os 9 restantes ensaios das madeiras revestidas. Estas duas retas médias podem ser observadas por meio da Fig. 6.

Fig. 6. Retas médias resultantes dos ensaios mecânicos para madeiras nuas e revestidas quando submetidas à flexão estática.

Por meio das retas ilustradas no gráfico da Fig. 6, é possível realizar o cálculo da rigidez mecânica dos corpos de prova (cruzetas em escala de 1:6) empregando-se para tanto o módulo de elasticidade médio. Desta forma, define-se as seguintes constantes:

- Vão livre (l) = 36 cm (comprimento do corpo de prova = 40 cm - 2 cm de cada lado);
- Seção transversal (1,6 x 1,8 cm).

Definidas as constantes anteriormente citadas, faz-se necessário determinar o momento de inércia I , conforme (1).

$$I = \frac{1,6 \cdot 1,8^3}{12} = 0,7776 \text{ cm}^4 \quad (1)$$

onde, 1,6 é o valor referente a base da seção transversal da madeira e 1,8 é a altura da mesma, portanto, o momento de inércia é 0,7776 cm⁴.

Em seguida, há a necessidade de obter o valor da flecha máxima, o qual tem seu cálculo definido por norma, conforme (2).

$$f = \frac{l}{200} = 0,18 \text{ cm} \quad (2)$$

onde, l = 36 cm. Portanto, o valor da flecha máxima é de 0,18 cm.

Após a obtenção de todas estas variáveis, calcula-se o módulo da elasticidade, conforme (3).

$$E = \frac{P \cdot l^3}{48 \cdot f \cdot I} = \frac{36^3}{48 \cdot 0,18 \cdot 0,7776} P = 6944 P \quad (3)$$

onde, P é o valor da força no ponto de deslocamento obtido para a flecha máxima (equação (2)). Assim, os valores de P que representam os ensaios para as madeiras nuas e revestidas foram obtidos realizando-se uma análise no gráfico da Fig. 6, os quais são descritos na Tabela I.

TABELA I
MÓDULOS DE ELASTICIDADE MÉDIOS DAS CRUZETAS NUA E REVESTIDAS COM GEOTÊXTIL

	Madeira nua	Madeira revestida com geotêxtil
$E_{\text{médio}}$ (MPa)	13794	15971

Como resultado final tem-se que o módulo de elasticidade médio da madeira revestida com manta teve um acréscimo de 13.6%.

B. Determinação da resistividade superficial e volumétrica

O lastro que incentivou a realização dos ensaios elétricos nesta pesquisa foi o resultado obtido por [9], onde demonstrou-se que madeiras impregnadas com resina poliuretana têm sua resistividade superficial maximizada em relação às madeiras em estado natural. Seguindo esta premissa, foi estabelecida a hipótese de que devido à camada mais externa do compósito ser constituída de resina poliuretana, espera-se que o novo material apresente características similares ou até superiores.

Nestes ensaios, a pressão exercida pelo eletrodo superior sobre a amostra foi de 50 N e a tensão aplicada de 500 V. Os resultados obtidos e que comprovam a hipótese supracitada são apresentados na Tabela II.

TABELA II
RESISTIVIDADE VOLUMÉTRICA E SUPERFICIAL EM AMOSTRAS DE MADEIRA EM ESTADO NATURAL E MADEIRAS RESINADAS E REVESTIDAS COM GEOTÊXIL

Amostra	Médias	
	Resistividade Volumétrica (Ωcm)	Resistividade Superficial (Ω)
PN	$4,9 \times 10^{10}$	$1,6 \times 10^{11}$
PMR	$1,0 \times 10^{14}$	$5,3 \times 10^{14}$

onde: PN → Madeira em estado natural (sem tratamento)

PMR → Madeira revestida com manta geotêxtil e resina poliuretana

IV. CONCLUSÕES

Neste artigo, mostrou-se uma nova metodologia para o recobrimento de cruzetas de madeira, por manta geossintética e impregnadas por resinas poliuretanas derivadas do óleo de mamona, designadas como cruzetas poliméricas naturais.

Os testes têm indicado que o recobrimento das cruzetas pela manta confere um aumento no módulo de elasticidade da ordem de 13% e maior robustez ao transporte e armazenamento. Esta técnica também possibilita que cruzetas com pequenos defeitos e pequenas trincas, desde que não interfiram em sua resistência mecânica, possam ser aproveitadas no processo industrial e, por consequência, reduzir o desperdício de material.

Devido a este ser um material higroscópico, a madeira troca continuamente umidade com o meio, o que acarreta significativas variações em suas características elétricas, principalmente nas resistividades volumétrica e superficial.

Os resultados obtidos mostraram que as resistividades da madeira envelopada por geotêxtil impregnado com resina têm ampliadas em até 100% suas propriedades elétricas. Contudo, é importante verificar como essas características elétricas se comportam em ambientes com outros teores de umidade. Neste contexto, para futuros trabalhos, esses ensaios elétricos serão novamente realizados, com a imersão das amostras em água devidamente tratada por um período de no mínimo 24 horas. Desta forma, espera-se que o revestimento proposto

impermeabilize a madeira preservando suas características elétricas.

V. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a todos os técnicos dos laboratórios que participaram ativamente desta pesquisa, em especial ao Sérgio, do Laboratório de Construção Civil (LCC) da EESC-USP.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] E. Vidal, V. M. Viana, J. L. F. Batista, "Crescimento de floresta tropical três anos após colheita de madeira com e sem manejo floresta na Amazônia oriental." *Scientia Forestalis*. n.º. 61, pp. 133-143, June 2002.
- [2] B. Tareev, *Materials for electrical engineering*. Higher School Publishing House Moscow, 1965, p. 198.
- [3] C. Calil Jr, F. A. R. Lahr, A. A. Dias, *Dimensionamento de elementos estruturais de madeira*. Manole, 2003, p. 152.
- [4] L. Gustavsson, R. Sathre, "Variability in energy and carbon dioxide balances of wood and concrete building materials." *Building and Environment*, vol. 41, pp. 940-951, 2006.
- [5] J. C. Hellmeister, "Madeiras e suas características." In: *Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira*, 1, São Carlos, SP, Brasil, 1983. Anais. São Carlos, USP-EESC, v.1, p.1-32.
- [6] J. C. Hellmeister, "Sobre a determinação de características físicas da madeira". São Carlos, 1973, 161p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1973.
- [7] M. A. Ritter, *Timber bridges*. Forest Products Laboratory – Forest Service, Madison, 1990.
- [8] F. A. R. Lahr, "Considerações a respeito da variabilidade de propriedades de resistência e de elasticidade da madeira." São Carlos, 1990, 161 p. Tese (Livre Docência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1990.
- [9] R. A. C. Altafim, J. F. R. Silva, H. C. Basso, C. Calil Jr, J. C. Sartori, C. R. Murakami, R. A. P. Altafim, G. O. Chierice and A. Silveira, "Study of timber crossarms coated with castor oil-based polyurethane resins: electrical and mechanical tests." 2004 *IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI)*, IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society. September 19-22, Indianapolis, USA, 2004.
- [10] R. A. C. Altafim, J. F. R. Silva, D. P. Gonzaga, C. R. Murakami, J. P. M. Godoy, H. C. Basso, B. S. Bueno, C. Calil Jr, J. C. Sartori, R. A. P. Altafim and A. Silveira, "Timber Cross-arms coated with Polyurethane Resins – Tests and Numerical Simulations." *XVI CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*. November, Porto Alegre – RS, Brasil, 2004. (<http://www.ufrgs.br/cbecimat2004/>).
- [11] R. A. C. Altafim, C. R. Murakami, S. Claro Neto, L. C. R. Araújo, and G. O. Chierice, "The effects of fillers on the service properties of polyurethane resins." *Materials Research Magazine*, São Carlos, Brazil, vol. 6, no. 2, pp. 187-191, April-June 2003.
- [12] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM D257. Standard Test Methods for DC Resistance or Conductance of Insulating Materials. West Conshohocken, USA, 2007.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7190/1997. Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.

