Yuri Andrey Olivato Assagra

**Estudos mecânicos e elétricos em madeiras envoltas
com manta geossintética e impregnadas com resina
poliuretana**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Engenharia Elétrica

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência
Orientador: Prof. Dr. Ruy Alberto Corrêa Altafim

São Carlos
2011

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

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

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

A844e Assagra, Yuri Andrey Olivato
 Estudos mecânicos e elétricos em madeiras envoltas com
 manta geossintética e impregnadas com resina poliuretana
 / Yuri Andrey Olivato Assagra ; orientador Ruy Alberto
 Corrêa Altafim. -- São Carlos, 2011.

 Dissertação (Mestrado-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, 2011.

 1. Madeira. 2. Resina poliuretana derivada do óleo de
 mamona. 3. Geotêxtil. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): Engenheiro YURI ANDREY OLIVATO ASSAGRA.

Dissertação defendida e julgada em 31/03/2011 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Titular **RUY ALBERTO CORRÊA ALTAFIM** – (Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) Aprovado

Prof. Titular **FRANCISCO ANTONIO ROCCO LAHR**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) Aprovado

Profª. Drª. **CACILDA DE JESUS RIBEIRO**
(Universidade Federal de Goiás/UFG) Aprovado

Prof. Titular **DENIS VINÍCIUS COURY**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica

Prof. Associado **PAULO CÉSAR LIMA SEGANTINE**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

Dedicatória

Este trabalho é dedicado aos meus pais, Washington Luiz Assagra e Thais Helena Olivato Assagra, e a minha avó, Maria Olanyra Pansani Olivato, pelo esforço e apoio durante toda a minha vida.

Agradecimentos

Primeiro eu gostaria de agradecer à Deus, pois sem Ele nada disso estaria acontecendo em minha vida.

Ao Professor Titular Ruy Alberto Corrêa Altafim, pela orientação fornecida durante a elaboração deste trabalho.

Aos Laboratórios de Madeiras e de Estruturas de Madeiras (LAMEM) e Laboratório de Construção Civil (LCC) do Departamento de Engenharia de Estruturas (SET) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP), pela colaboração durante todo o período de pesquisa. Em especial, aos professores Francisco Antônio Rocco Lahr e Osny Pellegrino Ferreira, pela atenção e apoio dedicado e aos técnicos Samuel, Silvio, Arnaldo, Cido e Sérgio pelo suporte e paciência.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeiçoamento Industrial (FIPAI), pelo apoio financeiro.

Ao Grupo de Alta Tensão e Medidas (GATM), aos professores, colegas, em especial ao Dr. Ruy Alberto Pisani Altafim, que não mediu esforços para auxiliar neste trabalho e aos funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da EESC/USP.

À Universidade de São Paulo (Escola de Engenharia de São Carlos - Departamento de Engenharia Elétrica), pela oportunidade de realização do Mestrado.

Aos amigos Samuel Lourenço Nogueira, Ricardo Augusto Souza Fernandes e Rafael Torres Maia, pelos momentos de descontração durante o período de convivência.

Epígrafe

“A sabedoria da natureza é tal que não produz nada de supérfluo ou inútil”

Nicolau Copérnico

Resumo

ASSAGRA, Y. A. O. Estudos mecânicos e elétricos em madeiras envoltas com manta geossintética e impregnadas com resina poliuretana. 2011. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

Nas redes de distribuição de energia, as cruzetas sofrem uma exposição direta a intempéries, particularmente à ação da umidade, o que acelera seu processo de degradação. A higroscopicidade da madeira facilita a absorção de água, com significativa perda de suas características mecânicas e elétricas. Para minorar os problemas relacionados a absorção de umidade foi desenvolvido um novo processo de revestimento e impregnação da madeira e, neste trabalho, é apresentada uma investigação das características mecânicas e elétricas desse novo compósito. Para tanto, ensaios mecânicos de flexão estática foram executados em três materiais: na madeira em estado natural (sem tratamento), na madeira resinada e no novo compósito; e, com intuito de estudar as características elétricas, ensaios de resistividade superficial e volumétrica foram realizados em amostras secas e molhadas. Também fez parte deste estudo o desenvolvimento de uma prensa mecânica para duas toneladas, cujo programa computacional pode ser facilmente adaptado para outras cargas.

Palavras-Chave: madeira, resina poliuretana derivada do óleo de mamona, geotêxtil

Abstract

ASSAGRA, Y. A. O. Mechanical and electrical analysis of wood wrapped in geosynthetic blanket impregnated with polyurethane resin. 2011. Master's thesis - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

In the electrical distribution system, the crossarms suffer direct exposure to weather conditions, especially humidity, which can accelerate the degradation process. The hygroscopicity of wood facilitates the absorption of water, with significant loss of its mechanical and electrical characteristics. To reduce the problems listed above; we develop a new process of coating and impregnation of wood. Thus, we present in this work several studies on mechanical and electrical properties of these new composite. With this in mind, bending mechanical tests were performed in three materials: wood in natural state (no treatment), resin-impregnated wood also on the new composite. In addition, to study the electrical characteristics, tests of surface and volume resistivity were carried out in dry and wet samples. Furthermore, a two-ton mechanical press (whose computer program can be easily adapted for other tonnages) development was part of this work.

Keywords: wood, polyurethane resin derived from castor oil, geotextile

Lista de Figuras

2.1	Resistência sob alta temperatura.	31
2.2	Caracterização dos principais produtos de madeira	33
2.3	Corte transversal de um tronco de madeira de pinheiro e de carvalho mostrando as distintas formações.	34
2.4	Flexão na madeira.	37
2.5	Força de compressão aplicada: (A) paralela às fibras; (B) perpendicular às fibras.	38
2.6	Tração paralela e perpendicular às fibras.	39
2.7	Cisalhamento vertical, cisalhamento horizontal e cisalhamento <i>rolling</i>	40
2.8	Mudança na resistividade elétrica da madeira em razão da variação do teor de umidade da espécie <i>Salmaal malabarica</i>	41
2.9	Relação da constante dielétrica com a umidade de madeiras do tipo coníferas nas frequências entre 20 e 1.000Hz (densidade= 0,4 - 0,5g/cm ³ , t= 20 - 25°C).	43
2.10	Nó presente em uma peça de madeira.	46
2.11	Torção causada por madeira de reação.	48
2.12	Falha de compressão.	48
2.13	Comparação entre falha em madeira normal (A) e madeira frágil (B).	49
2.14	Estrutura do uretano.	53
2.15	Polimerização da poliuretana.	53
2.16	Estrutura do poliol poliéter.	54
2.17	Estrutura do poliol poliéster.	54

2.18	Estrutura do difenilmetano diisocianato (MDI).	55
2.19	Envelhecimento por HT.	55
2.20	Envelhecimento por UV.	56
2.21	Resistência à tração das amostras de resina poliuretana vegetal.	56
2.22	Alongamento na ruptura das amostras de resina poliuretana vegetal.	56
2.23	Curva carga x deslocamento de cinco fibras a 20°C.	58
2.24	Geotêxtil tecido em tamanho natural.	59
2.25	Geotêxtil tecido com 8x de ampliação (multifilamento)	59
2.26	Geotêxtil tecido com 8x de ampliação (laminete)	59
2.27	Geotêxtil não-tecido.	60
2.28	Geotêxtil não-tecido agulhado com ampliação de 8x.	60
2.29	Geotêxtil não-tecido termoligado com ampliação de 8x.	61
2.30	Geotêxtil não-tecido tricotado	61
2.31	Efeito do pH03 na resistência à tração do PET.	63
2.32	Efeito do pH03 na resistência à tração do PP.	63
2.33	Efeito da água do mar na resistência à tração do PET.	63
2.34	Efeito da água do mar na resistência à tração do PP.	63
2.35	Efeito do pH10 na resistência à tração do PET.	64
2.36	Efeito do pH10 na resistência à tração do PP.	64
2.37	Aplicação de composto sobre geotêxtil.	65
3.1	Modelo cruzeta em escala reduzida.	70
3.2	Pesagem dos elementos pré-polímero e poliol.	71
3.3	Agitador à vácuo.	71
3.4	Processo de fabricação da madeira revestida com geotêxtil e impregnada com resina poliuretana.	72
3.5	Suporte para secagem das amostras.	72

3.6	Corpo-de-prova revestido com manta geotêxtil e resina poliuretana.	72
3.7	Detalhe do corpo-de-prova em corte transversal exibindo a composição em camadas.	72
3.8	Esboço do ensaio de flexão.	73
3.9	Máquina Universal de Ensaio utilizada no ensaio de flexão estática.	73
3.10	Retas dos 6 corpos-de-prova de madeira nua.	74
3.11	Retas dos 6 corpos-de-prova de madeira resinada.	74
3.12	Retas dos 6 corpos-de-prova de madeira revestida com geotêxtil.	74
3.13	Médias das retas dos 6 corpos-de-prova de madeira nua, 6 de madeira resinada e 6 de madeira revestida com geotêxtil.	75
3.14	Diagrama carga x flecha na flexão.	76
3.15	Modelo do corpo-de-prova em estado natural.	78
3.16	Molde para a fabricação da madeira revestida com geotêxtil.	78
3.17	Vista dos três objetos utilizados na produção.	79
3.18	Amostra totalmente lacrada entre os moldes.	79
3.19	Corpos-de-prova após atingirem o tempo total de cura: (A) Madeira em estado natural; (B) Madeira Resinada; (C) Madeira revestida com geotêxtil.	79
3.20	Esquema de configuração representativa dos ensaios de resistividade volumétrica e superficial.	80
3.21	Dispositivos utilizados no ensaio de resistividade volumétrica e superficial.	80
4.1	Estilhaçamento da madeira no momento da ruptura.	92
4.2	Ruptura da madeira sem comprometimento do revestimento.	93
A.1	Sistema completo da prensa elétrica.	102
A.2	Tela do <i>software</i> de aquisição.	103
A.3	Macaco elétrico.	105
A.4	Célula de carga.	105
A.5	Circuito ponte H.	106

A.6	Circuito fonte ajustável.	107
-----	-----------------------------------	-----

Lista de Tabelas

2.1	Materiais Estruturais - dados comparativos.	30
2.2	Resistividade tangencial: valores médios.	42
2.3	Efeito do desvio das fibras nas propriedades de resistência da madeira.	47
2.4	Composição média do óleo de mamona.	50
2.5	Características de diferentes tipos de óleo de mamona.	51
2.6	Resistência química dos compósitos PU-geotêxtil não tecido de PET.	67
2.7	Percentagem de perda ou melhoria na resistência à tração da poliuretana, baseada no óleo de mamona e compósitos PU-geotêxtil não tecido de PET, após envelhecimento em 100 e 200°C.	67
2.8	Propriedades mecânicas da PU, baseada no óleo de mamona e compósitos PU-geotêxtil não tecido de PET.	67
2.9	Mudança percentual na espessura e absorção de água na PU e seus correspondentes compósitos em amostras imersas em água por 24 horas em temperatura ambiente.	67
2.10	Mudança percentual na espessura e absorção de água na PU e seus correspondentes compósitos em amostras imersas na água em ebulição por 2 horas.	68
3.1	Módulo de Ruptura (MOR) das amostras	77
3.2	Módulo de Elasticidade (MOE) das amostras	77
3.3	Resistividade Volumétrica e Superficial nas amostras em estado natural	81
3.4	Resistividade Volumétrica e Superficial nas amostras resinadas	81
3.5	Resistividade Volumétrica e Superficial nas amostras revestidas com geotêxtil	82

3.6	Resistividade Volumétrica e Superficial nas amostras em estado natural após ensaio de absorção	82
3.7	Resistividade Volumétrica e Superficial nas amostras resinadas após ensaio de absorção	83
3.8	Resistividade Volumétrica e Superficial nas amostras revestidas com geotêxtil após ensaio de absorção	83
3.9	Absorção nas amostras em estado natural	84
3.10	Absorção nas amostras resinadas	84
3.11	Absorção nas amostras revestidas com geotêxtil	85
3.12	Teste F para Módulo de Ruptura (MOR)	88
3.13	Teste F para Módulo de Elasticidade (MOE)	88
3.14	Teste t para Módulo de Ruptura (MOR)	88
3.15	Teste t para Módulo de Elasticidade (MOE)	88
3.16	Teste F para absorção	88
3.17	Teste t para ensaio de absorção	89
4.1	Resultado do ensaio elétrico nas amostras secas	91
4.2	Resultado do ensaio elétrico nas amostras úmidas	92
A.1	Parâmetros da Célula de carga	105

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
Ca(OH)₂	Óxido de cálcio
EPS	Poliestireno expandido
HDI	Hexametileno diisocianato
HDPE	Polietileno de alta densidade
HMDI	Diciclohexilmetano diisocianato
IPDI	Isofurona diisocianato
LDPE	Polietileno de baixa densidade
MDI	Difenilmetano diisocianato
MOE	Módulo de Elasticidade
MOR	Módulo de Ruptura
NaOH	Hidróxido de sódio

PA	Poliamida
PET	Poliéster
PP	Polipropileno
PU	Poliuretano
PVC	Cloreto de polivinila
TDI	Tolueno diisocianato
UV	Ultravioleta

Lista de Símbolos

cP	viscosidade absoluta
Tg	temperatura de transição vítrea ($^{\circ}C$)
tp	tempo de processamento da resina poliuretana
f_M	resistência da madeira à flexão (MPa)
E_{M0}	módulo de elasticidade à flexão (MPa)
S	desvio padrão amostral
$\bar{x}$	média amostral

Sumário

1	INTRODUÇÃO	27
2	PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	29
2.1	MADEIRA	29
2.1.1	Visão Geral	29
2.1.1.1	Classificação das árvores	33
2.1.2	Propriedades mecânicas da madeira	36
2.1.2.1	Flexão	37
2.1.2.2	Compressão	38
2.1.2.3	Tração	39
2.1.2.4	Cisalhamento	40
2.1.3	Propriedades elétricas da madeira	40
2.1.3.1	Fator de dissipação dielétrica ($tg\delta$)	40
2.1.3.2	Condutividade	41
2.1.3.3	Constante dielétrica (ϵ)	42
2.1.4	Vantagens e desvantagens do uso da madeira	44
2.1.5	Fatores que influenciam as características da madeira	45
2.1.5.1	Nós (<i>Knots</i>)	45
2.1.5.2	Inclinação das fibras (<i>Slope of Grain</i>)	46
2.1.5.3	Madeira de reação (<i>Reaction Wood</i>)	47
2.1.5.4	Falhas de compressão (<i>Compression Failures</i>)	48
2.1.5.5	<i>Brashness</i>	49
2.2	RESINAS POLIURETANAS DERIVADAS DO ÓLEO DE MAMONA	49
2.2.1	Resina poliuretana monocomponente	51
2.2.2	Resina poliuretana bicomponente	52
2.2.3	Reação de polimerização	52
2.2.3.1	Poliol	53
2.2.3.2	Pré-polímero	54

2.2.4	Degradação da Poliuretana	55
2.3	GEOSINTÉTICOS	57
2.3.1	Geotêxteis	57
2.3.1.1	Geotêxtil tecido	58
2.3.1.2	Geotêxtil não-tecido	59
2.3.1.3	Geotêxtil tricotado	61
2.3.1.4	Degradação por exposição à UV	62
2.3.1.5	Degradação Química	62
2.3.2	Geomembrana	64
3	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS E METODOLOGIA DE ENSAIOS	69
3.1	Procedimentos preliminares à realização do ensaio mecânico	69
3.1.1	Preparação das amostras	69
3.1.2	Ensaio de flexão estática	73
3.2	Procedimentos preliminares à realização dos ensaios elétricos e de absorção	77
3.2.1	Preparação das amostras	77
3.2.2	Ensaio de Resistividade Volumétrica e Superficial	79
3.2.3	Ensaio de Absorção	84
3.3	Análise estatística dos resultados mecânicos e de absorção	85
3.3.1	Teste F	85
3.3.2	Teste t	86
4	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	91
4.1	Conclusões finais	91
4.2	Trabalhos futuros	94
	Referências	95
A	Prensa Elétrica	101
A.1	Estrutura metálica	102
A.2	Mostrador digital	102
A.3	Computador	102
A.4	Atuador elétrico	104
A.5	Célula de carga	105
A.6	Caixa de controle	106

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica alternada facilitou sobremaneira o uso da eletricidade e os transformadores de potência possibilitaram elevar ou reduzir as tensões elétricas com rendimentos de até 98%, dessa forma, viabilizando que grandes blocos de potência pudessem ser transportados por longas distâncias. Um sistema elétrico interconectado, composto por transformadores, equipamentos de proteção, linhas de transmissão e distribuição, foi, então, sendo gradativamente construído.