Laminated Composite Based on Polyester Geotextile Fibers and Polyurethane Resin for Coating Wood Structures

Yuri Andrey Olivato Assagra^{a*}, Ruy Alberto Pisani Altafim^b, José Francisco Resende da Silva^c,

Heitor Cury Basso^a, Francisco Antonio Rocco Lahr^d, Ruy Alberto Corrêa Altafim^a

^aDepartment of Electrical Engineering, University of São Paulo – USP, Av. Trabalhador São Carlense, 400, Centro, CEP 13566-590, São Carlos, SP, Brazil

^bComputer Systems Department, Center of Informatics, Federal University of Paraíba – UFPB, João Pessoa, PB, Brazil

^cElektro Eletricidade Serviços S.A., Rua Ary Antenor Souza, 1, CEP 13053-024, Campinas, SP, Brazil

^dDepartment of Structural Engineering, University of São Paulo – USP, Av. Trabalhador São Carlense, 400, Centro, CEP 13566-590, São Carlos, SP, Brazil

Received: July 16, 2011; Revised: April 17, 2013

New environmental laws have restricted the use of hardwood trees in overhead power lines structures, such as, poles and cross-arms, leading companies to seek alternative materials. Reforested wood coated with polymeric resin has been proposed as an environmental friendly solution, with improved electrical properties and protection against external agents, *e.g.* moisture, ultraviolet radiation and fungi. However, the single thin layer of resin, normally applied on such structures reveal to be inefficient, due to be easily damage during handling. In this paper, we present a composite coating, based on geotextile fibers and polyurethane resin that is suitable for wooden structures. Results obtained from two different tree species (from managed and reforested areas) coated with the composite reveal that the additional layer not only provided a stronger adhesion between wood and coating layer but also a further improvement in the electrical properties and better protection against abrasion and moisture.

Keywords: polyurethane resin, geotextile fibers, coating layer, wooden structural elements

1. Introduction

Wood is a versatile material that makes it suitable for a large number of applications that vary from structural elements on constructions sites to raw material for cellulose and paper manufacture. Not to mention that it also has a strong ecological appeal, if proper management and reforestation are employed in plantation zones. However, what makes wood a particularly special material is its low weight and high mechanical resistance ratio in addition to its intrinsic natural properties as thermal and electrical resistance. These properties combined are the desired characteristics for structural elements employed in transmission and distribution power lines such as, poles and cross-arms, responsible for supporting cables, insulators and electrical equipment.

Electrical insulation is a wood particularly important characteristic for insulation protection of power lines, where elements are exposed to over-voltages and lightning discharges¹. In addition to these characteristics is the long life of the material, common to most hardwoods.

In recent years, new environmental laws have restricted the logging of native hardwoods, especially those species used in cross-arm production, such as *Hymenaea courbaril* L., *Astronium urundeuva* and *Tabebuia chrysotricha*². This restriction has led to a decline in the availability of this material, leading to an increase in cross-arm costs.

Several solutions have been adopted by different countries in order to reduce costs *e.g.* in Norway and United States, cross-arms are being produced from laminated wood pieces^{3,4} and in Brazil companies have opted to replace native woods with reforestation timbers, such as eucalyptus. Although reforestation wood presents some particular disadvantages, such as reduced mechanical resistance, lower electrical insulation and faster decay from weather exposure⁵. This last is crucial since most structures employed in distribution power lines are exposed to moisture, ultraviolet radiation, fungi and insects.

In order to avoid the effects of moisture and other environmental agents, some companies have opted to replace wood by concrete and recycled polymers. However, these materials have their own problems, such as, the production of concrete is not regulated according to environmental laws and concrete cross-arms are heavier, which increases transportation costs not to mention that they are more difficult to handle. Polymers on the other hand can be even more expensive than wood, especially when additives are mixed to provide protection against ultra-violet radiation and avoid degradation⁶.

Another solution that has proved popular with electricity companies in Brazil, better described by Altafim et al.⁷, was the coating of reforestation wood cross-arms with a thin layer of polyurethane resin. This not only promoted the

*e-mail: yuriolivato@gmail.com

necessary enhancement in the mechanical and electrical properties, but also created a protective layer against external agents. Nevertheless, companies that have opted for this solution has observed that the coating polymeric layer are easily damaged during transportation and handling, leaving parts of the wooden structure exposed.

In this paper, we describe the usage of a composite made of geotextile fibers and polyurethane resin to reinforce wooden structures against abrasion during handling. Laboratory tests performed on samples from two different wood species coated with the proposed composite indicate that not only the adhesion between wood and coating was improved, but also the water impermeability and electrical properties.

2. Experimental Details

2.1. Sample preparation

The alternative coating composite consists in a mixture of a bi-component resin and a non-woven polyester geotextile fiber (200 g/m² trade name GF10/200). The resin (trade name RP1315A) is composed in part by a polyol derived from castor oil and part by an aromatic pre-polymer that comes from diphenylmethane diisocyanate. Both resin and geotextile were purchased from Brazilian companies: Imperveg and Ober Geossintéticos, respectively.

In order to produce the composite the polyol and the pre-polymer were mixed in a 1:1.5 ratio in a vacuum mixer for three minutes to reduce gas bubbles, afterwards the resin was manually poured out and spread over the geotextile, which was wrapped in the wood samples.

To test the composite coverage, pieces of wood were previously cut from *Dinizia excelsa* Ducke and *Pinus taeda* (loblolly pine) trees, sourced from managed and reforestation areas, respectively. The samples initially covered with the geotextile fiber and then coated with resin, formed a three-layer system, as illustrated in Figure 1. The initial fluid state of the resin and the high porosity of the geotextile fiber allowed the resin to penetrate into the fabric and reach the surface of the wood, bonding all the components together after curing. It is important to emphasize that the coating layer increases the sample thickness in approximate 2 mm.

Later, coated and uncoated samples were mechanically and electrically tested according to standard process normally required for electrical structures. Abrasion test was performed on samples coated only with resin and with the geotextile composite, for a comparison. And water absorption and adhesion tests were further implemented to analyze the effect of moisture on the composite and to verify the adherence strength of the coating.

2.2. Flexural mechanical characterization

Flexural properties, such as, elastic and rupture moduli, are regularly tested on electrical structures, such as cross-arms since they are expected to support the weight of equipment and cables. Therefore to verify the influences of the geotextile composite on these wooden structures, the flexural properties were determined in accordance with ABNT NBR 7190 – Appendix B⁸.

The flexural properties (elastic and rupture moduli) were measured using a three-point loading system applied to a wood supported beam, as represented in Figure 2. An Amsler universal testing machine was employed as the central force and the sample displacement was measured with a Mitutoyo Ltda dial indicator. The measurements were performed on fourteen prism-shaped samples (30 mm width, 38 mm height and 400 mm long) cut from the same tree (for each specie) to prevent large variations in their structural fibers.

From the displacement measurements and the maximum supporting load, the Rupture modulus - (S_R) and the Elastic modulus, (E_f) were determined. S_R was calculated as if the wood was an elastic material using Equation 1⁸,

$$S_R = \frac{3P_{\max}L}{2bh^2} \quad (1)$$

where $P_{\max}$ is the maximum load applied on the sample at rupture, and b , h are the sample dimensions width and height, respectively and L is the support span.

The E_f given by Equation 2⁸ is determined from the linear region on the strain-stress diagram, with Δ being the strain variation at ($\text{Strain}_{2500N} - \text{Strain}_{500N}$) and P the stress variation in the aforementioned stress interval.

$$E_f = \frac{PL^3}{4bh^3\Delta} \quad (2)$$

Figure 1. Cross-section view with sequence of layers on samples coated with geotextile fibers and polyurethane composite resin.

Figure 2. Schematic diagram of the static bending test to characterize the reduced scale cross-arm.

2.3. Pin-on-Disc Wear Test

In order to verify damages caused by abrasions on the geotextile with resin coating layer, a pin-on-disc wear test was performed according to ASTM G99⁹. The test consist in promote a friction between the sample surface and a rigid pin. For this, samples designed with circular shapes were clamped to a support that can rotates up to a certain speed while a fix pin, scratches the sample surface. The pin is supported by a mechanical arm with several predefined fixing places and is designed to support additional superimposed loads. The loads are added to further test the surface resistance limits. Details of the setup are schematic represented in Figure 3a.

Preliminary test was performed on circular samples with approximate 102 mm in diameter and 12 mm thick in order to identify the setup parameters, such as, rotation speed, superimposed load and experimental time. From this, the following parameters were obtained: 100 rpm, 1000 g and 20 min, respectively. A stainless steel pin was employed, due to its higher rigidity if comparable to the resin or the geotextile composite. After the test was performed an abrasion track, on the sample surfaces, could be observed. The track deepness was analyzed with a linear variable differential transformer (LVDT) precise in microns.

Nevertheless, due to the coating process it is expected some thickness heterogeneity on the samples surfaces, therefore measurements of track deepness were performed at three different places: outside the track (named region a), on the track (region T) and inside the track (region b), as indicated in Figure 3b. For each area, 28 measurements were taken for an averaged value.

2.4. Volume and Surface Resistivity

The proposed coating layer i.e. geotextile fabric and resin is expect to be employed on electrical structures which are subjected to intense electrical fields. Therefore, analyze its volumetric and surface resistivity is crucial to prevent damages on the coated structures, once these parameters are relevant in cases of resistivity reduction and current leakage¹⁰. Here, the volumetric and surface resistivity, of coated samples were verified according to standard measurements for insulating materials (ASTM D257¹¹), which were conducted with a standard resistivity cell model 16008B, designed as illustrated in Figure 4, and a standard resistivity meter model 4339B, both from Agilent.

According to the ASTM D257¹¹, the volumetric and surface resistivity measure must be performed applying an 80 N load to circular shaped samples superimposed to ensure contact between the cell electrodes and sample. Wooden disks of 100 mm in diameter and 10 mm thick from *Dinizia excelsa* Ducke and *Pinus taeda* (loblolly pine) trees were cut and coated as previously described, resulting in samples with final dimensions of 102 mm and 12 mm, respectively. A 500 V DC voltage was applied for 60 s to perform the measurements.

2.5. Dielectric breakdown voltage

Electrical discharges are regularly occurring in distribution power lines systems, therefore the equipment and structures should support this overvoltage conditions.

Figure 3. a) Schematic representation of the Pin-on-Disc Wear Test and b) areas measured with LVDT after Pin-on-Disc Wear Test.

Figure 4. Schematic diagram of the experimental setup to measure volume and surface resistivity.

As explained by Darveniza et al.¹, the wood in these circumstances can act as an additional insulation, increasing the dielectric strength of the structure and thus reducing the energy associated to electric arcs. Once, the geotextile composite is applied to these structures, it is important to determine its dielectric breakdown voltage.

For this, measurements were carry according to ASTM D149¹², which describes three methods for determine the dielectric strength. The most common, that was also employed here, is the Short-Time Test, which consists in apply an increasing voltage through the sample until it reaches electrical breakdown. The samples were enclosed inside a containing mineral oil chamber to avoid external breakdown, which normally occurs in the air around the sample due to its lower dielectric strength. Circular wooden samples of 102 mm in diameter and 12 mm thick were submerged in the oil chamber and placed between two hemispherical electrodes, 56 mm and 68 mm in diameter. A voltage with a ramp rate of 500 V/s was directly applied to the electrodes for 20 s through a HAEFELY-TRENCH kit consisting of a TEO 100/10 transformer and a DMI 551 control table.

2.6. Permittivity and dielectric loss ($\tan \delta$)

Permittivity and $\tan \delta$ together with structural geometrical parameters are normally employed on the description of the electrical model accepted on coordination insulation studies¹ used during computer simulations. On this model the wood structure is represented in serial with a porcelain insulator, as in a circuit with a capacitor in parallel with a resistor. Therefore, determine those electrical properties, is complementary to improve the model. And in order to measure the permittivity and the $\tan \delta$ of uncoated and coated samples, circular wooden disks were cut with

approximately 22 mm in diameter. The disks were separated into two sets: samples from *Dinizia excelsa* Ducke and *Pinus taeda*, which were 10 and 7 mm thick, respectively. Both sets were coated with a 4 mm geotextile-resin layer and painted with a conductive paint to ensure electrical contact. Later the measurements were performed in a dielectric material test fixture model 16451B from Agilent connected to a precision LCR meter, model 4284A, also from Agilent, as described in ASTM D150¹³.

2.7. Absorption analysis

Temperature and high humidity exposures tests according to the technical standard IEC 60068¹⁴ have been performed on wooden samples coated with the polyurethane resin employed here and as reported no negative influence could be observed¹⁵. The influence of weather conditions on the mechanical properties of the polyurethane resin was also investigated in an artificial environment and only small changes was observed, mainly concerning the resistance to traction and the elastic modulus, which in both cases increased, meaning that the samples became more resistant to traction after being exposed for a certain period and less flexible¹⁶ i.e. more brittle.

Nevertheless, in order to verify if the proposed composite could also protect the wood against humidity, which is the major concern on electrical structures, water absorption tests were performed on coated and uncoated samples for comparison.

The process to evaluate absorption employed here was relatively simple, consisting in measuring the weight of the sample before and after a 24 h period of immersion. For this study, the samples were initially dried in an oven heated at 100 °C and weighed. Later the samples were submersed in a polyethylene box containing deionized water at 25 °C as recommended by ASTM D570¹⁷. Sample holders were used to avoid sample flotation. After immersion, the samples were surface-dried with a clean cloth and again weighed. From the difference between weights, it was possible to determine how much water the samples absorbed.

2.8. Adhesion

One of the major concerns of the proposed coating layer, besides addition to protection against external agents and improvement of electrical properties and abrasion, was to provide an efficient covering of the wood structures that also prevents damage caused during handling and transportation. For this, an adhesion test between wood and coating was performed by sticking together two pieces of wood with castor oil resin or with the castor oil and geotextile fiber. Wood pieces of 30 mm × 38 mm × 50 mm were used and bonded together at the 30 mm × 38 mm surfaces. After the resin was cured (period of 24 h), the samples were half placed in a fixed sample holder leaving the bonding piece complete free, as schematically represented in Figure 5. A hydraulic press was then employed to apply an increasing force on the free side of the sample, forcing it to shear. The applied force was recorded until it reached its maximum value at the detach moment.

Figure 5. Schematic diagram of the experimental setup to measure the adhesion between the wood and the coating layer.

3. Results and Discussion

The maximum tensile strength at rupture and the elastic modulus of uncoated and coated samples, cut from the same tree for each wood species, are presented in Figure 6 and 7. In Table 1 the values are presented with the acronym RG to reference samples coated with geotextile fiber and resin and R to reference samples coated only with resin.

As one can see from these results, the coated samples presented a lower elastic modulus when compared to uncoated ones. This behavior can be explained considering the coated structure as a three-layer element (coating layer – wood – coating layer) as propose in Cho and Kim¹⁸ and US Forest Service Research Note¹⁹. Disregarding the coating sides and the shear modulus, the three-layer model for the overall elastic modulus, E_f can be obtained from Equation 3.

$$E_f = \frac{E_1 I_1 + E_2 I_2 + E_3 I_3}{I_1 + I_2 + I_3} \quad (3)$$

where, E_1 , E_2 and E_3 correspond to the elastic modulus of each material layer and I_1 , I_2 and I_3 are the respective second moments of inertia give by Equation 4¹⁸.

$$I_1 = w \left[(d_2 - d)^2 d_1 + (d_2 - d) d_1^2 + d_1^3 \right] \quad (4a)$$

$$I_2 = w \left[\frac{d_2^3}{3} - (d_2^2 d) + (d_2 d^2) \right] \quad (4b)$$

$$I_3 = w \left[d_3^3 + (d_3^2 d) + (d_3 d^2) \right] \quad (4c)$$

where, w is the sample width, d_1 , d_2 and d_3 are the layer 1, 2 and 3 thickness, respectively, and d is the distance from the neutral plane to the interface between layers 2 and 3, as shown in Figure 8.

Figure 6. Elastic modulus from samples: in natural state, coated with resin (R) and coated with resin and geotextile fiber (RG).

Figure 7. Rupture modulus from samples: in natural state, coated with resin (R) and coated with resin and geotextile fiber (RG).

Table 1. Modulus of elasticity and modulus of rupture of uncoated and coated samples cut from random wood pieces.

Wood	Coating	Ef(MPa)	SR (MPa)
Pinus taeda	-	9813 ± 16%	85 ± 14%
Pinus taeda	R	9516 ± 9%	106 ± 12%
Pinus taeda	RG	9491 ± 17%	95 ± 18%
Dinizia excelsa Ducke	-	13448 ± 7%	124 ± 16%
Dinizia excelsa Ducke	R	12511 ± 6%	129 ± 10%
Dinizia excelsa Ducke	RG	11587 ± 9%	133 ± 17%

Figure 8. Schematic cross-section of the coated structure with respective thickness layers.