As linhas de transmissão e distribuição transportam a energia elétrica desde a geração até os centros consumidores, as quais, embora tenham a mesma função, são projetadas e executadas de formas distintas, ou seja, em função das tensões elétricas que operam e do impacto econômico e social que suas falhas podem ocasionar. As linhas de distribuição de energia, objeto deste trabalho, têm tensões geralmente menores que $69kV$ e, tradicionalmente, no Brasil, são aéreas e seus elementos estruturais, postes e cruzetas, empregam a madeira de lei. Leis ambientais rigorosas, aliadas à escassez de algumas espécies nativas, têm forçado o surgimento de novas propostas estruturais, como as estruturas de ferro, de cimento e poliméricas, em substituição às tradicionais cruzetas de madeira. Embora estas novas estruturas sejam mais aptas para situações específicas, ainda não conseguem suplantiar os custos e a praticidade da manutenção das cruzetas de madeira. Por essa razão, as pesquisas se voltam para o uso da madeira de reflorestamento, onde alguns desafios se apresentam.

Por serem usadas em ambiente externo, as estruturas de madeira ficam expostas a diferentes condições climáticas, sendo que a alta higroscopicidade da madeira facilita a absorção da umidade nos períodos chuvosos e a perda nas temporadas de seca. Essa constante troca de umidade com

o ambiente tende a dilatar e contrair mecanicamente a estrutura, gerando um desgaste e o surgimento de fissuras e rachaduras. Soma-se a esse problema, o ataque de micro-organismos, tais como fungos, resultando no apodrecimento de toda a estrutura, assim, os postes, por estarem em contato direto com o solo, são os mais suscetíveis a esses ataques biológicos. Ao longo dos anos, técnicas que minimizam esse problema foram sendo desenvolvidas, a exemplo daquelas que preenchem os poros da madeira com agentes químicos em grandes autoclaves.

Aliando-se a essas técnicas e procurando evitar a absorção de água pela madeira, outros tratamentos nas estruturas de madeira de reflorestamento têm surgido. Um dos mais bem-sucedidos é aquele em que a madeira, após ter recebido o tratamento fungicida, é recoberta com resina poliuretana derivada do óleo de mamona. Contudo, mesmo nesse processo, para que seu produto final seja melhor posicionado no mercado, alguns desafios ainda necessitam ser vencidos. A taxa de descarte de peças, durante o processo de fabricação, é elevada em função de pequenos defeitos e fissuras - o rejeito de madeira tratada no Brasil é de aproximadamente 15% a 20% de um total de produção de 1,2 milhões de m^3/ano [1] - e o transporte, ou mesmo o armazenamento inadequado, pode danificar a camada protetora e comprometer o produto final.

Com o intuito de reduzir o desperdício e aumentar a vida útil das estruturas de madeira, foi desenvolvido um novo processo de revestimento da madeira com material geotêxtil e impregnação com resina poliuretana derivada do óleo de mamona. Neste, o revestimento oculta as fissuras que não interferem nas propriedades mecânicas da estrutura e cria uma crosta impermeável que evita o desgaste e apodrecimento. Ressalta-se também que este revestimento mantém as mesmas propriedades elétricas elevadas da madeira seca.

Sob tal perspectiva, o presente estudo compreende as seguintes etapas: análise bibliográfica, descrita no capítulo 2, abordando as características das madeiras, das resinas poliuretanas e das mantas geossintéticas; a preparação do compósito, detalhamento dos ensaios mecânicos e elétricos e análise dos resultados, no capítulo 3; e conclusão e sugestões para trabalhos futuros, no capítulo 4. Destaque especial se encontra no apêndice, onde é descrita a construção de uma prensa elétrica com capacidade de duas toneladas para testes mecânicos em modelos reduzidos, cuja tecnologia pode ser estendida para outras cargas.

Capítulo 2

PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Madeiras de reflorestamento, impregnadas com poliuretana oriundas do óleo de mamona, são uma realidade na construção de cruzetas. Seu uso se torna cada vez mais difundido nas companhias concessionárias de energia elétrica, mas muitos desafios ainda necessitam ser vencidos. Como o tema é multidisciplinar, foram focalizadas três áreas específicas: madeiras, resinas poliuretanas derivadas do óleo de mamona e materiais geossintéticos.

2.1 MADEIRA

2.1.1 Visão Geral

Desde os primórdios, por ser um polímero natural, renovável e versátil, a madeira se mantém em destaque como material de construção. No Brasil, com suas florestas que ocupam vastas extensões territoriais e abrangem uma rica biodiversidade, as madeiras podem ser uma fonte segura de matéria-prima de qualidade, desde que tomados os devidos cuidados com a preservação da área verde, com as leis de proteção ambiental, com o manejo consciente e com a proteção contra desastres naturais causados por fogo, insetos e doenças. No manejo adequado, árvores novas naturalmente substituem as árvores antigas quando da sua retirada, mantendo igual ou superior o volume de utilização. No que tange as áreas de reflorestamento, tem-se uma alternativa inteligente para a produção de madeira com vistas a aplicações específicas, reduzindo a pressão pela demanda das espécies nativas e de uso consagrado, ou seja, métodos racionais de exploração podem aliar expansão econômica com preservação da natureza. Dessa forma, as áreas de reflorestamento consistem em uma importante faceta do desenvolvimento sustentado, que não

é apenas beneficiado pela produção direta da madeira, como também pela manutenção do equilíbrio ecológico, com a melhoria da qualidade do ar, manutenção da biodiversidade e redução da incidência de áreas erodidas.

Quanto aos seus benefícios, é importante observar que a madeira apresenta alta resistência em relação ao seu peso específico, sua produção emprega apenas energia solar, limpa e disponível, sua extração e seu desdobro envolvem baixo consumo de energia, além de não provocarem maiores danos ao meio ambiente. Por sua vez, outros materiais estruturais são produzidos por meio de processos altamente poluentes, antecidos por agressões ambientais consideráveis para a obtenção de matéria-prima. Os referidos processos requerem alto consumo energético e a matéria-prima retirada da natureza dificilmente será repostada. Assim, a madeira se mostra como o mais ecológico dos materiais, conforme demonstrado na tabela 2.1 [2], a seguir:

Tabela 2.1: Materiais Estruturais - dados comparativos.

Material	A	B	C	D	E	F	G
Concreto	2,4	1.920	20	20.000	96	8,3	8.333
Aço	7,8	234.000	250	210.000	936	32,1	26.923
Madeira - conífera	0,6	600	50	10.000	12	83,3	16.667
Madeira - folhosa	0,9	630	75	15.000	8	83,3	16.667

As colunas da tabela 2.1 representam:

- A - densidade do material, g/cm^3 ; no caso da madeira, valor referente à umidade de 12%.
- B - energia consumida na produção, MJ/m^3 ; para o concreto a energia provém da queima de óleo; para o aço, da queima do carvão; para a madeira, da energia solar.
- C - resistência, MPa ; para o concreto o valor citado se refere à resistência característica à compressão, produto usinado; para o aço trata-se da tensão de escoamento do tipo ASTM A36 [3]; para a madeira são os valores médios da resistência à compressão paralela às fibras, referida à umidade de 12%, conforme a recomendação da NBR 7190, da ABNT [4].
- D - módulo de elasticidade, MPa ; mesma descrição da coluna C.
- E - relação entre os valores da energia consumida na produção e da resistência.

- F - relação entre os valores da resistência e da densidade.
- G - relação entre os valores do módulo de elasticidade e da densidade.

Além das vantagens referidas, a madeira apresenta aspecto visual muito interessante e pode ser processada sem maiores dificuldades, dessa maneira, viabilizando a definição de formas e dimensões, as quais são limitadas apenas pela geometria das toras e pelo equipamento usado para esta operação. Apesar de sua inflamabilidade, as peças estruturais de madeira evidenciam um conveniente desempenho a altas temperaturas, melhor que o de outros materiais em condições severas de exposição. Na realidade, a carbonatação superficial das peças se transforma numa espécie de “barreira de isolamento térmica”. Sendo a madeira um mau condutor de calor, a temperatura interna cresce mais lentamente, não provocando maior comprometimento da região central das peças que podem se manter em serviço nas condições onde o aço, por exemplo, já teria entrado em colapso (escoamento), mesmo não sendo inflamável. A figura 2.1 [5] apresenta a imagem de perfis metálicos retorcidos em decorrência da perda de resistência sob alta temperatura, apoiados sobre uma viga de madeira que, apesar de carbonizada, ainda mantém capacidade de resistência.

Figura 2.1: Resistência sob alta temperatura.

Outra característica importante da madeira com relação ao fogo é o fato de não apresentar distorção quando submetida a altas temperaturas, tal como ocorre com o aço, dificultando, assim, a ruína da estrutura, conforme já observado na figura 2.1. Embora suscetível ao apodrecimento e ao ataque de organismos xilófagos em circunstâncias específicas, a madeira tem sua durabilidade natural prolongada quando previamente tratada com substâncias preservativas. No caso de emprego em ambiente externo, deve ser salientada, neste ponto, a importância de um projeto elaborado de modo a prever detalhes construtivos que garantam maior durabilidade à madeira impregnada, bem como a utilização de produtos que confinem as substâncias preservativas ou que trabalhem para aumentar determinadas propriedades de resistência e rigidez do material e/ou do produto obtido.

No Brasil, a madeira é utilizada, com frequência, para múltiplas finalidades. Na construção civil, a madeira se destaca na solução de problemas relacionados a coberturas (residenciais, comerciais, industriais, construções rurais), cimbramentos (para estruturas de concreto armado e protendido), transposição de obstáculos (pontes, viadutos, passarelas para pedestres), armazenamento (silos verticais e horizontais), linhas de distribuição (energia elétrica, telefonia), obras portuárias, entre outros. Ademais, é muito empregada na fabricação de componentes para a edificação, como painéis divisórios, portas, caixilhos, lambris, forros e pisos. A indústria moveleira e a indústria de embalagens usam largamente a madeira e os produtos dela derivados (chapas de diferentes características). Outros usos podem ser mencionados: nos meios de transporte (barcos, carroçaria, vagões de trem, dormentes), nos instrumentos musicais, em artigos esportivos, nas indústrias de bebidas, de brinquedos, de fósforos, de lápis. O diagrama da figura 2.2 apresenta os principais empregos da madeira.

Diante do exposto, é possível inferir que a madeira tem significativo potencial para os mais diversificados usos. É evidente que a disseminação dos produtos de madeira está condicionada à garantia de sua qualidade e de sua competitividade com outros materiais. Todavia, isto poderá ser conseguido com o domínio do conhecimento relativo ao comportamento da madeira sob diferentes solicitações, com a elaboração de projetos adequadamente fundamentados em conceitos atualizados e com a produção que obedeça aos critérios de qualidade envolvendo material, equipamento e mão-de-obra já adotados para outros materiais.

Figura 2.2: Caracterização dos principais produtos de madeira

2.1.1.1 Classificação das árvores

As madeiras disponíveis no mercado estão divididas em duas classes: (i) as madeiras de árvores coníferas, conhecidas como *softwoods*; (ii) e as madeiras de árvores decíduas (caducas), chamadas de *hardwoods* (folhosas). Uma tradução literal desses dois termos induz a uma ideia errônea sobre as características físicas da madeira, uma vez que esta classificação é de origem botânica. Portanto, nem sempre, uma madeira classificada como *hardwood* será uma madeira dura, como exemplo, pode-se citar a Balsa (*Ochroma pyramidale*), madeira comum em florestas tropicais da América do Sul que fisicamente é mais macia que madeiras classificadas como *softwood*. Da mesma maneira, madeiras classificadas como *softwoods* podem ter maior rigidez que as madeiras *hardwood*.

O tronco é a parte útil da árvore para a produção de peças de madeira. A figura 2.3 [6] mostra as diferenças fisiológicas entre uma árvore conífera e uma folhosa.

Figura 2.3: Corte transversal de um tronco de madeira de pinheiro e de carvalho mostrando as distintas formações.

Sendo [7], [6]:

- casca: protege o lenho e é o veículo da seiva elaborada, pode ser dividida em uma parte externa, formada de tecido morto, com espessura que varia bastante com a espécie e idade da árvore; e uma parte interna fina, constituída de tecido vivo, mole e úmido, com atividade fisiológica e condutora da seiva elaborada;

- câmbio: camada que está dentro da casca interna e forma a madeira e células da casca, só pode ser visto com um microscópio;

- alburno: fica situado entre o câmbio e o borne, possui tanto células vivas quanto células mortas e tem como função principal o armazenamento de alimento para a árvore; nas camadas exteriores perto do câmbio, o alburno controla o transporte de água ou seiva;

- cerne: formado por uma mudança gradual no alburno, é inativo;
- medula: caroço pequeno de tecido localizado no centro do tronco da árvore, onde se inicia o crescimento de madeira [7];
- anéis de crescimento: camadas de crescimento visíveis, na maioria das árvores, formadas a partir de uma formação celular cíclica. A largura dos anéis pode variar de acordo com as características da espécie e as condições de crescimento;
- lenho inicial: porção do anel de crescimento formado durante a fase inicial de crescimento da árvore. Possui cavidades celulares largas e paredes finas; e
- lenho tardio: porção do anel formado após o período de crescimento, com cavidade celular pequena e paredes grossas [6].

Na maioria das vezes, as coníferas possuem folhas em forma de agulhas ou escamas, sempre verdes, as sementes são nuas, isto é, desprotegidas, e possuem células simples chamadas de traqueídes. Os traqueídes são como canudos, responsáveis pela condução da água e sais minerais e também dão suporte para as plantas. Já as folhosas são árvores de folhas largas, que frequentemente perdem suas folhas ao final de cada estação e têm uma estrutura celular bem mais complexa que as coníferas. Esta estrutura celular complexa compreende células de parede celular grossa - fibras - responsáveis pelo suporte estrutural da planta e células de parede celular mais fina - vasos - que fornecem o meio para a condução do nutriente [6].

A composição química da madeira é outro fator relevante para a separação das espécies. A madeira é composta de celulose, lignina, hemiceluloses e quantias secundárias (5% a 10%) de extratos, sais, águas e outras substâncias contidas em sua estrutura celular [8]. Variações nas características e volume destes componentes também auxiliam para que a madeira seja classificada em pesada ou leve, rígida ou flexível, dura ou macia.

A estrutura molecular da celulose e da lignina é responsável por grande parte das características físicas e de resistência mecânica da madeira. O percentual de celulose presente nas coníferas varia entre 40 a 45%, enquanto, nas folhosas, fica na faixa de 38 a 49%. A lignina corresponde de 26 a 34% nas coníferas e 23 a 30% nas folhosas [9]. A rigidez e a dureza da madeira podem ser atribuídas à lignina, uma maior percentagem de lignina representa diminuição de absorção de água. A água da madeira começa a evaporar, logo após o corte, até atingir uma umidade de equilíbrio com as condições do ambiente. A madeira quando “seca ao ar”, à temperatura de 25°C e umidade relativa de 65%, possui umidade oscilando em torno de 12% [10].

As propriedades de uma única espécie são relativamente constantes dentro de certos limites, assim, a classificação da madeira através de espécies somente pode ser considerada adequada em algumas hipóteses. Para usufruir das vantagens da madeira em aplicações práticas, da melhor e efetiva maneira, deve-se considerar suas características específicas e propriedades físicas. Algumas diferenças dessas características são citadas abaixo [11]:

- Devido ao tempo de abate ser bem menor nas coníferas (geralmente, após trinta anos se faz o corte), elas são mais facilmente encontradas e, conseqüentemente, possuem um menor custo que as folhosas (em algumas ocasiões, o tempo para a derrubada das folhosas é maior do que cem anos).

- As coníferas possuem uma durabilidade inferior às folhosas, sendo necessário o uso de preservativos para o aumento do seu tempo de vida.

- As coníferas possuem um crescimento muito rápido, desta maneira, a madeira proveniente dessas árvores, na maioria das vezes, é de baixa densidade e força. Em contrapartida, as folhosas têm um tempo de maturação bem maior, por conseguinte, fornecendo madeira de alta densidade e força [11].

Desta forma, a madeira se torna um importante material de engenharia e, em muitos casos, é bastante útil a diversos avanços tecnológicos. Um dos principais atributos que mantém a madeira na vanguarda das matérias-primas é sua disponibilidade em muitas espécies, tamanhos, formas e condições de suprir quase toda a demanda. Por essas razões, aliada ao baixo custo de algumas espécies, a madeira se apresenta como uma excelente alternativa de material isolante para o uso em linhas de transmissão - postes e cruzetas - com tensão de até $345kV$ [12, 13].

2.1.2 Propriedades mecânicas da madeira

Por ser um material altamente higroscópico, o teor de umidade contida em uma peça de madeira influencia em suas propriedades físicas e mecânicas [12, 14].