Assuming, that layers 1 and 3 are identical, Equation 3 can be rearranged, leading to Equation 5, which can be used to determine the elastic modulus of multi-layered elements.

$$E_f = \frac{2E_1I_1 + E_2I_2}{2I_1 + I_2} \tag{5}$$

Replacing the elastic moduli in Equation 5 by its correspondent values: $E_f = 2.2$ MPa for the coating layer obtained from the flexural measurements and $E_2 = 9813$ MPa for *Pinus taeda* or 13448 MPa for *Dinizia excelsa Ducke* (calculated values as in Table 1), multi-layer elastic moduli of 7256 MPa and 9943 MPa, can be obtained for *Pinus taeda* and *Dinizia excelsa Ducke*, respectively. From this, one can observe that the elastic modulus of the multi-layer structure is reduced with the additional layer.

Besides the elastic modulus of the coating layer, the shear modulus of samples with geotextile and resin coating assumes great relevance, preventing the structure to reach the rupture in an early stage as presented by the higher rupture modulus (S_R), also in Table 1.

Nevertheless, high standard variations between measurements are observed even from samples from the same wood piece, meaning from a statistical analysis, that there were no significant improvements on the flexural mode when samples are coated only with resin or with the geotextile composite.

On the pin-on-disc wear test performed to verify damages during abrasion, a more significant result was obtained. As can be seen in Figure 9, samples coated only with polyurethane resin (Figure 9a) were hardly damaged, presenting areas in which the resin was complete removed. On the other hand, samples coated with geotextile and resin (Figure 9b) presented only a small track caused by the contact with the metallic pin.

Measurements from the track deepness were taken as previously describe and are presented in average values in Table 2. On the resin coated samples a track deepness of 0.176 mm was found while only 0.0208 mm was obtained on samples coated with geotextile and resin. This result strongly indicates that the presented coating provided a better protection for handling.

Table 3 shows the results from the electrical measurement of the dielectric strengths for uncoated and coated samples. The obtained values indicate that both coating layers, *i.e.* with resin or resin and geotextile fiber, improved the dielectric strength on both wood species. However, samples coated with geotextile and resin presented breakdown strength approximate three times higher than samples coated only with resin, which was around 1.2 kV/mm greater than natural samples.

The increase in dielectric strength of coated samples can be explained comparing the composite (wood coated with resin or geotextile and resin) to a first approximation of an electrical circuit composed by two capacitors connected in serial, where one of them represents the wood (permittivity and thickness) and the other the coating layer (permittivity and thickness). In this model, the electrical field is proportional distributed to the materials permittivity, therefore, the layer with the lower permittivity, in this case

Figure 9. Images from the Pin-on-Disc Wear Test on samples coated with resin (a) and geotextile-resin (b).

Table 2. Results from the pin-on-disc wear test.

Sample	Coating	Mean Thickness (mm)	Mean Track Thickness (mm)
R		10.03	9.85
RG		18.95	18.93

Table 3. Dielectric strength of uncoated and coated samples.

Wood	Coating	Dielectric Strength (kV/mm)
Pinus taeda	-	2.2 ± 14%
Pinus taeda	R	3.4 ± 8%
Pinus taeda	RG	6.2 ± 3%
Dinizia excelsa Ducke	-	1.5 ± 7%
Dinizia excelsa Ducke	R	2.3 ± 16%
Dinizia excelsa Ducke	RG	5.9 ± 5%

the coating layer, is submitted to a more intense electric field, thus reducing the electrical stress on the wood promoting an increase in the overall dielectric strength.

The lower permittivity and $\tan \delta$ (current leakage) of the wood-geotextile-resin composite are presented in Table 4. And it can also be explained by the same capacitors in serial model. However, one must consider that each capacitor has also a resistor in parallel associated to it (see Figure 10) and each capacitor in parallel with a resistor represents a different material in the composite. According to this model, the overall permittivity (ϵ) can be calculated by the Expression 6²⁰, where ϵ_i is the material permittivity and P_i the material volume ratio. Thus, replacing the measured permittivity into Equation 6 and its respective layer thickness it was possible to obtain theoretical permittivities values of $3.4 \pm 1.5\%$ and $5.9 \pm 6\%$ for *Pinus taeda* and *Dinizia excelsa Ducke* wood samples coated with geotextile composite. And these values are very much in agreement to those measured ones of $3.5 \pm 2.9\%$ and $5.8 \pm 2.7\%$, respectively.

$$\frac{1}{\epsilon} = \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{\epsilon_i} \tag{6}$$

The resistor-capacitor model presented in Figure 10 can also be employed to explain the decrease in the $\tan \delta$ shown in Table 4. As the model has its capacitors in parallel with

Table 4. Permittivity and $\tan \delta$ of uncoated and coated samples.

Wood	Coating	Permittivity (ϵ_r)	$\tan \delta$
Geotextile and resin	-	$3.6 \pm 2.3\%$	0,02
Pinus taeda	-	$3.1 \pm 0.5\%$	0.40
Pinus taeda	RG	$3.5 \pm 2.9\%$	0.07
Dinizia excelsa Ducke	-	$10.2 \pm 4.7\%$	0.58
Dinizia excelsa Ducke	RG	$5.8 \pm 2.7\%$	0.06

Figure 10. Schematic electrical circuit that represents the multi-layer composite (wood-geotextile fiber-resin).

its resistors, and they are associated in series, the equivalent resistance is higher than on uncoated wood, and since the $\tan \delta$ is inversely associated with the material resistance it tends to be lower, as found during measurements. The increasing in the equivalent resistance of the composite material also explain the higher values of volumetric and superficial resistivity shown in Table 5, once they are directly associated to it.

Another property investigated in this study was the influence of moisture, which has a major impact on wood, such as, variation on the elastic modulus as described in Silva et al.²¹ and Gerhard²². Therefore measuring how much water the material can absorb is an important way to determine the behavior of the wood when exposed to high humidity environments. Here, the results from the water absorption test are presented in Table 6 for uncoated and coated samples from the two varieties of wood.

From the comparison, one can observe that after immersion, the mean percentage of absorbed water increases more than 60% on uncoated samples from *Pinus taeda* and more than 30% on uncoated samples from *Dinizia excelsa Ducke*. This difference between the two wood species is partially explained by the higher porosity of *Pinus taeda* structure compared to *Dinizia excelsa Ducke* (see SEM images in Figure 11).

Table 5. Volumetric and superficial resistivity of uncoated and coated samples.

Wood	Coating	Vol. Res. (Ωcm)	Sup. Res. (Ω)
Pinus taeda	-	6.3E+10	5.3E+11
Pinus taeda	R	2.2E+14	6.7E+14
Pinus taeda	RG	2.1E+15	3.1E+15
Dinizia excelsa Ducke	-	2.4E+9	1.4E+10
Dinizia excelsa Ducke	R	1.3E+15	1.4E+15
Dinizia excelsa Ducke	RG	6.7E+14	1.1E+16

Table 6. Percentage of water absorbed in uncoated and coated samples.

Wood	Coating	Mean Value (%)
Pinus taeda	-	62.8 ± 3
Pinus taeda	R	4.0 ± 14
Pinus taeda	RG	0.7 ± 13
Dinizia excelsa Ducke	-	32.3 ± 5
Dinizia excelsa Ducke	R	3.8 ± 3
Dinizia excelsa Ducke	RG	0.6 ± 17

Table 7. Maximum force applied in the adhesion test on coated samples with resin and resin and geotextile.

Wood	Coating	Detaching Force (N)
Pinus taeda	R	6544 ± 10%
Pinus taeda	RG	7845 ± 10%
Dinizia excelsa Ducke	R	4305 ± 20%
Dinizia excelsa Ducke	RG	7420 ± 14%

For the last, adherence test was performed as previously described to verify the bounding between the coating layers and wood piece. The maximum forces applied before the samples sheared are presented in Table 7 with regard to the bonding layer. As can be seen, the use of an extra geotextile layer has improved the bonding of both wood species, especially on the *Dinizia excelsa Ducke* samples. We believe that the geotextile layer reduces the tension between the bonding surfaces and the resin distributes the force through the fabric, thus enhancing the adhesion. Although the amount of resin used to fix the wood pieces together and the surface roughness are also parameters that could influence the adherence and needs to be more careful analyzed.