A madeira das árvores recém-abatidas apresenta um alto teor de umidade. Após o abate, a madeira fica exposta ao meio ambiente, perdendo umidade de forma contínua. Com o término do processo de perda de umidade para o meio, diz-se que a madeira atingiu o ponto de saturação das fibras [2]. A norma brasileira NBR 7190 adota, como valor de referência, o ponto de saturação das fibras em torno de 25% de umidade [4].

O nível de umidade de equilíbrio é alcançado com a queda do teor de umidade abaixo do

ponto de saturação das fibras. O valor de equilíbrio determinado pela NBR 7190 [4] é de 12 %, calculado em função da espécie considerada, temperatura e umidade relativa do ar. Para este nível ser atingido a temperatura deve estar em torno de $20^{\circ}C$ e a umidade relativa do ar em 65% [2].

Com as constantes mudanças climáticas, o teor de umidade presente na madeira estará permanentemente em oscilação, na tentativa de entrar em equilíbrio com a umidade relativa do ar. Em climas nórdicos, o teor de umidade na madeira é de 12% durante o verão e 6% no inverno [15]. Mudanças no teor de umidade da madeira causam contração e dilatação das peças, o que pode gerar deformação e quebra das mesmas [12].

A força de flexão e/ou compressão da madeira, geralmente, é inversa ao teor de umidade, isto é, com a diminuição do teor de umidade aumenta a força de flexão e/ou compressão. Entretanto, existe um limite mínimo para esse teor de umidade, no qual, ao invés da madeira ganhar força, ela pode tornar-se fraca. Esse limite não é conhecido para todas as espécies e tipos de carregamento, mas acredita-se que o teor de umidade em torno de 10% é a região onde a madeira possui força máxima [15].

2.1.2.1 Flexão

Quando submetida à flexão, a madeira sofre diferentes tipos de esforço, figura 2.4, tais como: compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras, cisalhamento paralelo às fibras e compressão normal às fibras na região dos apoios [2].

A ruptura em peças de madeira solicitadas à flexão ocorre pela formação de minúsculas falhas de compressão, seguidas pelo desenvolvimento de enrugamentos de compressão macroscópicos. Este fenômeno gera o aumento da área comprimida na secção e a redução da área tracionada, podendo, eventualmente, romper por tração [2].

Figura 2.4: Flexão na madeira.

2.1.2.2 Compressão

A compressão pode ocorrer em três condições distintas: (i) compressão paralela à fibra; (ii) compressão perpendicular à fibra; ou (iii) compressão em qualquer ângulo em relação à fibra. Quando o esforço de compressão é produzido paralelo à fibra, este tende a deformar, encurtando as células da madeira ao longo do eixo longitudinal. Na compressão perpendicular à fibra, o esforço produzido deforma as células da madeira perpendicularmente ao seu comprimento. Entretanto, ambos os esforços de compressão, paralelo e perpendicular à fibra, podem estar presentes em uma única peça de madeira, desse modo, refere-se que o esforço é uma compressão com algum ângulo em relação à fibra. A força da madeira, em qualquer ângulo em relação à fibra, é um valor intermediário entre a compressão paralela e perpendicular à fibra [5].

Por meio da figura 2.5 [5] é possível entender como o esforço produzido pela compressão atua em uma peça de madeira. No momento em que um esforço de compressão é aplicado paralelo às fibras (A), cada célula da madeira age como uma coluna - canudo - oca. Como existem várias células na estrutura interna da madeira, cada uma destas dá suporte para a célula adjacente, produzindo, assim, uma alta resistência à compressão. Da mesma maneira, na compressão perpendicular à fibra (B), é necessário um pequeno esforço para que as células da madeira entrem em colapso [5].

Figura 2.5: Força de compressão aplicada: (A) paralela às fibras; (B) perpendicular às fibras.

2.1.2.3 Tração

Da mesma maneira como ocorre na compressão, a tração na madeira também apresenta diferentes tipos: tração paralela ou tração perpendicular às fibras, distinguindo extremamente as propriedades da madeira de acordo com o tipo de solicitação [2].

Na presença de tração paralela às fibras, a madeira possui um alto valor de resistência. Neste tipo de solicitação, as falhas podem ocorrer pela combinação de dois fatores: deslizamento entre as células e ruptura das paredes celulares. Em ambos os modos, as deformações causadas são mínimas ou até mesmo invisíveis antes da falha completa - ruptura [5].

Em contraste com a tração paralela à fibra, a madeira é relativamente fraca quando carregada em tração perpendicular à fibra. Esforços nessa direção atuam perpendicular ao comprimento das células e produzem rachaduras ao longo das fibras - separação das células - que podem ter um significativo efeito na integridade estrutural. Nesse tipo de esforço, a madeira também apresenta baixos valores de deformação [7].

Com um paralelo realizado entre a madeira e o aço, pode-se concluir que a madeira não possui uma resistência à tração menor que o aço se o fator levado em consideração for o peso volumétrico ao invés de suas dimensões. Com o auxílio das respectivas massas específicas e resistência à tração dos materiais, isso fica claro [12].

- Madeira: massa específica de aproximadamente $0,5$ a $0,8g/cm^3$, em alguns casos, superiores a $1g/cm^3$, e resistência à tração entre 70 e $130MPa$.

- Aço: massa específica de $7,8g/cm^3$ e resistência à tração entre 400 a $500MPa$.

A figura 2.6 [2] apresenta as forças de tração, paralela e perpendicular às fibras, aplicadas em peças de madeira.

Figura 2.6: Tração paralela e perpendicular às fibras.

2.1.2.4 Cisalhamento

Os três tipos de cisalhamento que atuam na madeira são: vertical, horizontal e rolante (*rolling*), mostrados na figura 2.7 [2]. Comumente, o cisalhamento vertical é desconsiderado, visto que outros tipos de falhas, tais como compressão perpendicular à fibra, podem ocorrer antes da falha por cisalhamento vertical [5].

O cisalhamento horizontal, atuante paralelo à fibra, é o mais importante na maioria dos casos. Esse tipo de solicitação produz uma deformação na estrutura celular da madeira, quebra das ligações intercelulares pelo escorregamento da parte superior em relação à parte inferior da peça [5].

Já o cisalhamento rolante é causado por um carregamento perpendicular ao comprimento das células, no plano paralelo à fibra. Nessa solicitação, as células tendem a rolar uma sobre as outras. Falhas são geralmente precedidas por grandes deformações nas células da seção transversal, por causa da baixa resistência da madeira ao cisalhamento rolante [5].

Figura 2.7: Cisalhamento vertical, cisalhamento horizontal e cisalhamento *rolling*.

2.1.3 Propriedades elétricas da madeira

Em materiais dielétricos utilizados na construção de elementos capacitivos as principais propriedades elétricas são: fator de dissipação dielétrica e constante dielétrica, enquanto que para a produção de cruzetas a mais importante propriedade elétrica é a condutividade [7].

2.1.3.1 Fator de dissipação dielétrica ($tg\delta$)

Quando um não-condutor é colocado em um campo elétrico, ele armazena energia. A soma da energia armazenada por unidade de volume depende da constante dielétrica e da amplitude do campo aplicado. Um dielétrico ideal libera toda esta energia para o circuito elétrico externo quando o campo é removido, mas, na prática, alguns dielétricos dissipam a energia em

forma de calor. O fator de dissipação é uma medida da quantidade de energia armazenada que é transformada em calor. Ele é afetado por vários fatores, incluindo frequência, teor de umidade e temperatura, e varia de quase 0,01, para madeiras secas e de baixa densidade, para aproximadamente 0,95, em madeiras densas e com alto nível de umidade [7].

2.1.3.2 Condutividade

Quando uma tensão elétrica é aplicada em uma peça de madeira, sua condutividade elétrica pode sofrer uma leve variação. Entretanto, com aumento da temperatura em $10^{\circ}C$, sua condutividade praticamente dobra. A condutividade e a resistividade elétrica da madeira variam amplamente com o teor de umidade, especialmente, abaixo da saturação da fibra. Quando o teor de umidade da madeira aumenta de próximo a zero até a umidade de saturação da fibra, a condutividade elétrica aumenta na ordem de 10^{10} para 10^{13} vezes. A resistividade que está em torno de 10^{14} a $10^{16}\Omega.m$, na madeira seca, muda para 10^3 a $10^4\Omega.m$ na madeira com fibras saturadas. Quando o teor de umidade aumenta da saturação da fibra até a saturação completa, o aumento adicional na condutividade é menor e irregular, geralmente no valor de cem vezes menor [7].

A figura 2.8 [16] ilustra a variação da resistividade elétrica em razão do teor de umidade da madeira, baseado em testes realizados na madeira *Salmaalía malabarica*. Os valores de resistividade foram obtidos com um ohmímetro modelo *Hewlett Packard* 4329A. A tensão aplicada foi de $500V$ em peças com diferentes teores de umidade [16].

Figura 2.8: Mudança na resistividade elétrica da madeira em razão da variação do teor de umidade da espécie *Salmaalía malabarica*.

Quando a madeira possui quantidades anormais de sais solúveis em água ou outras substâncias eletrolíticas, tais como preservativo ou tratamento retardante de fogo, ou está em contanto prolongado com água do mar, a condutividade elétrica pode ser substancialmente aumentada. O aumento é pequeno quando o teor de umidade é menor que 8%, mas aumenta rapidamente quando o teor de umidade excede de 10 a 12% [7]. Pode ser observado, na tabela 2.2 [17], como a queda da resistividade elétrica decresce rapidamente com o aumento do teor de umidade [17, 18].

Tabela 2.2: Resistividade tangencial: valores médios.

Teor de umidade (%)	Resistividade ($M\Omega.cm$)
7	22000
10	600
15	40
25	0,5

A condutividade na madeira é maior ao longo da fibra do que através da fibra e levemente maior na direção radial do que na direção tangencial. Valores de condutividade relativa na direção longitudinal, radial e tangencial são relatados pela razão aproximada de 1.0:0.55:0.50 [7].

2.1.3.3 Constante dielétrica (ϵ)

A constante dielétrica ou permissividade relativa é a razão entre a permissividade dielétrica do material e a permissividade do vácuo. Em testes práticos, a constante dielétrica de um material é a razão entre a capacitância de um capacitor usando o material como dielétrico e a capacitância do mesmo capacitor usando o vácuo como dielétrico [7].

A constante dielétrica da madeira seca varia na faixa de 2 a 5 em salas climatizadas e diminui levemente, mas, constantemente, com o aumento da frequência do campo elétrico aplicado. Ela aumenta com a elevação da temperatura ou teor de umidade, com uma moderada interação positiva entre temperatura e umidade. Há uma intensa interação negativa entre umidade e frequência. Em $20Hz$, a constante dielétrica pode variar de 4 na madeira seca para perto de 1.000.000 na madeira molhada; em $1kHz$, a constante dielétrica pode variar de 4 quando a madeira estiver seca para quase 5.000 quando a madeira estiver molhada; e, em $1MHz$, a constante dielétrica pode variar de quase 3 quando a madeira estiver seca para quase 100 quando a madeira estiver molhada. A constante dielétrica é maior para a polarização paralela às fibras do que para a polarização através das fibras [7].

Para frequência e teor de umidade acima de $10^3 Hz$ e 10%, respectivamente, os valores da constante dielétrica dependem em grande parte da espécie de árvore e da densidade da mesma. Esses valores diferem consideravelmente um do outro e a dependência dos mesmos com o teor de umidade tem o caráter de uma função exponencial [8].

A figura 2.9 [8] apresenta a relação entre a constante dielétrica nas direções paralela e perpendicular às fibras e o teor de umidade de madeiras do tipo coníferas, exemplos de coníferas são as árvores do gênero *Pinus*. Observe-se que para um teor de umidade até 20 a 30% a taxa de aumento na constante dielétrica é maior do que a taxa de aumento do teor de umidade [8].

Figura 2.9: Relação da constante dielétrica com a umidade de madeiras do tipo coníferas nas frequências entre 20 e $1.000 Hz$ (densidade = $0,4 - 0,5 g/cm^3$, $t = 20 - 25^\circ C$).

2.1.4 Vantagens e desvantagens do uso da madeira

As vantagens do uso da madeira são muitas, entre as principais, é possível citar [17]:

- o fato de ser encontrada em grandes quantidades e a preço relativamente baixo;
- a disponibilidade do material em razão do crescente número de áreas de reflorestamento;
- o fácil processamento com ferramentas simples, podendo ser retrabalhada várias vezes;
- a boa capacidade de resistir a esforços de compressão e tração;
- o fato de possuir baixa massa volumétrica e elevada resistência mecânica;
- o fato de permitir ligações e emendas fáceis de executar;
- a sua boa resistência ao choque, ou seja, a sua tenacidade. Com o nível de umidade não muito baixo, a madeira não estilhaça quando submetida a choques bruscos que romperiam ou rachariam outros materiais;
- o fato de apresentar boas condições naturais de isolamento elétrico, térmico e absorção acústica.

Em contraposição, o uso da madeira apresenta algumas desvantagens que devem ser cuidadosamente consideradas, as principais são [17]:

- o fato de ser um material fundamentalmente heterogêneo e anisotrópico;
- o fato de ser muito vulnerável aos agentes externos, com durabilidade limitada quando não são tomadas medidas preventivas;
- o fato de ser sensível ao ambiente, aumentando ou diminuindo de dimensões com as variações de umidade.

Alguns dos processos desenvolvidos para anular as características negativas da madeira no seu estado natural são:

- a degradação das suas propriedades e o aparecimento de tensões internas decorrentes de alterações da umidade são anulados pelos processos de secagem artificial controlada;
- a deterioração da madeira em ambientes que favoreçam o desenvolvimento de seus principais predadores é contornada com tratamentos de preservação;
- a heterogeneidade e a anisotropia próprias de sua constituição fibrosa orientada, assim como a limitação de suas dimensões são resolvidas pelos processos de transformação nos laminados,

contraplacados e aglomerados de madeira [19].

A impregnação da madeira com alguns tipos de óleo, verniz e resina melhora sua isolação e reduz seu teor higroscópico. Peças de madeira podem ser impregnadas somente depois de terem sido trabalhadas, uma vez que as camadas mais profundas da madeira não são impregnadas da mesma forma que as camadas superficiais. Assim, se uma peça impregnada for perfurada, a umidade vai, facilmente, penetrá-la [12].

2.1.5 Fatores que influenciam as características da madeira

A escolha da madeira para um determinado uso somente poderá ser realizada, com economia e segurança, conhecendo-se os valores médios que definem o seu comportamento físico e sua resistência às solicitações mecânicas. É necessário levar em consideração todos os fatores que influenciam na variação das características do material, como os fatores naturais, decorrentes da própria natureza do material, e os fatores tecnológicos, decorrentes da técnica de execução dos ensaios [17].

Qualquer anormalidade ou irregularidade na madeira que afete as condições de uso, como a diminuição de sua força, modificação de sua aparência, entre outros fatores, é considerada um defeito. Nenhuma madeira está completamente livre de algum tipo de defeito - o nó, por exemplo, é um tipo de irregularidade que está presente em todos os tipos de madeira, sem exceção, por causa da natureza de crescimento das árvores. Outras falhas são ocasionadas por condições de crescimento desfavoráveis, manuseio inapropriado durante a fabricação, ataque de fungos e insetos, ventos, geadas.

Alguns fatores naturais que influenciam as características da madeira são:

2.1.5.1 Nós (*Knots*)

Um nó é a base de um galho que foi incorporado na madeira de um tronco ou em um ramo ou galho maior. A aparência do nó dependerá do plano em que ele será serrado. Existe uma correlação entre a quantidade, tamanho e a forma dos nós na madeira, com o número e tamanho dos galhos formados, a velocidade com que os galhos morreram e o tempo em que os galhos mortos permaneceram na árvore. Algumas variações podem aparecer devido às diferentes características de crescimento das espécies, condições do solo, clima e qualidade da madeira [20]. Orifícios na madeira podem ser produzidos por nós soltos - galhos mortos - no momento da serragem da

madeira. Os galhos ainda vivos na época do abate da árvore produzem nós firmes [21].

O principal efeito adverso dos nós está relacionado com modificações nas propriedades mecânicas - diminuição da força - principalmente em madeiras estruturais. Essa diminuição ocorre em consequência à descontinuidade e mudança de direção das fibras na presença de nós e rachaduras que podem surgir ao redor do nó durante o processo de secagem, figura 2.10 [7]. A redução da força é maior na flexão, especialmente, quando o nó está presente na face de tração da barra, perto do ponto de maior esforço de tração. O efeito do nó na rigidez ou cisalhamento horizontal é relativamente sem importância [7].

Figura 2.10: Nó presente em uma peça de madeira.

Em madeira cilíndrica, como postes e pilares, o nó tem menor influência na redução da força do que em madeira serrada [7].