4. Conclusion

An alternative composite made of polyester geotextile fibers and castor-oil polyurethane resin for coating wood structures was presented. The coating layer was applied on two different wood species, *Dinizia excelsa Ducke* and *Pinus taeda*, from managed and reforested areas, respectively, for a comparison. Static bending tests were performed in accordance with ABNT NBR 7190 – Appendix B⁸ to determine the rupture and elasticity moduli of coated samples. Results indicated that by coating the samples with softer layers reduces the elastic modulus and increases the rupture modulus, allowing the samples to withstand larger deformation before breaking. Electrical measurements of volume and surface resistivity of coated samples were also performed and revealed that these properties were substantially enhanced when compared to the uncoated samples, providing much better insulation. Measurements of the composite permittivity and tan δ indicated good agreement with well accept models and were applied on the observed electrical behaviors explanation. Still regarding electrical measurements, a significant improvement was obtained on the dielectric breakdown strength of coated samples, which was enhanced by at least 1.2 kV/mm on samples coated with a single resin layer and by a factor of three on samples coated with resin and geotextile. On water absorption tests a dependence on the wood fiber structure was observed, although the extra coating layer proved to be very much efficient in reducing the percentage of absorbed water, from 62.8% to 0.7% in the case of *Pinus taeda* samples and from 32.3% to 0.6% on *Dinizia excelsa Ducke* samples. Another significant improvement promoted by the coating layer with resin and geotextile fiber was concerning the adherence between wood and coating. On the performed test, the bonding between two wood pieces was more

Figure 11. SEM images from a) *Pinus taeda* and b) *Dinizia excelsa Ducke* samples.

Nevertheless, a drastic reduction in the percentage of absorbed water is observed on both coated samples (R and RG). On samples coated only with resin a percentage of approximately 4% was found while for the geotextile coated samples the absorption was 0.6%, indicating that the coating provides strong impermeability.

efficient when resin and geotextile fiber were used as the adhesive element rather than when only resin was applied. Nevertheless, the aim of the proposed coating was to reduce damages caused during transportation and handling of the wood pieces, therefore a pin-on-disk test was performed and from the track deepness and appearance became clear that the samples coated only with resin suffer a much larger damage than samples coated with the geotextile and resin layer. To summarize, the proposed alternative coating proved to be very efficient in improving the mechanical and electrical properties of wood structured from managed and

reforested areas and also in protecting the material against external agents, such as humidity.

Acknowledgments

Authors would like to thanks Prof. Dra. Elisabete Frollini and Prof. Dr. Luiz Carlos Casteletti for providing laboratory facilities. And many thanks to Sergio Aparecido Trevelin from the (LCC/EESC/USP) and Jaime Galindo (LaMEM/EESC/USP), for their assistance with the mechanical characterizations.

References

1. Darveniza M, Limbourn GJ and Prentice SA. Line design and electrical properties of wood. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 1967; (11):1344-1356.
2. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. *NBR 8458*: Wood crossheads for electric energy distribution networks. Rio de Janeiro: ABNT; 1984. 13 p.
3. Liebel SA and Mueller RE. Douglas fir crossarms: solid sawn vs. laminated comparison. In: *Proceedings of the Transmission and Distribution Conference*; 1994; Chicago. IEEE Press; 1994. p. 581-586. <http://dx.doi.org/10.1109/TDC.1994.328427>
4. Asboll E. Laminated wood structures in Norwegian transmission lines. In: *Proceedings of the International Conference on Overhead Line Design and Construction*: Theory and Practice; 1988; London. IEEE Press; 1988. p. 36-39.
5. Trevisan H, Tieppo FMM, Carvalho AG and Lelis RCC. Evaluation of physical and mechanical properties of wood from five species as a function of deterioration in two environments. *Revista Árvore*. 2007; 31(1):93-101.
6. Andrady AL, Hamid SH, Hu X and Torikai A. Effects of increased solar ultraviolet radiation on materials. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 1998; (46):96-103. [http://dx.doi.org/10.1016/S1011-1344\(98\)00188-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1011-1344(98)00188-2)
7. Altafim RAC, Silva JPR, Gonzaga DP, Ribeiro C, Godoy J, Basso HC et al. Wood cross-arms coated with polyurethane resin-tests and numerical simulations. *Materials Research*. 2006; 9(1):77-81. <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392006000100015>
8. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. *NBR 7190*: Design of wooden structures. Rio de Janeiro: ABNT; 1997. 107 p.
9. American Society for Testing and Materials – ASTM. *G99*: Standard Test Method for Wear Testing with Pin-on-Disk Apparatus. ASTM; 2010.
10. Ross PM. Burning of Wood Structures by Leakage Currents. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*. 1947; 66(1):279-287. <http://dx.doi.org/10.1109/T-AIEE.1947.5059441>
11. American Society for Testing and Materials – ASTM. *D257*: Standard Test Methods for DC Resistance or Conductance of Insulating Materials. ASTM; 2007.
12. American Society for Testing and Materials – ASTM. *D149*: Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials at Commercial Power Frequencies. ASTM; 2009.
13. American Society for Testing and Materials – ASTM. *D150*: Standard Test Methods for AC Loss Characteristics and Permittivity (Dielectric Constant) of Solid Electrical Insulation. ASTM; 2004.
14. International Electrotechnical Commission – IEC. *60068-2-38 - Environmental testing - Part 2 - 38 – Test Z/AD: Composite temperature/ humidity cyclic test*. Switzerland, 1974.
15. Altafim RAC, Woschitz R, Ribeiro C, Muhr M, Silva JFR, Calil Junior C et al. Prototypes of polymer-impregnated reforested wood crossarms subjected to partial discharge tests. In: *Proceedings Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo*, 2005, Indianapolis. Indianapolis, 2005. v. 1, p. 225-228.
16. Almeida AEFS and Ferreira OP. Poliuretana Derivada de Óleos Vegetais Exposta ao Intemperismo Artificial. *Polímeros*. 2006; 16(3):252-256. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-14282006000300017>
17. American Society for Testing and Materials – ASTM. *D570*: Standard Test Method for Water Absorption of Plastics. ASTM; 2010.
18. Cho K-H and Kim Y. Elastic modulus measurement of multilayer metallic thin films. *Journal of Material Research*. 1999; 14(5):1996-2001. <http://dx.doi.org/10.1557/JMR.1999.0269>
19. US Forest Service Research Note. *FPL-059 Bending Strength and Stiffness of Plywood*. Forest Products Laboratory; 1974. p. 9.
20. Dang Z-M, Yuan J-K, Zha J-W, Zhou T, Li S-T and Hu G-H. Fundamentals, process and applications of high-permittivity polymer-matrix composites. *Progress in Material Science*. 2012; 57:660-723. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2011.08.001>
21. Silva DAL, Rocco Lahr FA, Faria OB and Chahud E. Influence of wood moisture content on modulus of elasticity on compression parallel. *Materials Research*. 2012; 15(2):300-304. <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392012005000025>
22. Gerhard CC. Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of Wood: an analysis of immediate effects. *Wood and Fiber*. 1982; 14(1):4-36.

Cross-arms Identification with Adaptive Digital Image Processing

José F. R. da Silva
Engineering School
University of São Paulo
São Carlos, S.P., Brazil

Ruy A. C. Altafim
Engineering School
University of São Paulo
São Carlos, S.P., Brazil

André R. Hirakawa
Politécnica School
University of São Paulo
São Paulo, Brazil

ABSTRACT

This paper presents an adaptive digital image processing algorithm to improve the identification and classification process of wood cross-arms in the context of automated image inspection robot for distribution power lines. Processing of images that come from outdoor environment is a very difficult task due to the interference of variation of lightning conditions, especially over non uniform objects like wood cross-arms. Usual approaches take advantage of threshold and reference variation in accordance to the best condition to extract desired image object. The proposed adaptive algorithm is based on the Adaptive Digitized Straight Line Segments (ADSLS) that sum up the capability of dynamic change of image segmentation process like binarization and contour extraction. Proposed algorithm was tested on the identification and classification of different type of wood cross-arm with polyurethane protective treatment and results shown improvement in the image segmentation process.