2.1.5.2 Inclinação das fibras (*Slope of Grain*)

As propriedades mecânicas da madeira serrada são reduzidas na presença de fibras cruzadas (fibras transversais), pois estas não estão paralelas ao eixo da peça [7]. As fibras transversais podem ser produzidas por meio de serragem incorreta ou por causas naturais, como proximidade dos nós ou crescimento das fibras em forma de espiral [21]. Mudanças no teor de umidade da madeira tendem a deformar - empenar - peças com fibras transversais rígidas [7].

O grau de inclinação das fibras é medido como um ângulo, expresso como a inclinação entre a direção de alinhamento das fibras e sua extensão axial na peça. De acordo com a NBR 7190 [4], ângulos de até seis graus, para fibras inclinadas, podem ser desconsiderados. O efeito da inclinação das fibras é mais notável na resistência à tração, onde uma redução considerável ocorre em uma inclinação de 1 em 25, isto é, a fibra sofreu um desvio de 1 centímetro, em relação ao eixo da peça, por 25 centímetros de extensão. O efeito da inclinação das fibras na força de compressão é menos acentuado, o efeito de redução, geralmente, não se torna evidente até uma

inclinação de 1 em 10. O efeito de enfraquecimento das fibras transversais no cisalhamento é desprezível [20].

A tabela 2.3 [11] apresenta os efeitos das fibras inclinadas nas propriedades de resistência da madeira.

Tabela 2.3: Efeito do desvio das fibras nas propriedades de resistência da madeira.

Inclinação das fibras	Resistência à flexão (%)	Compressão paralela às fibras (%)	Carga de impacto (%)
Fibra reta	100	100	100
1 em 20 (3°)	93	100	95
1 em 10 (6°)	81	99	62
1 em 5 ($11,5^\circ$)	55	93	36

2.1.5.3 Madeira de reação (*Reaction Wood*)

Tecidos lenhosos anormais estão frequentemente associados com caules inclinados e membros tortos. O termo madeira de reação se refere à reposta natural da árvore na tentativa de retornar os membros e o caule para a posição normal. Em *softwood*, o tecido anormal é chamado de madeira de compressão, sendo comum em todas as espécies de *softwood* e encontrado no menor lado do galho ou caule inclinado. Em *hardwood*, o tecido anormal é conhecido como madeira de tração e está localizado no lado superior do membro inclinado, embora, em muitos momentos, esteja distribuído irregularmente ao redor da secção transversal [7].

Muitas das propriedades anatômicas, físicas, químicas e mecânicas da madeira de reação se diferem das propriedades da madeira normal. Talvez a maior evidência esteja no aumento da densidade em relação à madeira normal. O peso específico da madeira de compressão é normalmente 30% a 40% maior do que o da madeira normal, já o peso específico da madeira de tração está geralmente na faixa de 5% a 10% maior do que o da madeira normal, mas, em alguns casos, pode ultrapassar 30% [7].

Madeira de reação, em particular, a madeira de compressão no estado verde, pode ser mais forte do que a madeira normal. Entretanto, se comparada à madeira normal com peso específico similar, a madeira de reação é definitivamente mais fraca. Possíveis exceções para isso são propriedades de compressão paralelas às fibras da madeira de compressão e propriedades no impacto de flexão na madeira de tração [7]. Madeiras de compressão e tração sofrem contração longitudinal constante quando sujeitas à perda de umidade abaixo do ponto de saturação da fibra. A contração longitudinal na madeira de compressão pode ser dez vezes maior do que na

madeira normal. Em madeira de tração, estima-se que essa contração atinja um valor de pouco mais do que cinco vezes o valor da madeira normal. Peças de madeira que contêm madeira de compressão tendem a sofrer distorção excessiva durante a secagem [11]. Por meio da figura 2.11 [6], é possível ver a torção causada por uma madeira de reação.

Figura 2.11: Torção causada por madeira de reação.

2.1.5.4 Falhas de compressão (*Compression Failures*)

Grandes esforços compressivos ao longo da fibra que produzem falhas minúsculas de compressão podem ser causados por flexão excessiva de árvores eretas durante ventanias e nevascas, irregularidades na terra e/ou manuseio incorreto de toras. Falhas de compressão não devem ser confundidas com madeira de compressão. Falhas de compressão são visíveis na superfície da tábua, como linhas minúsculas ou zonas formadas pelo enrugamento ou empenamento de células. Geralmente, as falhas aparecem como linhas brancas, mas, em alguns casos, podem até ser invisíveis a olho nu. A presença de falhas de compressão pode ser indicada pela ruptura do fim da fibra [20].

Produtos que contêm falhas de compressão visíveis, figura 2.12 [6], têm baixas propriedades de força, especialmente resistência à tração e resistência ao choque. A resistência à tração de madeira contendo falhas de compressão pode ser tão baixa quanto $1/3$ da força de uma madeira livre de nó (*clearwood*). Mesmo uma falha de compressão leve, visível somente com microscópio, pode reduzir seriamente a força e causar fratura frágil [20].

Figura 2.12: Falha de compressão.

2.1.5.5 *Brashness*

Brashness é uma condição anormal na madeira fazendo com que ela se quebre repentina e completamente através da fibra, comumente em um esforço no qual uma peça normal da mesma madeira não quebraria. Embora não haja demarcação aguda visual entre a madeira frágil e a madeira normal da mesma espécie, peças frágeis podem geralmente ser detectadas porque estão anormalmente em baixa densidade, esta condição é especialmente notável quando tais amostras estão secas [20]. A figura 2.13 [6] mostra a comparação entre duas vigas de madeira que sofreram ruptura por flexão.

Figura 2.13: Comparação entre falha em madeira normal (A) e madeira frágil (B).

2.2 RESINAS POLIURETANAS DERIVADAS DO ÓLEO DE MAMONA

A descoberta do uretano ou uretana, produto da reação química entre um grupo hidroxila e um grupo isocianato, foi feita em 1848, por Wurtz. Contudo somente em 1937, Otto Bayer descobre a reação de polimerização entre diisocianatos e polióis, desenvolvendo os poliuretanos [22]. A facilidade em se obter materiais com diferentes propriedades, desde elastômeros de alta flexibilidade até materiais de maior dureza, torna os poliuretanos produtos muito versáteis em diferentes segmentos industriais [23].

Quando uma ligação uretana está presente em um polímero, mesmo que existam outras ligações, este é considerado um poliuretano (PU). Hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos, grupos éster, éter, ureia e amida são algumas das ligações que podem estar contidas em típicos PUs. Os PUs não contêm unidades de uretano repetidas de modo regular e não apresentam uma forma

empírica que seja representativa de um todo, assim, diferenciam-se dos demais polímeros [24].

Algumas vantagens apresentadas pelos poliuretanos são: processabilidade; flexibilidade de formulação; versatilidade de temperatura de cura e controle de pico exotérmico na transição líquido-gel; excelentes propriedades estruturais; ausência de emissão de vapores irritantes ou tóxicos; bom poder de adesão; e baixo custo.

Com respeito a impactos ambientais, tem-se procurado polióis provenientes de fontes renováveis em substituição aos derivados do petróleo, como é o caso dos óleos vegetais, tais como o óleo de soja, o óleo de palma e o óleo de mamona [25].

Neste contexto, surgem as poliuretanas derivadas de óleo de mamona a partir da década de 40 [26]. A mamona (*Ricinus Communis L.*) é uma planta oleaginosa, arbustiva, pertencente à família das Euforbáceas e que é facilmente encontrada em regiões tropicais e subtropicais, portanto muito abundante no Brasil. O teor de óleos das sementes de mamona varia em torno de 35 a 55%, sendo o padrão comercial de 45% [27]. Na composição desse óleo, a concentração do ácido ricinoleico é de aproximadamente 90% dos ácidos graxos presentes, sendo os 10% restantes constituídos de ácidos graxos não-hidroxiados, como os ácidos oleicos e linoleicos [28]. A composição média do óleo de mamona é apresentada na tabela 2.4 [29].

Tabela 2.4: Composição média do óleo de mamona.

COMPONENTE	PERCENTAGEM
Ácido ricinoléico	89,5
Ácido palmítico	1,0
Ácido linoléico	4,2
Ácido linolênico	0,3
Ácido dihidroxiesteárico	0,7
Ácido estereático	1,0
Ácido oléico	3,0
Ácido eicosanáico	0,3

O ácido ricinoleico apresenta a peculiaridade de ser um dos poucos ácidos graxos naturais cuja estrutura química possui três grupos funcionais altamente reativos: o grupo hidroxila no 12° carbono, a insaturação no 9° carbono e o grupo carbonila no 1° carbono. Esse ácido, do qual se pode obter poliálcool poliéster [30], atribui ao óleo de mamona propriedades únicas e grande versatilidade devido aos grupos OH e a ligação dupla, que são sítios distintos de reação para preparação de vários derivados industriais. As reações podem ser efetuadas isoladamente ou em combinação, possibilitando a obtenção de muitos derivados [24]. Por causa deste grupo de hidroxila polar, ele é compatível com uma grande variedade de resinas naturais e sintéticas [31].

Conforme sua finalidade, o óleo de mamona apresenta características de acidez, umidade e outros índices, como os representados na tabela 2.5 [32].

Tabela 2.5: Características de diferentes tipos de óleo de mamona.

PRODUTO	COR	ACID.	VISC.	DENS.	I.I.	I.OH.	I.SAP.	P.CONG.
AA-Padrão	1+	2,0	7,5	0,959	86	164	180	-10
AA-USP	1-	2,0	7,5	0,959	86	164	180	-10
Cristal O	1-	2,0	7,5	0,959	86	164	180	-10
C. Crown	1-	2,0	7,5	0,959	86	164	180	-10
DB Oil	1+	0,6	7,5	0,959	86	164	180	-10
#1 Oil	2+	2,0	7,5	0,959	86	158	180	-10

ACID.	=	Acidez do óleo de mamona.
VISC.	=	Viscosidade à 25 °C, [cP].
DENS.	=	Densidade à 25 °C, [g/cm^3].
I.I.	=	Índice de Iodo.
I.OH.	=	Índice de Hidroxila.
I.SAP.	=	Índice de Saponificação.
P.CONG.	=	Ponto de congelamento, [°F].

2.2.1 Resina poliuretana monocomponente

As resinas poliuretanas monocomponentes são constituídas de pré-polímeros com terminação isocianato que secam e endurecem, ou seja, curam à temperatura ambiente por reação com a umidade do ar. O Instituto de Química de São Carlos (IQSC) da Universidade de São Paulo (USP) desenvolveu um polímero monocomponente derivado do óleo de mamona, com processo de cura pela umidade do ar, objetivando sintetizar um verniz para aplicação em pintura automotiva [33].

Segundo De Carlo [34], este polímero foi processado com auxílio de um reator carregado com óleo de mamona e um antioxidante para manter a mistura sem alterar a cor, devido à oxidação ou polimerização oxidativa do óleo vegetal. Simultaneamente, adicionou-se 30% de solventes, xileno e acetato de etil glicol, em proporções balanceadas, considerando-se o volume da mistura. O processo foi mantido sob atmosfera de gás inerte, com controle térmico e um procedimento adequado para adição de reagentes até total dissolução. Esta resina pode ser utilizada sobre superfícies molhadas, podendo ser aplicada com pincel, rolos, *spray* ou imersão [35].

Conforme avaliações realizadas nas propriedades relativas à aparência, cor, solubilidade em solventes, viscosidade, teor de sólidos e eficiência da adesividade, a poliuretana monocomponente derivada do óleo de mamona, com cura pela umidade do ar, pode ser considerada um produto de fácil aplicação, permanecendo estável ao ser aplicado [34].

Nas análises de termo-degradação, concluiu-se que, sob condições de calor, a temperatura de decomposição da poliuretana monocomponente derivada de óleo de mamona, com cura pela umidade do ar, inicia em torno de 190°C , com uma temperatura de transição vítrea (T_g) de 63°C [34].

Para analisar o nível de toxicidade da poliuretana monocomponente, De Carlo [34] realizou avaliações cromatográficas que determinaram teores de Tolueno Diisocianato (TDI) iguais a 0,6%, classificando o produto como “nocivo à saúde do aplicador”. Entretanto os baixos teores de isocianato ($\text{N}=\text{C}=\text{O}$) contidos no TDI classificam a poliuretana como sendo “não-tóxica”.

2.2.2 Resina poliuretana bicomponente

A resina poliuretana bicomponente derivada do óleo de mamona utilizada neste estudo é formada de dois componentes: um pré-polímero com terminação isocianato e um poliol. 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 poliol mais flexível fica a estrutura da resina. O tempo total de cura é 24 horas à temperatura ambiente e o tempo de manuseio é de aproximadamente 6 minutos [36].

Quando usadas como revestimento, as resinas poliuretanas se impregnam nos poros da matriz se polimerizando em seguida. Após a polimerização, um filme altamente compacto é formado sobre a superfície, encapsulando e protegendo o material suporte, assim, evitando a penetração de agentes agressivos.

A resina poliuretana derivada do óleo de mamona é completamente atóxica, pois não possui, em sua composição, materiais voláteis e metais pesados. Ela também é totalmente isenta de solventes e não é agressiva ao meio ambiente ou ao homem. Possui alta resistência aos agentes agressivos, tais como ácidos, álcalis e bases. Diferentes das poliuretanas de petróleo, não são inflamáveis e, quando queimadas, não emitem gases tóxicos.

2.2.3 Reação de polimerização

Na figura 2.14 [37], tem-se a formação do uretano a partir da reação química entre um grupo hidroxila e um grupo isocianato [30].

A polimerização das resinas poliuretanas ocorre quando um composto com dois ou mais isocianatos em uma estrutura reage com um poliol, ou seja, um álcool polifuncional [38], conforme esquema da figura 2.15 [37].

Figura 2.14: Estrutura do uretano.

Figura 2.15: Polimerização da poliuretana.

A reação de polimerização é exotérmica e sua velocidade depende da estrutura do isocianato e do polioli. A reatividade do isocianato depende da influência dos grupos vizinhos e da configuração da molécula [24].

Geralmente, é feita uma pré-polimerização que consiste da reação de um di ou poliisocianato com um polioli, em proporções determinadas previamente para a obtenção do teor de isocianato livre desejado. Esta pré-polimerização é necessária devido à alta reatividade dos compostos contendo grupos isocianatos. A reação de polimerização ocorre pela mistura do pré-polímero com o polioli final, gerando uma poliuretana de alto peso molecular [37].

Além da reação básica isocianato com hidroxila, durante a polimerização dos poliuretanos, também, podem ocorrer reações paralelas envolvendo os grupos isocianatos. Uma das mais comuns é a reação do isocianato com a água formando ácido carbâmico, que, por sua vez, é instável e se decompõe formando amina primária e dióxido de carbono (CO_2) [39].

2.2.3.1 Polioli

Os isocianatos e os compostos hidroxilados ou polióis são componentes importantes na síntese das poliuretanos. Utiliza-se uma grande variedade de polióis na manufatura de poliuretanos, por exemplo, polióis poliéteres, polióis poliésteres, óleo de mamona, polibutadieno líquido com terminação hidroxílica, entre outros [30].

A maioria dos polióis possui a forma de poliéteres ou poliésteres, figura 2.16 e 2.17 [30], respectivamente. A estrutura do polioli é um fator importante na determinação das propriedades do polímero, mas os principais parâmetros são: massa molecular e funcionalidade. Poliésteres e

poliéteres produzem poliuretanos com propriedades térmicas e tolerância a substâncias corrosivas diferentes. As poliuretanos derivadas de poliéster são mais estáveis e menos oxidáveis [24].

Figura 2.16: Estrutura do poliol poliéter.

Figura 2.17: Estrutura do poliol poliéster.

Os polióis são desenvolvidos com estrutura molecular e funcionalidade necessária para reagir com um pré-polímero ou um diisocianato comercial, podendo gerar poliuretanos com propriedades específicas. A escolha do poliol, especialmente pelo tamanho e flexibilidade de sua estrutura molecular e sua funcionalidade, controla, em grande parte, o grau de entrecruzamento obtido no polímero formado na reação poliol com isocianato [29].

2.2.3.2 Pré-polímero

Em virtude da alta reatividade dos compostos contendo grupos isocianatos, conforme explicado anteriormente, é feita uma pré-polymerização com um poliol na maioria das vezes, embora não seja uma regra, aumentando sua massa molecular, deixando uma porcentagem de isocianato livre para reagir com o poliol final [24].

No mercado existe uma variedade de compostos contendo grupos isocianatos, sendo estes divididos em duas classes distintas [38]:

- a) aromáticos - os mais utilizados são o difenilmetano diisocianato (MDI) e o tolueno diisocianato (TDI), cerca de 95% dos isocianatos consumidos são derivados do MDI e TDI [30];
- b) alifáticos - o hexametileno diisocianato (HDI) e o isofurona diisocianato (IPDI) são os mais utilizados.

O pré-polímero utilizado neste trabalho foi sintetizado a partir do MDI, esquema da figura 2.18, e de um poliol derivado do óleo de mamona. A resina resultante possui alta resistência a

produtos químicos e impede que substâncias agressivas infiltrem na madeira [40].

Figura 2.18: Estrutura do difenilmetano diisocianato (MDI).

2.2.4 Degradação da Poliuretana

A exposição da poliuretana à radiação ultravioleta (UV) provoca modificações químicas e estruturais irreversíveis, sendo estas responsáveis pela degradação de suas propriedades físicas e mecânicas. Tais modificações podem ser mencionadas, como perda de brilho, amarelamento, surgimento de rachaduras, perda da resistência elástica, fragilidade, entre outras [41].

Para aplicações onde a poliuretana é usada como elemento de proteção e/ou material estrutural, a perda de resistência mecânica e o aumento da fragilidade se tornam um fator preocupante.

Aglan, Calhoun e Allie [42] executaram um estudo onde amostras de poliuretana pura - sem adição de aditivos - foram sujeitas a condições de envelhecimento acelerado por meio de ensaios higrotérmicos (HT) e ensaios de UV. A metodologia aplicada no ensaio HT consistiu em ciclos de aquecimento e resfriamento com diferentes graus de umidade e a duração total de cada ciclo térmico foi de 1 semana. Já o envelhecimento por UV foi feito por meio de uma câmara de envelhecimento acelerado equipada com lâmpadas fluorescente UVA. O tempo total de envelhecimento para ambos os ensaios foi de 5 meses. No final de um mês de envelhecimento, três amostras eram retiradas e ensaiadas. Os gráficos que seguem ilustram o comportamento mecânico das amostras submetidas aos dois tipos de envelhecimento [42].

Figura 2.19: Envelhecimento por HT.

Figura 2.20: Envelhecimento por UV.

Por meio da figura 2.19 [42], individua-se a degradação ocorrida na poliuretana exposta à radiação UV. Após 4 meses de exposição, as amostras envelhecidas falharam antes de atingirem 70% de deformação e as amostras expostas por 5 meses não alcançaram 25% de deformação. Por sua vez, as amostras submetidas ao envelhecimento HT não mostraram nenhuma degradação acentuada até a deformação de 100%.

Almeida e Ferreira [43] relataram o comportamento da poliuretana derivada de óleo de mamona quando submetida ao intemperismo artificial. Para a execução do ensaio os autores usaram uma câmara equipada com lâmpadas fluorescentes de baixa pressão, com emissão de radiação UV, sendo a radiação altamente concentrada entre 320 e 390nm. Além da radiação, as amostras ficaram expostas a outros agentes degradantes, tais como calor e vapor d'água. Periodicamente, duas amostras eram retiradas da câmara para a caracterização mecânica. As figuras 2.21 e 2.22 [43] apresentam os gráficos de resistência à tração e alongamento na ruptura em diferentes períodos de exposição ao intemperismo.

Figura 2.21: Resistência à tração das amostras de resina poliuretana vegetal.

Figura 2.22: Alongamento na ruptura das amostras de resina poliuretana vegetal.

Pelos gráficos 2.21 e 2.22 [43], é possível observar que o comportamento da poliuretana, exposta à radiação UV, utilizada neste trabalho se difere do comportamento da poliuretana apresentada no estudo de Aglan e demais autores. A não-concordância dos resultados pode ser decorrente da diferença entre os elementos constituintes da poliuretana.

Uma alternativa para amenizar os efeitos da radiação UV na poliuretana é a adição de estabilizantes ou inibidores de UV. Uma pesquisa desenvolvida por Singh [44] mostrou que a adição de alguns tipos de aditivos reduz os processos de foto-oxidação e amarelamento das poliuretanas.

2.3 GEOSSINTÉTICOS

Nos últimos anos, o uso de materiais geossintéticos tem crescido expressivamente em diversas aplicações da engenharia de transporte, hidráulica, geotécnica, etc. O baixo custo aliado às boas características de filtração, separação, reforço, drenagem e impermeabilização, quando comparados a outros materiais, são algumas das razões para o aumento acelerado do uso desses materiais. Os geossintéticos estão divididos em grupos, cada qual com suas características de produção e aplicação. Os dois maiores grupos em números de venda e uso são os geotêxteis e as geomembranas.

2.3.1 Geotêxteis

A melhoria ou reforço do solo é uma prática comum desde as primeiras civilizações. Acredita-se que, em 3000 a.C., foram feitas as primeiras tentativas do uso de troncos de árvores e pequenos arbustos para a estabilização de pântanos e solos pantanosos. Essa técnica foi usada por gerações até a superfície acidentada ser preenchida e tornar-se completamente lisa. Entretanto a degradação da madeira, com o passar do tempo, era um problema para este tipo de construção [45].

O primeiro relato do uso de tecidos para reforço do solo foi feito em 1935, por Beekham e Mills. Os autores publicaram os resultados da aplicação de um tecido pesado de algodão pelo Departamento de Rodovias da Carolina do Sul, em 1926, na tentativa de reforçar o solo para construção de estradas. Antes de ocorrer a deterioração do tecido, os resultados mostraram que a estrada estava em boas condições e que o tecido reduziu fraturas e falhas localizadas. Atualmente, tecidos degradáveis, como o algodão, tendem a não ser mais utilizados [46].

Os tecidos de fibras naturais foram substituídos pelos geossintéticos poliméricos a partir

do momento em que se iniciou a produção dos polímeros em escala comercial. Os primeiros polímeros produzidos comercialmente foram: cloreto de polivinila (PVC) em 1933, polietileno de baixa densidade (LDPE) e poliamida (PA) - também conhecido como náilon - em 1939, poliestireno expandido (EPS) em 1950, poliéster (PET) em 1953, e polietileno de alta densidade (HDPE) e polipropileno (PP) em 1955 [47]. Hodiernamente, o polímero mais utilizado para a confecção dos geotêxteis é o PP. Aproximadamente, 95% dos geotêxteis são fabricados com fibras de PP, seguidos pelo PET ($\approx 5\%$), polietileno (PE) ($\approx 2\%$) e PA ($\approx 1\%$) [46]. O comportamento mecânico dessas fibras pode ser observado na figura 2.23 [48].

Figura 2.23: Curva carga x deslocamento de cinco fibras a 20°C .

Nota-se que as fibras de poliéster possuem uma maior resistência à tração e menor deformação de ruptura que os demais polímeros. Essa característica apresentada pelas fibras de PET e PA reflete as fortes ligações coesivas intermoleculares dos mesmos, enquanto que, no PP e PE, a menor resistência é causada pelas ligações mais fracas de Van der Waal presentes nesses dois polímeros [48].

A produção do geotêxtil é feita utilizando basicamente quatro modelos principais de fibras poliméricas: monofilamento, multifilamento, laminete e fibrilas (múltiplos laminetes) [49]. Porém, a classificação dos geotêxteis depende do padrão de confecção do material e não do tipo de fibra. As três classes em que os geotêxteis estão divididos são apresentadas na continuidade.

2.3.1.1 Geotêxtil tecido

Os geotêxteis tecidos são materiais obtidos por meio do entrelaçamento de fios, filamentos ou outros componentes, segundo direções preferenciais denominadas trama (sentido transversal)

e urdume (sentido longitudinal) [50]. Geralmente, os geotêxteis tecidos são produzidos em processo de tecelagem convencional, usando tear. Quando são produzidos com monofilamentos ou laminetes, comumente, têm espessura bem fina, aproximadamente $0,5mm$, enquanto os produzidos com multifilamentos possuem espessura de 3 a $5mm$ e, em casos especiais, acima de $10mm$. As figuras 2.24 [47], 2.25 e 2.26 [49] mostram geotêxteis tecidos em tamanho natural e com ampliação de oito vezes, respectivamente.

Figura 2.24: Geotêxtil tecido em tamanho natural.

Figura 2.25: Geotêxtil tecido com 8x de ampliação (multifilamento)

Figura 2.26: Geotêxtil tecido com 8x de ampliação (laminete)

2.3.1.2 Geotêxtil não-tecido

Os geotêxteis não-tecidos, figura 2.27 [47], são materiais compostos por fibras ou filamentos distribuídos aleatoriamente e interligados por processos químicos, mecânicos e/ou térmicos [50].

Figura 2.27: Geotêxtil não-tecido.

No processo de agulhagem - processo mecânico - as fibras ficam dispostas em uma esteira rolante, passando sob uma prancha constituída por uma série de agulhas dentadas. A ligação acontece mediante a penetração das agulhas, repetidas vezes, em toda profundidade do material, a fim de provocar o entrelaçamento das fibras, imagem 2.28 [51]. A espessura associada a este tipo de geotêxtil, geralmente, varia de 2 a 5mm.

Figura 2.28: Geotêxtil não-tecido agulhado com ampliação de 8x.

Nos geotêxteis termoligados, a ligação acontece através da fusão parcial das fibras. Processo que pode provocar a ligação tanto de alguns pontos como também de regiões mais extensas da manta. Esse tipo de geotêxtil, normalmente, apresenta espessura reduzida, variando de 0,5

a $1mm$. Pela figura 2.29 [51], é possível observar a diferença entre o processo de fabricação mecânico e térmico.

Figura 2.29: Geotêxtil não-tecido termoligado com ampliação de 8x.

No caso dos geotêxteis quimicamente ligados, a ligação ocorre através de substâncias químicas, tais como resinas, borracha e colas aplicadas por imersão ou pulverização.

2.3.1.3 Geotêxtil tricotado

São produzidos por entrelaçamento dos laços de um ou mais fios. O padrão do entrelaçamento dos laços é idêntico a pontos de tricô. A figura 2.30 [47] exhibe um geotêxtil tricotado.

Figura 2.30: Geotêxtil não-tecido tricotado

Em condições ideais de serviço, ou antes de sofrer qualquer tipo de degradação, os geotêxteis desempenham bem as funções mecânicas e hidráulicas para as quais foram projetados. A degradação dos geotêxteis é dependente do ambiente e do período no qual será utilizado. Quando exposto ao ar livre, o polímero formador do geotêxtil sofre degradação pela temperatura, poluição e principalmente pela luz ultravioleta (UV). Enterrados no solo, as fibras poliméricas entram em contato com água e diferentes produtos químicos, o que acarreta em uma degradação química.

2.3.1.4 Degradação por exposição à UV

Os principais polímeros utilizados na fabricação de geotêxteis sofrem degradação por UV, mas cada um deles é mais suscetível a um específico comprimento de onda. O PE é mais sensível à degradação UV em comprimentos de onda ao redor de $300nm$, PET ao redor de $325nm$, PVC ao redor de $312nm$ e PP ao redor de $370nm$ [46].

Para avaliar o efeito da radiação UV nos geotêxteis, Brand, em 1988 [52], expôs catorze diferentes amostras ao ar livre na cidade de Hong Kong, por um período de nove meses. Após períodos de exposição de um, três, seis e nove meses, algumas amostras de cada geotêxtil eram recolhidas para análise em laboratório. Antes de serem realizados os ensaios, as amostras foram condicionadas em ambiente com temperatura e umidade controladas e as massas das mesmas foram medidas diariamente até que se estabilizassem. Com a massa estabilizada, ensaios de tração em faixa larga foram executados e os resultados das amostras expostas por um período de um mês evidenciaram uma perda na força de aproximadamente 6% nas amostras de PET e 14% nas demais amostras. As seguintes conclusões foram tiradas após a exposição por longo prazo (nove meses): o PP sem estabilizantes de UV tem a menor resistência ao intemperismo, enquanto o poliéster agulhado sem estabilizantes UV tem desempenho similar ao PP agulhado com estabilizante UV. Demais trabalhos, como os de Cooke, Koerner e Bueno [48, 53, 54], também relatam a menor resistência do PP à degradação ultravioleta.

2.3.1.5 Degradação Química

A resistência do geotêxtil à degradação química é um importante fator em sua durabilidade. Mathur, Netravali e Rourke [55] descreveram a degradação dos geotêxteis em ambientes alcalinos, ácidos e praticamente neutros. Os autores colocaram amostras de geotêxteis não-tecidos, fabricados de fibras de PET e PP, dentro de garrafas de vidro contendo soluções com pH3 (ácido), pH10 (alcalino) e pH variando entre 7,5 e 8,3 (neutro), sendo a solução substituída a cada dez

dias. As garrafas com os geotêxteis foram colocadas em fornos com circulação de ar para acelerar o envelhecimento das amostras. Quatro diferentes temperaturas foram escolhidas para o experimento: 21°C (temperatura ambiente), 45°C , 70°C e 95°C . O período de exposição foi de 2, 6, 12 e 24 semanas. Antes dos ensaios, as amostras foram lavadas em água, por osmose reversa, e secas por no mínimo 24 horas, em temperatura ambiente e umidade relativa de 65%. Os ensaios de resistência à tração mostraram que as fibras de PET são inertes ao ataque químico em temperaturas menores que 70°C , mas, em temperaturas acima da temperatura de transição vítrea (T_g), que é de aproximadamente 73°C , ocorre degradação hidrolítica severa. No PP, não ocorreu nenhuma perda aparente da força. A partir das próximas figuras, é possível verificar os resultados obtidos pelos autores.

Figura 2.31: Efeito do pH03 na resistência à tração do PET.

Figura 2.32: Efeito do pH03 na resistência à tração do PP.

Figura 2.33: Efeito da água do mar na resistência à tração do PET.

Figura 2.34: Efeito da água do mar na resistência à tração do PP.

Figura 2.35: Efeito do pH10 na resistência à tração do PET.

Figura 2.36: Efeito do pH10 na resistência à tração do PP.

Halse [56, 57] também relatou a degradação ocorrida nos geotêxteis de PET imersos em soluções fortemente alcalinas, porém sem aquecimento das amostras. Em seu experimento, as amostras foram mantidas em temperatura de 25°C , por três meses. Água da torneira, hidróxido de sódio (NaOH) e óxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) foram as soluções por ele utilizadas. Passado os três meses, as amostras imersas em solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, com pH12, registraram uma redução de 30% na resistência à tração, enquanto que as imersas na solução de NaOH perderam aproximadamente 53% de sua força.

2.3.2 Geomembrana

As geomembranas são materiais com baixa permeabilidade e que possuem espessura relativamente fina. Geralmente, são usadas para revestimentos e cobertura de líquidos ou sólidos em instalações de armazenamento, tais como aterros sanitários, reservatórios, canais e outras instalações de retenção. A função primária da geomembrana é atuar como barreira, impedindo a liberação de líquidos, vapores ou ambos.

Para possuir baixa permeabilidade o material base da geomembrana deve ter tal característica. Na maioria das aplicações, os materiais usados são asfalto ou polímeros sintéticos. Enquanto poucos polímeros são usados na produção de geotêxteis, uma grande variedade é usada nas geomembranas. Os termoplásticos, elastômeros (ou materiais como borracha) e, mais recentemente, as resinas termorrígidas são os polímeros utilizados na fabricação da geomembranas. Em muitos polímeros, faltam propriedades mecânicas adequadas para serem usados como geotêxteis, mas

podem ser usados como material base das geomembranas em união com os geotêxteis [58].

As geomembranas podem ser divididas em duas classes: as geomembranas produzidas no local de aplicação (*in situ*) e as geomembranas produzidas em fábricas sobre um molde. Em cada classe, dois tipos de geomembranas podem ser alocados: não-reforçadas (algumas vezes chamadas de “homogêneas”) e as reforçadas com material têxtil.

As geomembranas feitas *in situ* não precisam de vários passos de produção antes da instalação (geralmente, as geomembranas produzidas *in situ* não necessitam de costura). Elas são feitas por pulverização ou, caso contrário, colocando um composto viscoso frio ou quente em cima da terra (geomembrana não-reforçada) ou no geotêxtil colocado sobre a terra (geomembrana reforçada). Os geotêxteis mais usados para produzir geomembranas são geralmente não-tecidos agulhados, com gramatura (massa/unidade de área) na faixa entre 200 e 600g/m². Na figura 2.37 [59], individualiza-se a pulverização de um composto sobre o geotêxtil para produção de uma geomembrana.

Figura 2.37: Aplicação de composto sobre geotêxtil.

O controle da espessura do composto pulverizado ou derramado não é uma tarefa tão simples quando as geomembranas são produzidas *in situ*. Sua espessura fica em torno de 3 a 7,5mm. Já as geomembranas produzidas em fábrica têm espessura de 0,25 a 4mm (geomembrana polimérica não-reforçada feita por extrusão ou espalhamento do revestimento) ou 0,25 a 2mm (geomembrana não-reforçada feita por calandragem) [60].