Keywords

Adaptive Digital Image Processing, ADSLS

1. INTRODUCTION

The electric power system is complex and can be viewed as composed by many subsystems. Power distribution lines (also called primary distribution system) are an important part of such system, which comprises the delivery of electricity from distribution substations to distribution transformers and to final consumers. Auxiliary elements, such as the cross-arms, which compose overhead primary power distribution lines, suffer damage due to high exposition to environmental factors such as vegetation and severe weather conditions [1]. Also, high currents contribute to damage in a long term. When the auxiliary elements do not work as required, it may cause several problems, e.g. poor electricity quality, and at in the worst case, the interruption. It is well known that power outages can cause more economical losses than any other causes [2] due to the high dependence of electrical energy by our society. The problems related to power outages and the rising pressure from final consumers and regulatory agencies led the distribution utility companies to raise investments to solve the problems.

To minimize such problems and assure the reliability of electric energy, the inspection of power line elements is an important task. The current inspection methods used by distribution companies can be classified into two categories: visual and by contact. In such scenario, an automated visual inspection robot was proposed by [3], which include improvements related works such as robot movement over the power line, such as in loco visual inspection and autonomous guidance. The main task of the robot is to inspect the cross-

arms, in order to verify its servicing state. Actual inspection system is composed by a High Definition (1080 x 1920 pixel) CCD camera, that capture images from the power line, and a embedded image processing system with an ARM A-7 core that runs the image processing algorithm. A sample of distribution power line captured image is shown in Figure 1. The image, took at University test bed premise, shows the cross-arm, wire and other electric devices in the middle.

Figure 1 - Sample image captured from inspection robot camera

The main difficult in the image-processing algorithm is the variation of cross-arms composition, affecting the performance of computer visual inspection.

The increasingly high cost of native wood and new environmental laws have contributed to the emergence of alternative materials for the production of mechanical supports for transmission and distribution lines [4]. Norway, for example, has been using laminated woods for over twenty years, first for cross-arms in distribution lines and later for all 66 kV and 134 kV transmission line structures [5]. In the early 1990's, in the US, Union Electric (U.E.) also evaluated alternatives for solid wood products, whose prices have increased steadily over the last decade, particularly those of cross-arms. U.E. has found that laminated wood cross-arms can offer an economically feasible alternative at a cost equal to or lower than solid sawn cross-arms [6]. In this context, although laminated wood is an alternative material for Brazil, reforested *Eucalyptus citriodora*, which satisfy the strength, electrical and thermal requirements for solid sawn cross-arms [7], are also economically suitable, if it receives special protective surface treatment against fungi and microorganisms [8].

Given the different aspects of the aforementioned cross-arms, this paper presents an adaptive digital image-processing algorithm to allow inspection of cross-arms with identification of two kinds: reforested *Eucalyptus citriodora* without

superficial treatment; and reforested *Eucalyptus citriodora* with a polyurethane protective treatment [8]. In the identification process, the algorithm defines a region of interest using techniques of preprocessing and image segmentation. The technique choice depends on the image conditions (brightness, contrast, shape and size), as well as on the cross-arms visual characteristics.

The paper is organized as follows. Section II discusses adaptive digital image processing and elucidates the proposed approach. Section III presents the algorithm results and discusses them. Finally, section IV concludes the work and provides insights of future research directions.

2. ADAPTIVE DIGITAL IMAGE PROCESSING

The usual algorithm for image processing includes steps herein adopted that follows the same principles of [9], which are represented in Figure 2. [9] presented an alternative to the traditional classification of internal defects of Baumann samples, making use of digital image processing. The authors removed noises with a threshold technique and segmented the resulting image to identify a common internal defect with a linear pattern.

Figure 2 - General image processing steps.

In the Figure 2, the image acquisition phase receives the original image, acquired by devices such as cameras and stored in a database.

The image preprocessing has the purpose of improving the image quality. In this phase, image filters can be applied to reduce the image noise or to highlight object edges and contours.

The purpose of the image segmentation phase is to separate the image in different parts. This way, the object, or region, of interest, is extracted from the original image, to be, then, used in the recognition step.

Concerning image segmentation and object recognition, [10] presented a technique to identify moving objects in videos and, thereby, propose a new video compression algorithm. The authors achieved the desired results segmenting the images in blocks and conducting modular analyses to verify the blocks for moving objects. The same principle can be adopted in the herein studied case, in order to identify the cross-arms or to search it for undesirable fungi and microorganisms.

With the purpose of better identifying borders and, thus, segmenting the image or recognizing objects, [11] proposed an adaptive finite automaton to represent digitized line segments. In the digitalization process, it is inevitable that continuous line segments in Euclidean space be affected by distortion or corruption by noise generating digital line segments in string format with imperfections. Therefore, the adaptive finite automaton based algorithm is suitable to

represent digitalized images, that includes errors, and also can help to identify line segments and object borders even in case of noise presence.

Another method of representing digital lines is based on continued fractions, studied by [12]. This mathematical approach provides appropriate models to evaluate errors and approximations in the digitalization process. After the work of [12], continued fractions have been researched, with several developments as described in [13].

Two main models were proposed to describe the pattern arrangement of Digital Straight Line Segments (DSLs) symbols. Taking into consideration the slope SL as the tangent of an Euclidean segment lying in the first octant, the models are given by the continued fraction of Expression 1.

$$SL = \frac{B}{A} = \frac{1}{P \pm \frac{1}{M \pm \frac{1}{K \pm \dots}}} \quad (1)$$

where the positive and negative signs are chosen to accelerate the convergence of the fraction and reducing the number of terms (indicative of the order of the model). Additionally, A, B (B H A), and P are positive integers, while M, K, ... are not negative integer.

The model was denominated with first-order because slope SL was a first-order continued fraction. In the first-order model, the line segment traverses B rows and A columns with the slope $SL = B/A = 1/P$; where P, the first-order slope factor, is an integer. It means that A pixels of the line segment are uniformly distributed in B rows with $P = A/B$ pixels in each row. For the first-order model, strings of DSLs are given by Expression 2 and shown by Fig. 4.

$$S_U: b^m a; m \geq 1 \quad (2)$$

Figure 3 - First order model, characterized by constant P factor

In the second model, slope SL is a second order fraction $SL = B/A = 1/[P \pm (1/M)]$; and P is the nearest integer of A/B : $P = [A/B]$. This means that pixels are adjusted in each DSLs by placing P pixels in each of (M - 1) rows, with Q pixels in the remaining row; where Q can have only one of following two possibilities: $Q = (P+1)$ or $Q = (P-1)$. That is, the adjustment is made by decreasing P of a unit, or by increasing P of a unit. The row-by-row run-length representation of the line segment in the second order model can be expressed as $PQP...Q..$ shown in Figure 4.

Figure 4 - Second order model, characterized by variation of P factor

In the second order model, strings of each DSLS may be of two types, as shown by Expression 3.

$$S_U: \begin{cases} b^m a; \text{ or;} \\ b^{m+1} a; m \geq 1 \text{ ou } b^{m-1} a; m \geq 2 \end{cases} \quad (3)$$

In the second model, the main orientation angle, the one that stands out in the distribution of local angles related to the DSLS, is given by $\theta_s = \arctan(1/P)$ with slope $1/P$. However, DSLS occur with inclination $1/Q$ as spaced as possible. Thus, the orientation angle $\emptyset$ with the positive axis x of the continuous line that led to the codification will be in the range: $\emptyset \in [\arctan(1/(P+1)), \arctan(1/P)]$ (assuming $Q = P+1$) [14].

Essentially, angle errors of DSLS have a local behavior, as compared to the length analysis, which is more global, with a greater level of information regarding shapes. A digital arc S is understood as a set of interconnected pixels belonging to a digital image, positioned on a grid such that “each point of the set has exactly two neighbors, except two of these points, known as extremes, which have only one neighbor in S ” [15]. Estimation of the length of digital segments is difficult and there being many length estimators [16]. As an introduction to this subject, [17] proposed the length of a segment codified by string: $S = s_1..s_i..s_n$ is given by Expression 4.

$$l_F = (v + h) + s(2)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

With v , h and s as representatives of the number of vertical, horizontal and diagonal primitives in S , respectively. The mentioned length can only be approximated, requiring some correction factor ψ to adjust l_F equally to Expression 5.

$$l_E \approx \psi \times l_F \quad (5)$$

where l_E is the estimated length of S , after applying the correction factor.