Como o próprio nome já diz, as geomembranas reforçadas possuem maior força mecânica (tração, rasgo, estouro, furo) que as geomembranas não-reforçadas. Além do aumento na força,

pode-se citar uma ou mais das seguintes razões para o uso de tecido nas geomembranas: a) conceder estabilidade ao composto durante o processo de produção; b) fornecer estabilidade dimensional para o composto, que será excessivamente encolhido ou expandido como resultado das mudanças nas condições físicas, tais como temperatura; e c) aumentar o módulo de elasticidade da geomembrana, a fim de diminuir seu alongamento quando sujeito a um esforço [60].

Em relação à permeabilidade, todo material, mesmo os sólidos, tendem a permitir a passagem de fluidos. Permeabilidade é um termo genérico e usado para expressar a propriedade do material sólido em permitir aos fluidos de passarem através de si. Todos os materiais sólidos são mais ou menos permeáveis. Como já mencionado, as geomembranas são projetadas para terem a menor permeabilidade possível, enquanto os geotêxteis têm uma alta permeabilidade. Valores típicos da condutividade hidráulica dos geotêxteis são 10^{-5} até $1m/s$ e 10^{-13} ou menos para as geomembranas. A condutividade hidráulica das geomembranas é muito menor que a condutividade hidráulica da argila, que é o solo menos permeável [60].

A qualidade da geomembrana começa com a escolha do polímero base e o polímero mais utilizado na fabricação de geomembrana é o HDPE. É estimado que aproximadamente 40% das geomembranas comercializadas nos E.U.A sejam de HDPE, porém qualquer polímero pode ser utilizado, desde que atenda às características desejadas para o uso [46].

Hoje em dia, várias resinas poliméricas têm sido estudadas para a verificação de suas propriedades quando utilizadas como polímero base da geomembrana. É uma resina que tem mostrado boa perspectiva é a poliuretana. Algumas patentes recentes [61, 62] mostram os resultados obtidos por essa resina quando utilizada junto com geotêxtil.

Kumar [63, 64] apresentou os resultados que obteve utilizando um geotêxtil não-tecido de PET com uma poliuretana derivada do óleo de mamona. A adição de resinas poliuretanas à base de tolueno diisocianato (TDI) e dicitohexilmetano diisocianato (HMDI) em geotêxteis não-tecidos fibrosos aumentou a estabilidade térmica do compósito quando comparado com membranas de TDI-PU e HMDI-PU sozinhas. Acréscimos nas propriedades mecânicas da poliuretana também foram alcançados com o reforço de geotêxtil não-tecido. Outras propriedades também foram apresentadas pelo autor. As tabelas a seguir expressam os resultados obtidos pelo autor [63, 64]:

Tabela 2.6: Resistência química dos compósitos PU-geotêxtil não tecido de PET.

Reagente químico	Percentagem de perda na resistência à tração dos compósitos após exposição em ambientes químicos	
	Compósito TDI	Compósito HMDI
15 % HCL	0	0
25 % CH ₃ COOH	2.5	1.5
5 % NaOH	9.0	8.9
10 % KMnO ₄	10.9	11.0
Acetato de Metila	25	16
Água destilada	0	0

Tabela 2.7: Percentagem de perda ou melhoria na resistência à tração da poliuretana, baseada no óleo de mamona e compósitos PU-geotêxtil não tecido de PET, após envelhecimento em 100 e 200°C.

Parâmetros	Percentagem de perda ou melhoria na resistência à tração			
	Compósito TDI		Compósito HMDI	
	100°C	200°C	100°C	200°C
Resistência à tração	+37.56	-27.32	+13.34	-13.33
Alongamento na ruptura	-17.64	-48.23	-7.62	-36.24

Tabela 2.8: Propriedades mecânicas da PU, baseada no óleo de mamona e compósitos PU-geotêxtil não tecido de PET.

Material	Resistência à tração (MPa)	Alongamento na ruptura (%)	Módulo de elasticidade (MPa)
Compósito TDI	5.46	40	12.6
TDI-PU	1.25	125	1.42
Compósito HMDI	8.35	105	22
HMDI-PU	1.16	138	1.25

Tabela 2.9: Mudança percentual na espessura e absorção de água na PU e seus correspondentes compósitos em amostras imersas em água por 24 horas em temperatura ambiente.

Composição	Absorção de água (%)	Espessura expandida (%)
Compósito TDI	5.49	7.48
TDI-PU	0.195	7.18
Compósito HMDI	5.2	5.66
HMDI-PU	0.34	8.83

Tabela 2.10: Mudança percentual na espessura e absorção de água na PU e seus correspondentes compósitos em amostras imersas na água em ebulição por 2 horas.

Composição	Absorção de água (%)	Espessura expandida (%)
Compósito TDI	5.5	0.39
TDI-PU	0.931	0.37
Compósito HMDI	5.20	0.15
HMDI-PU	1.46	0.40

Pela tabela 2.6, pode-se observar que, em ambientes alcalinos, o percentual de perda referente a resistência à tração é maior que em ambientes ácidos. Em relação ao envelhecimento pelo calor (48 horas de exposição), detectou-se que a resistência à tração aumenta com a diminuição do percentual de alongamento, após aquecimento em 100°C . Em 200°C , ambos compósitos, TDI e HMDI mostraram uma significativa queda na resistência à tração e percentual de alongamento. Uma significativa descoloração foi obtida nos compósitos de TDI envelhecidos em 200°C .

Capítulo 3

PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS E METODOLOGIA DE ENSAIOS

Previamente aos ensaios mecânicos, de resistividade elétrica e de absorção de umidade, realizou-se a preparação das amostras. Cada ensaio exigiu amostras com geometria específica, sendo que, para os ensaios mecânicos, foram preparadas amostras na forma prismática, com seção retangular e, para os ensaios de resistividade e de absorção, na forma de discos.

3.1 Procedimentos preliminares à realização do ensaio mecânico

3.1.1 Preparação das amostras

De acordo com a norma NBR 7190 [4], os corpos-de-prova submetidos à flexão devem possuir forma prismática, com seção transversal quadrada de 5cm de lado e comprimento de 115cm , na direção paralela às fibras. De preferência, a amostra deve ser produzida com o plano de flexão perpendicular à direção radial da madeira, não se admitindo inclinações de fibras maiores que 6° em relação ao comprimento da peça.

Neste trabalho, foi mantida a forma prismática, porém as dimensões dos corpos-de-prova submetidos aos ensaios diferiram das estabelecidas por norma. Estas modificações foram introduzidas tendo em vista que os corpos-de-prova aqui utilizados são modelos em escala reduzida das cruzetas de madeira de $2,40\text{m}$, instaladas em sistemas de distribuição de energia, que possuem uma seção transversal retangular. O fator de escala foi de 1:6 e a madeira usada foi uma madeira de lei - maior ocorrência na Região Amazônica - conhecida comercialmente como Ange-

lim Vermelho, a qual recebe o nome científico de *Dinizia excelsa Ducke*. As dimensões expostas na figura 3.1 são do modelo produzido.

Figura 3.1: Modelo cruzeta em escala reduzida.

Após o corte, todas as amostras foram pesadas e separadas de acordo com sua massa. As peças escolhidas para o ensaio foram distribuídas aleatoriamente em três classes: madeira *in natura*, madeira resinada e madeira revestida com geotêxtil.

- Madeira *in natura* - madeira em estado natural, sem qualquer tipo de tratamento;
- Madeira resinada - madeira impregnada com uma camada de resina poliuretana;
- Madeira revestida com geotêxtil - madeira recoberta com manta geotêxtil e impregnada com resina poliuretana.

A manta geotêxtil produzida com fibras de poliéster e gramatura de $200g/m^2$ e devidamente resinada cobriu toda a madeira. Como já mencionado no capítulo 2, a resina poliuretana bicomponente usada foi aquela formada pela mistura de dois elementos, um poliol (óleo de mamona) e um pré-polímero em proporções tais que definem a característica final do produto. O processo para preparação da resina, aqui sinteticamente descrito, foi o mesmo usado por Godoy em [28].

O processamento da resina poliuretana seguiu as etapas elencadas na sequência:

1. Em um recipiente plástico, foi despejado o pré-polímero e feita sua pesagem em uma balança de precisão Toledo, com exatidão de $10^{-3}kg$. Ao pré-polímero já pesado, foi adicionado o poliol, como ilustra a figura 3.2. A ordem de adição dos componentes não interfere nas características finais da mistura, ficando a critério do operador. Após alguns testes com

diferentes formulações, optou-se por utilizar a proporção de 1:1,5, isto é, para cada 100 gramas de pré-polímero foram adicionados 150 gramas de polioli.

Figura 3.2: Pesagem dos elementos pré-polímero e polioli.

2. A mistura foi, então, colocada no agitador a vácuo, visualizado na figura 3.3, onde permaneceu por 3 minutos sob vácuo de aproximadamente 635mmHg . Encerrada a mistura dos componentes, o vácuo foi eliminado e o recipiente retirado do agitador. As demais etapas para a preparação dos corpos-de-prova foram realizadas em temperatura e umidade ambiente.

Figura 3.3: Agitador à vácuo.

Com a resina devidamente misturada, passou-se ao estágio de impregnação da madeira. Nas peças de madeira, sem o revestimento de geotêxtil, a resina foi aplicada em toda sua extensão com o auxílio de uma flanela. Já nas revestidas, o corpo-de-prova foi imerso em um recipiente com resina. A figura 3.4 ilustra a sobreposição dos materiais durante a produção das amostras revestidas.

Figura 3.4: Processo de fabricação da madeira revestida com geotêxtil e impregnada com resina poliuretana.

Para atingir o tempo total de cura estabelecido pelo fornecedor, aproximadamente 24 horas, as amostras de madeira resinada e revestidas com geotêxtil foram acondicionadas verticalmente a um suporte como descrito na figura 3.5. Este acondicionamento também facilitou a eliminação do excesso de resina.

Figura 3.5: Suporte para secagem das amostras.

Alcançado o tempo de cura, o composto apresentou uma aparência polida e vítrea, características estas que podem ser claramente vistas nas figuras 3.6 e 3.7. Também se observou que a resina atuou como elemento adesivo no composto geotêxtil e madeira.

Figura 3.6: Corpo-de-prova revestido com manta geotêxtil e resina poliuretana.

Figura 3.7: Detalhe do corpo-de-prova em corte transversal exibindo a composição em camadas.

3.1.2 Ensaio de flexão estática

Os ensaios mecânicos de flexão estática foram efetuados com um carregamento no ponto médio da amostra, em concordância com NBR 7190 [4]. Neste ensaio, o corpo-de-prova deve ser vinculado a dois apoios articulados móveis, com vão livre entre os apoios de $21h$, sendo o equilíbrio do sistema garantido pelo atrito com o atuador, como ilustra a figura 3.8.

Figura 3.8: Esboço do ensaio de flexão.

Os procedimentos básicos para ensaios mecânicos incluem, primeiro, a obtenção do valor máximo de resistência mecânica da peça. Assim, das 21 amostras iniciais, três foram submetidas a este primeiro ensaio, sendo uma madeira nua, uma madeira resinada e uma madeira revestida com geotêxtil. Embora a madeira tenha apresentado um comportamento distinto entre as amostras, esse passo foi necessário para a prévia configuração do equipamento. Para a realização do ensaio utilizou-se uma Máquina Universal de Ensaios da fabricante EMIC denominada DL30000, figura 3.9, com capacidade máxima de $300kN$. A Máquina Universal faz parte da linha digital e atua em conjunto com um microcomputador através da saída padrão RS232.

Figura 3.9: Máquina Universal de Ensaios utilizada no ensaio de flexão estática.

As demais amostras foram submetidas aos ensaios de força aplicada por deformação, sendo medidas em Newton (N) e milímetros (mm). A partir destes valores, foram traçadas retas de força por deformação para cada um dos ensaios (total de 18 ensaios), conforme as figuras 3.10, 3.11 e 3.12. As três retas médias que representam os 6 ensaios para madeiras nuas, 6 para madeiras resinadas e 6 para madeiras revestidas com geotêxtil podem ser observadas na figura 3.13. Dessas curvas, pôde-se calcular a rigidez mecânica dos corpos-de-prova pelo módulo de elasticidade médio.

Figura 3.10: Retas dos 6 corpos-de-prova de madeira nua.

Figura 3.11: Retas dos 6 corpos-de-prova de madeira resinada.

Figura 3.12: Retas dos 6 corpos-de-prova de madeira revestida com geotêxtil.

Figura 3.13: Médias das retas dos 6 corpos-de-prova de madeira nua, 6 de madeira resinada e 6 de madeira revestida com geotêxtil.

A partir das definições da NBR 7190 [4], tem-se que a resistência da madeira à flexão (f_{wM} ou f_M) é um valor convencional, dado pela máxima tensão que pode atuar em um corpo-de-prova no ensaio de flexão simples, calculado com a hipótese de a madeira ser um material elástico, sendo dado por:

$$f_M = \frac{M_{max}}{W_e} \quad (3.1)$$

sendo:

M_{max} é o máximo momento aplicado ao corpo-de-prova, em newtons-metro (N/m);

W_e é o módulo de resistência elástico da seção transversal do corpo-de-prova, dado por $bh^2/6$, em metros cúbicos (m^3).

A rigidez da madeira à flexão é caracterizada pelo módulo de elasticidade determinado no trecho linear do diagrama carga x deslocamento, indicado na figura 3.14 [4].

Figura 3.14: Diagrama carga x flecha na flexão.

Para esta finalidade o módulo de elasticidade dado pela equação 3.2 deve ser determinado pela inclinação da reta secante à curva carga x deslocamento no meio vão, definida pelos pontos $(F_{10\%}; v_{10\%})$ e $(F_{50\%}; v_{50\%})$ correspondentes, respectivamente, a 10% e 50% da carga máxima.

$$E_{M0} = \frac{(F_{M,50\%} - F_{M,10\%})L^3}{(v_{50\%} - v_{10\%})4bh^3} \quad (3.2)$$

sendo:

$F_{M,10\%}$ e $F_{M,50\%}$ são as cargas correspondentes a 10% e 50% da carga máxima, aplicada ao corpo-de-prova, em newtons (N);

$v_{10\%}$ e $v_{50\%}$ são os deslocamentos no meio do vão correspondentes a 10% e 50% da carga máxima F_M , em metros (m);

b e h correspondem, respectivamente, à largura e à altura da seção transversal do corpo-de-prova, em metros (m).

Definidas as equações para o cálculo da resistência, módulo de ruptura (MOR - eq. 3.1), e rigidez, módulo de elasticidade (MOE - eq. 3.2), foi possível determinar as propriedades físicas da madeira na flexão. As tabelas a seguir elencam os valores obtidos para cada amostra, assim como as médias e os desvios padrões.

Tabela 3.1: Módulo de Ruptura (MOR) das amostras

Amostra	Nua (<i>MPa</i>)	Resinada (<i>MPa</i>)	Revestida (<i>MPa</i>)
1	91,14	105,32	99,24
2	70,89	80,00	82,03
3	80,00	97,22	65,83
4	72,91	60,76	72,91
5	82,03	63,80	76,97
6	73,93	85,07	88,10
Média	78,48	82,03	80,85
Desvio Padrão	7,54	17,73	11,80

Tabela 3.2: Módulo de Elasticidade (MOE) das amostras

Amostra	Nua (<i>MPa</i>)	Resinada (<i>MPa</i>)	Revestida (<i>MPa</i>)
1	8932	8210	6928
2	7883	7960	6706
3	7840	9589	8657
4	7223	7109	6965
5	7754	7080	7200
6	8141	7552	7268
Média	7962	7917	7287
Desvio Padrão	563	935	701

Destas tabelas anteriores, é possível verificar que os resultados obtidos nos ensaios mecânicos possuem valores muito próximos. No entanto, qualquer afirmação deve passar previamente por análises estatísticas.

3.2 Procedimentos preliminares à realização dos ensaios elétricos e de absorção

3.2.1 Preparação das amostras

Como anteriormente mencionado, as amostras designadas aos ensaios elétricos e de absorção possuem a forma circular. Para a realização do ensaio foram fabricados 26 corpos-de-prova: 9

de madeira em estado natural, 9 de madeira revestida com geotêxtil e 8 de madeira resinada. A madeira empregada neste ensaio foi do tipo *Pinus*, uma madeira muito conhecida e facilmente encontrada no território nacional. Dentre as diversas variedades da espécie *Pinus*, escolheu-se a *Pinus taeda*, por apresentar melhor impregnação de acordo com Godoy [28]. O modelo das amostras é visualizado na sequência:

Figura 3.15: Modelo do corpo-de-prova em estado natural.

Os corpos-de-prova foram cortados com precisão de $\pm 0,25mm$. As amostras resinadas foram preparadas de modo similar às amostras do ensaio mecânico, com a resina sendo passada com uma flanela e a secagem feita com as amostras penduradas em um suporte. Já as amostras revestidas com geotêxtil apresentaram algumas dificuldades em razão da geometria circular. Um molde, figura 3.16, teve de ser empregado nesta etapa de produção. O molde foi confeccionado em polipropileno para não aderir na resina poliuretana.

Figura 3.16: Molde para a fabricação da madeira revestida com geotêxtil.

Antes da impregnação com resina, a madeira foi completamente revestida com geotêxtil. Após o revestimento, uma pequena quantidade de resina foi despejada no molde inferior e, sobre ele, colocada a madeira revestida. Em seguida, uma grande quantidade de resina foi derramada sobre a amostra e colocado o molde superior, lacrando o corpo-de-prova. As figuras 3.17 e 3.18 mostram como os moldes foram utilizados para a fabricação do compósito.

Figura 3.17: Vista dos três objetos utilizados na produção.

Figura 3.18: Amostra totalmente lacrada entre os moldes.

Após o tratamento, as amostras resinadas passaram a ter as seguintes dimensões: $98mm$ de diâmetro e $10,75mm$ de altura, enquanto as amostras revestidas com geotêxtil: $102,5mm$ de diâmetro e $18mm$ de altura. A figura a seguir expõe os três diferentes tipos de corpos-de-prova:

Figura 3.19: Corpos-de-prova após atingirem o tempo total de cura: (A) Madeira em estado natural; (B) Madeira Resinada; (C) Madeira revestida com geotêxtil.

3.2.2 Ensaio de Resistividade Volumétrica e Superficial

O ensaio elétrico foi efetuado de acordo com a norma internacional ASTM D257 (*Standard Test Methods for DC Resistance or Conductance of Insulating Materials*) [65] e a norma brasileira NBR 5403 (Materiais isolantes elétricos sólidos - Determinação da Resistividade Volumétrica e Superficial) [66].

A resistividade elétrica é um parâmetro importante para estimar a característica dielétrica de um material. Indiretamente, pode-se inferir sobre a ruptura dielétrica em baixa frequência e do fator de dissipação de alguns materiais. A determinação da resistividade volumétrica é frequentemente usada para a verificação da uniformidade do material isolante ou para se detectar impurezas condutivas que afetam a qualidade do material e que não são facilmente detectadas por outros métodos [65].

A resistência superficial muda rapidamente com a umidade, enquanto a resistência volumétrica muda lentamente, embora a mudança final possa eventualmente ser maior.

Os eletrodos empregados no ensaio devem ser de material de fácil aplicação, que assegure íntimo contato com a superfície do corpo-de-prova e que não introduza erros apreciáveis devido à sua resistência elétrica intrínseca. O material do eletrodo deve resistir à corrosão nas condições de ensaio [66].

O esquema para a medição da resistividade é apresentado na figura 3.20.

Figura 3.20: Esquema de configuração representativa dos ensaios de resistividade volumétrica e superficial.

Por meio da figura 3.20, 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). A função do eletrodo guarda é minimizar os erros do efeito do volume - ensaio de resistividade superficial - ou os erros do efeito da superfície, resistividade volumétrica. Estes ensaios foram, portanto, realizados com os seguintes equipamentos: uma fonte/medidor de alta resistência da empresa *Agilent Technologies*, modelo 4339B (representa o item 1 da figura 3.20), e uma célula de resistividade do mesmo fabricante, modelo 16008B (representa os itens 2, 3 e 4 da figura 3.20). Segundo o fabricante, a precisão de medição dos equipamentos é de 0,6% e imagem dos mesmos é apresentada na figura 3.21.

Figura 3.21: Dispositivos utilizados no ensaio de resistividade volumétrica e superficial.

Para verificar o comportamento elétrico dos três tipos de corpos-de-prova, em condições opostas de umidade, os ensaios foram feitos com as amostras secas e, após, imersão em água deionizada por um período de 24 horas.

O primeiro ensaio foi executado com as amostras secas, armazenadas em temperatura ambiente. Neste ensaio, foi possível manter os mesmos parâmetros para as três classes de amostras: tensão de saída $500V$, corrente limite de $500\mu A$, tempo de carregamento de 1 minuto e escala de carga de $8kg$. No momento do ensaio, a temperatura encontrava-se em torno de $25\pm 2^{\circ}C$ e a umidade relativa do ar variou entre 60% a 70%. As tabelas 3.3, 3.4 e 3.5 individualizam os valores obtidos para as amostras secas.

Tabela 3.3: Resistividade Volumétrica e Superficial nas amostras em estado natural

Amostra	Resistividade Volumétrica($\Omega.cm$)	Resistividade Superficial(Ω)
1	$1,4522.10^{11}$	$1,0039.10^{12}$
2	$3,4311.10^{10}$	$5,0152.10^{10}$
3	$1,6235.10^{11}$	$2,2055.10^{12}$
4	$1,9033.10^{10}$	$1,2011.10^{11}$
5	$2,1645.10^{10}$	$8,9518.10^{10}$
6	$1,5633.10^{10}$	$8,4076.10^{10}$
7	$5,3691.10^{10}$	$3,1153.10^{11}$
8	$3,6246.10^{10}$	$3,6598.10^{11}$
9	$8,3373.10^{10}$	$5,3965.10^{11}$
Média	$6,35.10^{10}$	$5,30.10^{11}$
Desvio Padrão	$5,54.10^{10}$	$6,98.10^{11}$

Tabela 3.4: Resistividade Volumétrica e Superficial nas amostras resinadas

Amostra	Resistividade Volumétrica($\Omega.cm$)	Resistividade Superficial(Ω)
1	$1,4592.10^{14}$	$4,1844.10^{14}$
2	$9,1099.10^{13}$	$9,9521.10^{13}$
3	$1,4539.10^{14}$	$1,3102.10^{15}$
4	$1,5434.10^{14}$	$1,4531.10^{15}$
5	$1,8117.10^{14}$	$4,6040.10^{14}$
6	$3,8644.10^{14}$	$3,4117.10^{14}$
7	$2,5614.10^{14}$	$7,1080.10^{14}$
8	$3,9661.10^{14}$	$6,0353.10^{14}$
Média	$2,20.10^{14}$	$6,75.10^{14}$
Desvio Padrão	$1,16.10^{14}$	$4,74.10^{14}$

Tabela 3.5: Resistividade Volumétrica e Superficial nas amostras revestidas com geotêxtil

Amostra	Resistividade Volumétrica($\Omega.cm$)	Resistividade Superficial(Ω)
1	$1,7247.10^{15}$	$1,1216.10^{15}$
2	$2,1909.10^{15}$	$8,7018.10^{15}$
3	$5,0781.10^{14}$	$1,3498.10^{15}$
4	$1,1184.10^{15}$	$2,8322.10^{15}$
5	$2,4150.10^{15}$	$7,0883.10^{15}$
6	$7,7399.10^{14}$	$2,2755.10^{15}$
7	$1,8957.10^{15}$	$1,0776.10^{16}$
8	$1,1936.10^{15}$	$2,6336.10^{15}$
9	$7,7273.10^{15}$	$1,4707.10^{15}$
Média	$2,17.10^{15}$	$4,25.10^{15}$
Desvio Padrão	$2,18.10^{15}$	$3,62.10^{15}$

Após a imersão em água - amostras úmidas - não foi possível manter as mesmas configurações do ensaio das amostras secas para as três classes ensaiadas. Quando a tensão de 500V foi aplicada nas amostras de madeira sem tratamento, ocorreu curto circuito devido à água absorvida pelas amostras. A tensão teve que ser reduzida até 1V para que fosse possível a realização do ensaio. Já nas amostras resinadas e revestidas com geotêxtil, não foi preciso efetuar nenhum tipo de modificação em relação aos parâmetros do ensaio para amostras secas. As condições ambientais - temperatura e umidade - foram mantidas as mesmas do ensaio nas amostras secas. Os resultados após o ensaio de absorção se encontram nas tabelas 3.6, 3.7 e 3.8.

Tabela 3.6: Resistividade Volumétrica e Superficial nas amostras em estado natural após ensaio de absorção

Amostra	Resistividade Volumétrica($\Omega.cm$)	Resistividade Superficial(Ω)
1	$2,2275.10^7$	$2,0329.10^7$
2	$6,0203.10^7$	$2,9614.10^6$
3	$1,8103.10^7$	$1,4273.10^7$
4	$5,0850.10^7$	$2,8793.10^6$
5	$1,5138.10^7$	$1,3491.10^7$
6	$6,1687.10^6$	$4,0207.10^7$
7	$9,1370.10^6$	$1,1745.10^7$
8	$8,4130.10^6$	$1,2620.10^8$
9	$6,7082.10^6$	$2,6779.10^7$
Média	$2,19.10^7$	$2,88.10^7$
Desvio Padrão	$2,00.10^7$	$3,84.10^7$

Tabela 3.7: Resistividade Volumétrica e Superficial nas amostras resinadas após ensaio de absorção

Amostra	Resistividade Volumétrica($\Omega.cm$)	Resistividade Superficial(Ω)
1	$4,1941.10^9$	$2,7887.10^{11}$
2	$5,9449.10^{11}$	$4,6470.10^{11}$
3	$2,2314.10^9$	$1,1883.10^{12}$
4	$1,7513.10^{12}$	$4,6361.10^{15}$
5	$6,3263.10^{11}$	$9,2467.10^8 *$
6	$3,7739.10^{14}$	$7,3862.10^{10}$
7	$3,0712.10^{12}$	$7,4572.10^{13}$
8	$1,7508.10^{13}$	$2,1883.10^{14}$
Média	$5,01.10^{13}$	$7,05.10^{14}$
Desvio Padrão	$1,32.10^{14}$	$1,74.10^{15}$

* A amostra 5 apresentou baixa resistividade superficial após absorção. Esta redução pode ter sido ocasionada por alguma contaminação superficial durante a manipulação da amostra. A tensão teve que ser reduzida até 100V. Assim, a média e o desvio padrão para a resistividade superficial não levam em conta os resultados da amostra 5.

Tabela 3.8: Resistividade Volumétrica e Superficial nas amostras revestidas com geotêxtil após ensaio de absorção

Amostra	Resistividade Volumétrica($\Omega.cm$)	Resistividade Superficial(Ω)
1	$9,7999.10^{14}$	$1,9936.10^{14}$
2	$9,5750.10^{14}$	$4,8137.10^{14}$
3	$4,2650.10^{14}$	$5,1723.10^{15}$
4	$3,6567.10^{15}$	$1,3149.10^{15}$
5	$1,4157.10^{15}$	$1,2667.10^{15}$
6	$8,4003.10^{14}$	$2,0210.10^{15}$
7	$9,0244.10^{14}$	$1,6440.10^{15}$
8	$8,4448.10^{14}$	$3,0085.10^{15}$
9	$2,0251.10^{15}$	$1,5338.10^{15}$
Média	$1,34.10^{15}$	$1,85.10^{15}$
Desvio Padrão	$9,77.10^{14}$	$1,49.10^{15}$

Em ambos os ensaios de resistividade, a diferença entre as médias amostrais dos conjuntos de dados foi de ordem exponencial, portanto sem a necessidade de uma análise estatística para garantir que as amostras revestidas com geotêxtil melhoram as características da madeira.

3.2.3 Ensaio de Absorção

O ensaio de absorção foi realizado segundo a norma internacional ASTM D570 (*Standard Test Method for Water Absorption of Plastics*) [67].

Foi montada uma caixa de polietileno com um suporte para a fixação das amostras no fundo da caixa. O procedimento escolhido para o ensaio foi o de imersão por um período de 24 horas. De acordo com a norma técnica, as amostras devem ficar inteiramente imersas em um recipiente com água destilada e mantida em temperatura de $23 \pm 1^\circ\text{C}$. Após o período de 24 horas, as amostras devem ser retiradas da água e enxugadas, uma a uma, com um tecido seco e pesadas, imediatamente, em uma balança com precisão de 0,001g.

Como as amostras utilizadas no ensaio de absorção também o foram usadas no ensaio de resistividade, a água destilada, definida pela norma, foi substituída por água deionizada para não interferir na resistividade do material. As tabelas a seguir evidenciam os resultados obtidos no ensaio de absorção:

Tabela 3.9: Absorção nas amostras em estado natural

Amostra	Massa seca (g)	Massa úmida (g)	Teor de Umidade (%)
1	35,32	45,96	30,12
2	31,47	51,10	62,38
3	35,18	45,72	29,96
4	32,03	51,65	61,26
5	35,09	57,15	62,87
6	32,43	52,16	60,84
7	37,40	51,39	37,41
8	35,70	57,77	61,82
9	36,83	50,30	36,57
Média	34,61	51,47	49,25
Desvio Padrão	2,13	4,14	15,14

Tabela 3.10: Absorção nas amostras resinadas

Amostra	Massa seca (g)	Massa úmida (g)	Teor de Umidade (%)
1	38,49	40,85	6,13
2	38,39	39,75	3,54
3	38,90	41,26	6,07
4	40,03	41,78	4,37
5	40,79	44,00	7,87
6	38,74	39,90	2,99
7	41,45	42,62	2,82
8	41,17	42,50	3,23
Média	39,75	41,58	4,62
Desvio Padrão	1,27	1,45	1,85

Tabela 3.11: Absorção nas amostras revestidas com geotêxtil

Amostra	Massa seca (g)	Massa úmida (g)	Teor de Umidade (%)
1	102,32	102,99	0,65
2	104,18	105,06	0,84
3	108,46	108,76	0,28
4	110,35	110,46	0,10
5	107,32	108,65	1,24
6	106,75	107,11	0,34
7	108,78	109,50	0,66
8	105,76	106,45	0,65
9	107,85	109,13	1,19
Média	106,86	107,57	0,66
Desvio Padrão	2,47	2,39	0,39

Apesar dos resultados do ensaio de absorção apontarem grande diferença entre as amostras nuas e as amostras tratadas, foi realizada uma análise estatística para assegurar a existência dessa diferença.

3.3 Análise estatística dos resultados mecânicos e de absorção

Como os ensaios foram feitos com um número reduzido de amostras ($n \leq 30$), fez-se necessário o uso da distribuição t de *Student* [68]. Quando o teste t é feito para comparar as médias amostrais de dois conjuntos de dados, é preciso verificar se as variâncias dos conjuntos são semelhantes. Com o objetivo de verificar as variâncias, deve-se executar o teste F [69] descrito pelos passos seguintes:

3.3.1 Teste F

1. Determinar o F_{calc} pela equação 3.3.

$$F_{calc} = \frac{S_{maior}^2}{S_{menor}^2} \quad (3.3)$$

sendo:

S_{maior}^2 é o maior valor do desvio padrão entre os dois conjuntos analisados e S_{menor}^2 , o menor valor.

2. Determinar os graus de liberdade dos conjuntos amostrais, gl , a serem testados:

$$gl_1 = n_1 - 1 = 5 \quad (3.4)$$

$$gl_2 = n_2 - 1 = 5 \quad (3.5)$$

sendo:

n é a quantidade de elementos contidos no respectivo conjunto.

3. Achar o F crítico (F_{crit}) por meio da tabela de distribuição F . Antes, porém, deve-se definir o nível de confiança do teste. Geralmente, o nível de confiança mais utilizado é de 95%, então:

$$\alpha = 1 - 0,95 = 0,05 \quad (3.6)$$

$$F_{\alpha;gl_1;gl_2} = F_{crit}(tabelaF) \quad (3.7)$$

4. Comparar o F_{calc} com o F_{crit} . Se $F_{calc} < F_{crit}$, rejeita-se a hipótese nula, isto é, não há evidências de que as variâncias sejam diferentes, de maneira oposta, se $F_{calc} > F_{crit}$, a hipótese nula não é descartada.

3.3.2 Teste t

1. Determinação das hipóteses estatísticas. Como o objetivo é verificar se a média dos dois conjuntos é igual, distribuição bilateral, as hipóteses foram definidas como:

$$(i) H_0: \mu_A = \mu_B$$

$$(ii) H_1: \mu_A \neq \mu_B$$

2. Escolha do nível de significância. Da mesma forma que no teste F , o nível de significância foi determinado em 95%, equação 3.6.

3. Determinação dos graus de liberdade:

$$gl = n_1 + n_2 - 2 \quad (3.8)$$

sendo:

n_1 e n_2 são os números de amostra dos conjuntos 1 e 2, respectivamente.