Even an irregular arc may reveal itself as digitized straight-line segment, provided that it is reviewed in a compatible scale, using metrics. Thereby, adaptability can be an alternative to incorporate the fundamentals of arithmetic discrete geometry to the model of Freeman [17] and ensuring better results in image processing.

3. PROPOSED ALGORITHM, RESULTS AND DISCUSSION

The proposed adaptive cross-arms identification process was implemented using the OpenCV library for computer vision applications, with the programming language C++. The adaptive algorithm was included in the final phases of the original image processing algorithm implemented for the inspection robot.

Figure 5 shows sample of wood cross-arm segments with different level of polyurethane protective treatment that were

used for testing proposed algorithm. In the figure, it can be seem the color difference between treatments and the influence of the wood texture in the reflected lighting.

Figure 5 - Original image of wood cross-arm segments.

In Figure 6, the original image was converted to grayscale in order to facilitate the image processing, because it has only one color channel.

Figure 6 - Grayscale image of wood cross-arm segments.

Figure 7 shows the blur filter application, which remove noises from the image. The Gaussian Blur uses a Gaussian function, represented by Equation 6, in a convolution process.

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

In the equation, x is the distance of the horizontal axis, y is the distance of the vertical axis, and σ is the standard deviation of the Gaussian distribution.

Figure 7 - Image with Blur Gaussian processing.

Figure 8 shows the binarization process result of Figure 7, whose purpose is to find the contours region of interest. The threshold function, represented by Equation 7, is used to obtain a binary image that extracts the region of interest from a grayscale image.

$$dst(x, y) \begin{cases} maxVal & \text{if } src(x, y) > thresh \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

In the equation, dst is the output image, src is the input image, $thresh$ is the threshold and $maxval$ is the maximum value of the threshold.

Figure 8 - Controlled binarization process for extraction of the region of interest

Next phase uses the Canny function that makes a sequence of processing phases to detect borders: 1) Noise reduction with a Gaussian filter; 2) Intensity gradient and direction determination with the equations 8 and 9. 3) Irrelevant pixels removal; 4) Hysteresis, the Canny function uses the upper and lower limits to establish a rule.

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (8)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right); \quad (9)$$

Figure 9 shows the contours found by the application of the original Canny function on the binarized image. In the figure, it can be seen that threshold and contour configuration in the Canny function can result in poor segmentation process with extraction of several region of interest.

Figure 9 – Extraction of region of interest with original Canny

The proposed extraction algorithm includes de second order DSLS with adaptive function depending of pixel intensity and desired segment length. If the intensity gradient of a pixel is higher than the upper limit, it is defined as border, whereas if the intensity gradient of a pixel is lower than the lower limit, it is discarded. If the intensity gradient of a pixel is between the limits, the pixel is defined as border with the condition of being connected to a pixel whose gradient is above the upper limit.

Figure 10 shows the results of segmentation/extraction process using the proposed algorithm.

Figure 10 – Contour extraction with proposed algorithm

Figure 11 shows the binarized mask used to recover the original image with the highlighted region of interest.

Figure 11 – Digital mask used to obtain the region of interest

Figure 12 – Image with final result of adaptive segmentation/extraction process

Applying the mask shown in Figure 11 to the original image, it can be obtained the extraction of the region of interest, in this case, the wood cross-arm segment without polyurethane protective treatment, as shown in Figure 12.

If other cross-arm with polyurethane protective treatment must be identified, the inverse mask is applied, as shown in Figure 13.

Figure 13 – Sample image of identification of other region of interest

4. CONCLUSION

This work proposed a novel adaptive image processing algorithm to improve the identification and classification of objects in images with texture and lightning conditions variation. The algorithm was tested for identification of wood cross-arms types in the context of automated image inspection robot for distribution power lines. The original algorithm, before using the proposed algorithm, resulted in classification performance around 20%. The proposed algorithm was implemented in segmentation and contour extraction phases of image processing and test results shown that the classification rate was improved up to 70% of cases. Next step for conducting this work is to change the ADSLS used as basis of contour segment representation to improve the classification rate. In the ADSLS, each segment length and the number of segments used can be modified in accordance to the characteristics of the digital object to be found. The big challenge is to find a set of ADSLSs suitable to different kind of objects encountered in actual outdoor scenario.

5. ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful by the support provided from ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) and Elektro (Electricity and Services Company) towards the development of this work. Also, authors are grateful with the collaboration of Msc. Guilherme Barros Castro and Msc. Danilo de Souza Miguel.

6. REFERENCES

- [1] Brown, RE. *Electric Power Distribution Reliability*. New York: Marcel Dekker, 2002.
- [2] Short, TA. *Electric Power Distribution Handbook*. Florida: CRC Press, 2004.
- [3] Pavani, RA., Scaff, W., Miguel, DS., Matsumura, CT., Hirakawa, AR., Horikawa, O., Silva, JFR. Double conical wheels based mobile robot for aerial power distribution lines inspection. In *Proceedings of the 3rd*

International Conference on Applied Robotics for the Power Industry (CARPI), pp. 1-6, 2014.

- [4] Silva, JFR. *Relatório Técnico sobre vida útil de cruzetas em sistemas de Distribuição de Energia*. Campinas, Brasil: Eletricidade e Serviços S.A (ELEKTRO), 2001; (in Portuguese).
- [5] Asböll, E. Laminated wood structures in Norwegian Transmission Lines. *Proceedings of the International Conference on Overhead Line Design and Construction: Theory and Practice*, 1998.
- [6] Liebel SA. and Mueller RE. Douglas Fir Cross-arms Solid Sawn vs. Laminated Comparison, *Transmission and Distribution Conference, Proceedings of the IEEE Power Engineering Society*, 1994.
- [7] BRAZILIAN STANDARD. NBR 7190, on Project of Wood Structures, 1997.
- [8] Altafim, RAC., Silva, JFR., Gonzaga, DP., Ribeiro, C., Godoy, J., Basso, HC., Bueno, B., Calil Júnior, C., Sartori, JC., Altafim, RAP., Silveira, A. Wood Cross-arms Coated with Polyurethane Resin – Tests and Numerical Simulations. *Materials Research*, Vol. 9, No. 1, pp. 77-81, 2006.
- [9] Queiroz, LCL., Hirakawa, AR. Classification of Baumann samples through digital image processing. *Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração*, Vol. 10, No. 2, pp. 183-189, 2013.
- [10] Hirakawa, AR., Amancio, SM., Saraiva, AM., Cugnasca, CE., Correia, PL. ViBee - Video segmentation applied to reduce video bitrates in bee weblabs. *Exacta*, Vol. 7, No. 1, pp. 99-107, 2009.
- [11] Barros Neto, LC., Hirakawa, AR., Massola, AMA. Adaptive Modeling of Digital Straightness Applied to Geometric Representation Enhancement. *International Journal of Computer Applications*, Vol. 10, No. 2, pp. 31-39, 2010.
- [12] Brons, R. Linguistic methods for the description of a straight line on a grid. *Computer Graphics and Image Processing*, Vol. 3, No. 1, pp.48-62, 1974.
- [13] Klette, RA. and Rosenfeld, AB. Digital straightness – a review. *Discrete Applied Mathematics*, Vol. 139, No. 1-3, pp. 197-230, 2004.
- [14] Kiryati, N. and Kübler, O. Chain code probabilities and optimal length estimators for digitized three- dimensional curves. *Pattern Recognition*, Vol. 28, No. 3, pp. 361-372, 1995.
- [15] Rosenfeld, A. Digital straight line segments. *IEEE Transactions on Computers*, Vol. 23, No. 12, pp. 1264-1269, 1974.
- [16] Dorst, L. and Smeulders, AWM. Discrete straight line segments: Parameters, primitives and properties. *Vision Geometry, series Contemporary Mathematics*, American Mathematical Society, Vol.119, pp. 45-62, 1991.
- [17] Freeman, H. Boundary encoding and processing. *Picture Proceedings and Psychopictorics*, pp. 241-266, 1970.

ANEXO C

PEDIDO DE PATENTE

Espaço para Etiqueta

DEPÓSITO DE PEDIDO DE PATENTE OU DE CERTIFICADO DE ADIÇÃO

Ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial:

O requerente solicita a concessão de um privilégio na natureza e nas condições abaixo indicadas:

1. Depositante (71):

- 1.1 Nome: ELEKTRO ELETRICIDADE E SERVIÇOS S/A
- 1.2 Qualificação: Empresa brasileira
- 1.3 CNPJ/CPF: 02328280000197
- 1.4 Endereço Completo: Rua Ary Antenor de Souza, 321 - Jd. Nova América - Campinas - SP - BR CEP: 13053-024
- 1.5 CEP: 13053024 1.6 Telefone: 1.7 Fax:
- 1.8 E-mail:

☒ continua em folha anexa

2. Natureza: ☒ Invenção ☐ Modelo de Utilidade ☐ Certificado de Adição

Escreva, obrigatoriamente e por extenso, a Natureza desejada: PRIVILÉGIO DE INVENÇÃO

3. Título da Invenção, Modelo de Utilidade ou Certificado de Adição (54):

"ELEMENTO DE SUSTENTAÇÃO PARA REDES AÉREAS DE DISTRIBUIÇÃO"

☐ continua em folha anexa

4. Pedido de Divisão: do pedido nº Data do Depósito:

5. Prioridade: ☐ interna ☐ unionista

O depositante reivindica a(s) seguinte(s):

País ou organização de origem	Número do depósito	Data do depósito

6. Inventor (72):

☐ Assinale aqui se o(s) mesmo(s) requer(em) a não divulgação de seu(s) nome(s)

- 6.1 Nome: José Francisco Resende da Silva
- 6.2 Qualificação: Cidadão, brasileiro, casado, engenheiro eletricista, RG 13.665.995 6.3 CPF:
- 6.4 Endereço completo: Rua Robison Gebara Altero, 73, Indaiatuba, SP.
- 6.5 CEP: 6.6 Telefone: 6.7 Fax:
- 6.8 E-mail:

☒ continua em folha anexa

7. Declaração na forma do item 3.2 do Ato Normativo nº 127/97:

- ☐ 7.1 Declaro que os dados fornecidos no presente formulário são idênticos ao da certidão de depósito ou documento equivalente do pedido cuja prioridade está sendo reivindicada.

☐ em anexo

8. Declaração de divulgação anterior não prejudicial (Período de graça):
(art. 12 da LPI e item 2 do Ato Normativo nº 127/97):

☐ em anexo

9. Procurador (74):

- 9.1 Nome: PINHEIRO NETO ADVOGADOS
9.2 CNPJ/CPF: 60.613.478/0001-19 9.3 API/OAB: 916/147.702
9.4 Endereço completo: RUA HUNGRIA, 1.100 SÃO PAULO SP
9.5 CEP: 01455-906 9.6 Telefone: (55 11) 3247-8686 9.7 Fax: 55 11 32478600
9.8 E-mail:

10. Listagem de sequências Biológicas (documentos anexados) (se houver):

- ☐ Listagem de sequências em arquivo eletrônico: nº de CDs ou DVDs (original e cópia).
☐ Código de controle alfanumérico no formato de código de barras: fl.
☐ Listagem de sequências em formato impresso: fls.
☐ Declaração de acordo com o artigo da Resolução INPI nº 228/09: fls.

11. Documentos anexados (assinale e indique também o número de folhas):
(Deverá ser indicado o nº total de somente umas das vias de cada documento)

☒	11.1 Guia de Recolhimento	<input type="text" value="1"/> fls.	☒	11.5 Relatório Descritivo	<input type="text" value="9"/> fls.
☒	11.2 Procuração	<input type="text" value="2"/> fls.	☒	11.6 Reivindicações	<input type="text" value="2"/> fls.
☐	11.3 Documentos de Prioridade	<input type="text"/> fls.	☒	11.7 Desenhos	<input type="text" value="4"/> fls.
☐	11.4 Doc. de Contrato de Trabalho	<input type="text"/> fls.	☒	11.8 Resumo	<input type="text" value="1"/> fls.
☒	11.9 Outros (Especificar): Cessão de inventores.				<input type="text" value="6"/> fls.

12. Total de folhas anexadas (referentes ao campos 10 e 11): 25 fls.

13. Declaro, sob penas da Lei, que todas as informações acima prestadas são completas e verdadeiras

SP, 26 de novembro de 2010

Local e Data

PINHEIRO NETO ADVOGADOS
API 916
ANDRÉ ZONARO GIACCHETTA
OAB/SP nº 147.702

Depositantes

Nome: **UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

Qualificação: **Entidade brasileira**

CGC/CPF (se houver): **63025530000104**

Endereço Completo: **Rua da Reitoria, 109/374 Cidade Universitária - Butantã - SP - BR - CEP 05508-900**

Telefone:

FAX:

Inventores

Nome: **Yuri Andrey Olivato Assagra**

Qualificação: **Cidadão brasileiro, solteiro, estudante, RG 29.064.431-8**

Endereço: **Rua Aldino Del Nero, 277, complemento 3, Pq. Arnold Schmid, São Carlos, SP.**

CEP: **Rua Aldino Del Nero, 277, complemento 3, Pq** Telefone:

Nome: **Ruy Alberto Pisani Altafim**

Qualificação: **Cidadão brasileiro, casado, estudante, RG 29.322.059-1**

Endereço: **Rua Vitorio Giometti, 620, Apto. 12, bl. 2, Nova Sta. Paula, São Carlos**

CEP: **Rua Vitorio Giometti, 620, Apto. 12, bl. 2, Nova** Telefone:

Nome: **Ruy Alberto Corrêa Altafim**

Qualificação: **Cidadão brasileiro, casado, professor universitário, RG 8.491.610**

Endereço: **Rua Lions Club, 720, Pq. dos Bandeirantes, Ribeirão Preto, SP.**

CEP: **Rua Lions Club, 720, Pq. dos Bandeirantes, Ri** Telefone:

Nome: **Heitor Cury Basso**

Qualificação: **Cidadão brasileiro, casado, professor universitário, RG 7.658.890**

Endereço: **Rua Oscar de Souza Geribello, 148, São Carlos**

CEP: **Rua Oscar de Souza Geribello, 148, São Carlo** Telefone:

Nome: **Francisco Antonio Rocco Lahr**

Qualificação: **Cidadão brasileiro, casado, professor universitário, RG 5.444.402-0**

Endereço: **Rua Padre Teixeira, 1348, Jd. Bethânia, São Carlos**

CEP: **Rua Padre Teixeira, 1348, Jd. Bethânia, São C** Telefone:

1191.262867

BANCO DO BRASIL		001-9		RECIBO DO SACADO	
<i>Local de Pagamento</i> Pagável em qualquer Banco					<i>Vencimento</i> Contra-apresentação
<i>Cedente</i> INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial					<i>Agência/Código Cedente</i> 2234-9/333.028-1
<i>Data do Documento</i> 25/11/2010	<i>Nº. documento</i> 1009627680	<i>Espécie doc.</i> RC	<i>Acetate</i> N	<i>Data Proces.</i> 25/11/2010	<i>Nosso Número</i> 00.000.2.2.10.0962768.0
<i>Uso Banco</i>	<i>Carteira</i> 18/027	<i>Espécie</i> R\$	<i>Quantidade</i>	<i>Valor</i>	<i>(=) Valor Documento</i> R\$ 200,00
<i>Processo:</i> NN Complementar: <i>Natureza:</i> Patente de Invenção (PI).					<i>(-) Desconto/Abatimento</i>
<i>Peticionamento:</i> Papel					<i>(-) Outras deduções</i>
<i>Cod</i> Serviço <i>RPI Valor</i> R\$ 200,00					<i>(+) Mora/Multa</i>
200 - Depósito de pedido Nacional de Invenção (PI), Certificado de Adição de Invenção (C) ou Modelo de Utilidade (MU) e Entrada na Fase Nacional de PCT					<i>(+) Outras Acréscimos</i>
<i>API:</i> API: 916 <i>Escritório:</i> Pinheiro Neto Advogados					<i>(=) Valor Cobrado</i> R\$ 200,00
Governo Federal - Guia de Recolhimento da União. GRU - Cobrança
<i>Sacado</i> ELEKTRO-ELETRICIDADE E SERVICOS S.A.					
<i>Rua Ary Antenor de Souza 321, Jardim Nova América, Campinas SP, Campinas, BR/SP, 13053-024</i>					
<i>Sacador/Avalista</i> REAL0004 008 25112010 0187 200,00R 20/55					
<i>Corte na linha pontilhada</i>					<i>Autenticação mecânica - Controle Cedente</i>