4. Determinação do t crítico (t_{crit}). Com os valores de significância e graus de liberdade definidos, é possível consultar a tabela de distribuição t de *Student* para achar o valor crítico.

$$t_{0,05;10} = t_{crit}(tabelat) \quad (3.9)$$

5. Determinação do teste t :

Quando a variância entre amostras é igual:

$$S_{dif} = \sqrt{\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right) \left[\frac{S_1^2(n_1 - 1) + S_2^2(n_2 - 1)}{n_1 + n_2 - 2} \right]} \quad (3.10)$$

Se o tamanho das amostras for igual, a equação pode ser reduzida para:

$$S_{dif} = \sqrt{\frac{S_1^2 + S_2^2}{n}} \quad (3.11)$$

sendo:

n é o número de amostras de cada grupo.

Quando a variância entre amostras é desigual:

$$S_{dif} = \sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}} \quad (3.12)$$

$$gl = \frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1}\right)^2}{n_1 - 1} + \frac{\left(\frac{S_2^2}{n_2}\right)^2}{n_2 - 1}} \quad (3.13)$$

6. Após determinadas todas as variáveis, as mesmas são substituídas na equação abaixo:

$$t = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{S_{dif}} \quad (3.14)$$

sendo:

$\bar{x}_1$ e $\bar{x}_2$ são as médias amostrais dos grupos 1 e 2.

De maneira oposta ao teste F , se $t_{calc} > t_{crit}$, rejeita-se a hipótese nula, isto é, as médias diferem significativamente entre si, por outro lado, se $t_{calc} < t_{crit}$, não se rejeita a hipótese nula, garantindo a similaridade entre as amostras.

As tabelas 3.12 e 3.13 indicam os resultados do teste F para os resultados do ensaio mecânico.

Tabela 3.12: Teste F para Módulo de Ruptura (MOR)

	Nua - Resinada	Nua - Revestida	Resinada - Revestida
F_{calc}	5,53	2,45	2,26

Tabela 3.13: Teste F para Módulo de Elasticidade (MOE)

	Nua - Resinada	Nua - Revestida	Resinada - Revestida
F_{calc}	2,76	1,55	1,78

O valor F_{crit} para ambos os ensaios é de 7,146, portanto maior que todos os F_{calc} . Assim, infere-se que não existem evidências de que as variâncias populacionais sejam diferentes e pode-se efetuar o teste t utilizando a equação 3.11. Os resultados do teste t são apresentados nas tabelas 3.14 e 3.15.

Tabela 3.14: Teste t para Módulo de Ruptura (MOR)

	Nua - Resinada	Nua - Revestida	Resinada - Revestida
t_{calc}	0,45	0,41	0,14

Tabela 3.15: Teste t para Módulo de Elasticidade (MOE)

	Nua - Resinada	Nua - Revestida	Resinada - Revestida
t_{calc}	0,10	1,84	1,32

Por meio da análise estatística é possível afirmar, com 95% de certeza, que não houve modificações referentes às propriedades físicas, módulo de ruptura e módulo de elasticidade na flexão, nas amostras tratadas em relação às amostras nuas, pois o $t_{calc} < t_{crit} = 2,228$ em todas as situações.

O resultado do teste F para o ensaio de absorção é evidenciado na tabela 3.16.

Tabela 3.16: Teste F para absorção

	Nua - Resinada	Nua - Revestida	Resinada - Revestida
F_{calc}	66,84	1515	22,67

Para o ensaio de absorção o $F_{calc} > F_{crit} \simeq 4,5$, consequentemente, não existe equivalência entre as variâncias amostrais.

Estabelecida a desigualdade entre as variâncias, os resultados do teste t são dados pela tabela a seguir:

Tabela 3.17: Teste t para ensaio de absorção

	Nua - Resinada	Nua - Revestida	Resinada - Revestida
t_{calc}	8,77	9,62	5,94
t_{crit}	2,3060	2,3060	2,3646

Como já era previsto, as médias amostrais diferem significativamente entre si, pois o $t_{calc} > t_{crit}$.

Capítulo 4

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

4.1 Conclusões finais

Como contribuição significativa deste trabalho, cita-se o desenvolvimento de um novo compósito de madeira revestida com manta geossintética e impregnada com resina poliuretana, seguido de testes mecânicos e elétricos.

Os ensaios elétricos tiveram o objetivo de determinar a resistividade volumétrica e superficial do composto madeira-geotêxtil-resina poliuretana, de acordo com as normas ASTM D257 [65] e NBR 5403 [66].

Em atinência aos ensaios executados nas amostras armazenadas em temperatura ambiente, as madeiras revestidas com geotêxtil e impregnadas com resina poliuretana apresentaram melhores resultados quando estes foram comparados com àqueles da madeira nua e da madeira resinada, o que significa melhora nesta característica elétrica da madeira. Após a imersão em água, o aumento da condutividade no compósito foi muito menor do que na madeira em estado natural, evidenciando as excelentes propriedades de resistividade do material. As tabelas abaixo sintetizam as conclusões acima mencionadas.

Tabela 4.1: Resultado do ensaio elétrico nas amostras secas

	Valores Médios		
	Nua (Tensão de 500V)	Resinada (Tensão de 500V)	Revestida (Tensão de 500V)
Resistividade Volumétrica($\Omega.cm$)	$6,35.10^{10}$	$2,20.10^{14}$	$2,17.10^{15}$
Resistividade Superficial(Ω)	$5,30.10^{11}$	$6,75.10^{14}$	$4,25.10^{15}$

Tabela 4.2: Resultado do ensaio elétrico nas amostras úmidas

	Valores Médios		
	Nua (Tensão de 1V)	Resinada (Tensão de 500V)	Revestida (Tensão de 500V)
Resistividade Volumétrica($\Omega.cm$)	$2,19.10^7$	$5,01.10^{13}$	$1,34.10^{15}$
Resistividade Superficial(Ω)	$2,88.10^7$	$7,05.10^{14}$	$1,85.10^{15}$

Os ensaios mecânicos seguiram os parâmetros e metodologias da NBR 7190 [4] e tiveram como finalidade determinar a resistência e rigidez mecânica à flexão do composto madeira-geotêxtil-resina poliuretana. Uma comparação com amostras em estado natural e amostras impregnadas com resina poliuretana bicomponente também foi realizada.

Com o auxílio de uma ferramenta estatística foi possível verificar que o novo compósito não interfere nas características físicas da madeira referentes à flexão. Os resultados obtidos entre a madeira nua e a peça impregnada para o ensaio de flexão estão em concordância com os resultados apresentado por Godoy [28]. Entretanto, as amostras revestidas com geotêxtil apresentaram um comportamento peculiar no momento da ruptura. Diferentemente da madeira nua e da madeira resinada, as amostras revestidas não estilhaçaram - região tracionada - no momento da ruptura, figuras 4.1 e 4.2.

Figura 4.1: Estilhaçamento da madeira no momento da ruptura.

Figura 4.2: Ruptura da madeira sem comprometimento do revestimento.

Outra vantagem adquirida pelo compósito após o revestimento com o geotêxtil foi a maior deformação, quando aplicado um esforço, antecedente à ruptura. Esse é um fator relevante, pois diminui a ocorrência de fratura frágil em algumas espécies de madeira, tornando o material mais confiável.

Em relação ao ensaio de absorção, a madeira revestida com geotêxtil diminuiu consideravelmente a permeabilidade da madeira. Esse resultado pode ser muito importante para que se consiga aumentar a vida útil de madeiras expostas ao intemperismo.

De forma geral, o novo compósito apontou resultados superiores quando comparados com a madeira em estado natural, podendo ser um excelente substituto para os tratamentos de preservação utilizados atualmente nos postes e cruzetas.

Outra contribuição deste trabalho foi o desenvolvimento de uma prensa elétrica até duas toneladas apresentada no Apêndice. Ela auxiliará, sobremaneira, os futuros testes de flexão em modelos e sua estrutura possibilita também que seja adaptada para testes em cargas maiores. Atualmente, a implementação do *hardware* para a medição do deslocamento sofrido pelo material durante a aplicação do esforço está em fase de conclusão. Entretanto, medições preliminares da força exercida pelo atuador na madeira foram executadas e os valores obtidos estão em

conformidade com os valores apresentados nas prensas disponíveis comercialmente.

4.2 Trabalhos futuros

Para a continuidade desta pesquisa se propõe a realização de estudos com diferentes formulações da resina poliuretana visando a encontrar uma melhor aderência entre o tecido geotêxtil e a madeira. Outras espécies de madeira devem ser testadas com a intenção de verificar se a porosidade da madeira interfere no processo de adesão.

Testes de envelhecimento acelerado, tais como higrotérmicos e ultravioleta, também, devem ser executados com o objetivo de verificar o comportamento do compósito quando o mesmo for exposto a condições de serviço. O teste de envelhecimento serve para dar uma estimativa da vida útil do material. Os testes de envelhecimento devem ser realizados com amostras puras - sem aditivos - e em amostras com estabilizantes.

Como os postes possuem uma região de contato com o solo, é interessante a realização de ensaios de resistência ao apodrecimento, em que seja possível averiguar se o material é favorável ao crescimento de determinadas espécies de fungos.

A continuação do desenvolvimento da prensa elétrica descrita no apêndice desta dissertação, pois esta poderá ser automatizada, tendo os parâmetros do motor, como velocidade, parada, descida e subida, controlados por um computador e suas medidas de flexão incorporadas ao programa computacional existente.

Referências

- [1] BERTOLINI, M. S. **Emprego de resíduos de *Pinus sp* tratados com preservantes CCB na produção de chapas de partículas homogêneas utilizando resina poliuretana à base de mamona**, 2011. 122 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) - Interunidades Ciências e Engenharia de Materiais - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- [2] CALIL Jr, C.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira**. Manole, 2003. 152 p.
- [3] ASTM36. Standard Specification for Carbon Structural Steel. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM, 2008.
- [4] NBR7190. Projeto de estruturas e madeiras. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, Rio de Janeiro, 1997.
- [5] RITTER, M. A. **Timber Bridges**. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1990. 944 p.
- [6] HOADLEY, R. B. **Understanding Wood**. Taunton Press, 2000. 280 p.
- [7] LABORATORY, F. P. **Wood handbook: Wood as an engineering material**. Madison, WI: U.S., Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. 463 p.
- [8] TORGOVNIKOV, G. I. **Dielectric Properties of Wood and Wood-Based Materials**. Springer-Verlag, 1993. 196 p.
- [9] ROWELL, R. M. **Handbook of wood chemistry and wood composites**. CRC press Boca Raton, 2005. 487 p.
- [10] HELLMEISTER, J. C. **Sobre a determinação das características físicas da madeira**, 1973. 119 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos - Departamento de Engenharia Civil - Universidade de São Paulo, São Carlos,, 1973.
- [11] KERMANI, A. PORTEOUS, J. **Structural Timber Design**. 350 Main Street, Malden, MA 02148-5020, USA, Wiley-Blackwell, 2007. 542 p.
- [12] TAREEV, B. M. **Materials for electrical engineering**. Moscow, Higher School Publishing House Moscow., 1965. 198 p.
- [13] IEEESTD751. IEEE STANDARD 751: Trial-Use Design Guide for Wood Transmission Structures. Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society, Piscataway, New Jersey, 1991.

- [14] KARLSEN, G. G. **Wooden structures**. Mir publishers, 1967. 638 p.
- [15] THELANDERSSON, S. LARSEN, H. J. **Timber engineering**. Wiley, 2003. 446 p.
- [16] KHAN, M. A.; IDRIS ALI, K. M.; WANG, W. Electrical properties and X-ray diffraction of wood and wood plastic composite (WPC). p. p. 303–306, 1991.
- [17] COUTINHO, J. S. **Madeiras**. PORTO, PT, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), 1999. 32-34.
- [18] KOLLMANN, F. F. P. CÔTÉ Jr, W. **Principles of wood science and technology: Solid wood**. New York, Springer-Verlag, 1984. 592 p.
- [19] URIARTT, A. A. *A madeira como material de construção In: Materiais de construção 2, L.A. Falcão Bauer*, cap. Capítulo 17. Livros técnicos e científicos editora, 1992.
- [20] BROWN, H. P.; PANSIN, A. J.; FORSAITH, C. C. **Textbook of Wood Technology: The physical, mechanical, and chemical properties of the commercial woods of the United States**. McGraw-Hill, 1949. 652 p.
- [21] PFEIL, W. PFEIL, M. S. **Estruturas de madeira**. 6 edition, 2003. 224 p.
- [22] KLOSS, J. R. **Síntese e caracterização de poliuretanos biodegradáveis à base de poli(ϵ -caprolactona)**, 2007. 203 f. Tese (Doutorado em Química) - Setor de Ciências Exatas - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.
- [23] WOODS, G. **The ICI Polyurethanes book**. John Wiley & Sons Inc, 1990. 362 p.
- [24] SILVESTRE FILHO, G. D. **Comportamento Mecânico do Poliuretano Derivado de Óleo de Mamona reforçado por Fibra de Carbono: Contribuição para o Projeto de Hastes de Implante de Quadril**, 2001. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos - Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.
- [25] SERVES, V. **Espumas flexíveis de poliuretana à base de polióis de óleo de mamona etoxilado**, 2007. 72 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Instituto de Química - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.
- [26] VILAR, W. D. **Química e tecnologia dos poliuretanos**. Rio de Janeiro, Grupo Pronor, 1993. 203 p.
- [27] RODRIGUES, J. M. E. **Preparação de poliuretana à base de óleo de mamona**, 2005. 142 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Centro de Tecnologia - Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2005.
- [28] GODOY, J. **Estudo de um novo compósito madeira-resina poliuretana para o desenvolvimento de um isolador híbrido**, 2007. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos - Departamento de Engenharia Elétrica - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- [29] PLEPIS, A. M. G. **Caracterização térmica e viscoelástica de resinas poliuretanas derivadas de óleo de mamona**, 1991. 155 f. Tese (Doutorado em Química Analítica) - Instituto de Química de São Carlos - Departamento de Química e Física Molecular - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991.

-
- [30] CANGEMI, J. M. **Biodegração de poliuretano derivado do óleo de mamona**, 2006. 142 f. Tese (Doutorado em Química Analítica) - Instituto de Química de São Carlos - Departamento de Química e Física Molecular - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- [31] HEMERLY, F. Mamona: comportamento e tendências no Brasil. Brasília.
- [32] ARAUJO, L. C. R. **Caracterização química, térmica e mecânica de poliuretanas elastoméricas baseadas em materiais oleoquímicos.**, 1992. 105 f. Dissertação (Mestrado em Química Analítica) - Instituto de Química de São Carlos - Departamento de Química e Física Molecular - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992.
- [33] DA SILVA, S. A. M. **Chapa de média densidade (MDF) fabricada com poliuretana monocomponente derivada de óleo de mamona - caracterização por método destrutivo e por ultra-som**, 2003. 234 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.
- [34] de CARLO, E. **Desenvolvimento e caracterização de um poliuretano monocomponente baseado em óleo vegetal com processo de cura pela umidade do ar.**, 2003. 207 f. Dissertação (Mestrado em Química Analítica) - Instituto de Química de São Carlos - Departamento de Química e Física Molecular - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- [35] AZAMBUJA, M. A. **Estudo experimental de adesivos para fabricação de madeira laminada colada: avaliação da resistência de emendas, da durabilidade e de vigas.**, 2006. 128 f. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) - Interunidades Ciências e Engenharia de Materiais - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- [36] MURAKAMI, C. R. **Aplicação das resinas poliuretanas derivadas de óleo de mamona, como materiais isolantes elétricos**, 2002. 141 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos - Departamento de Engenharia Elétrica - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.
- [37] SILVA, R. V. **Compósito de resina poliuretana derivada de óleo de mamona e fibras vegetais**, 2003. 139 f. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) - Interunidades Ciências e Engenharia de Materiais - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- [38] CLARO NETO, S. **Caracterizações físico-químicas de um poliuretano derivado de óleo de mamona utilizado para implantes ósseos**, 1997. 127 f. Tese (Doutorado em Química Analítica) - Instituto de Química de São Carlos - Departamento de Química e Física Molecular - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.
- [39] ARNOLD, R. G.; NELSON, J. A.; VERBANC, J. J. Recent advances in isocyanate chemistry. p. p. 47–76, 1957.
- [40] PINTO, J. TAKAGI, E. M. Injeções flexíveis para selamento definitivo de infiltrações em túneis e estruturas enterradas. In: Waterproofing of Underground Structures, 2005, São Paulo. **Proceeding...** The International Tunnelling Association (ITA), 2005.
- [41] OPREA, S. OPREA, V. Mechanical behavior during different weathering tests of the polyurethane elastomers films. p. p. 1205–1210, 2002.

- [42] AGLAN, H.; CALHOUN, M.; ALLIE, L. Effect of UV and Hygrothermal Aging on the Mechanical Performance of Polyurethane Elastomers. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 108, p. 558–564, 2008.
- [43] ALMEIDA, A. E. F. S. FERREIRA, O. P. Poliuretana Derivada de Óleos Vegetais Exposta ao Intemperismo Artificial. p. p. 252–256, 2006.
- [44] SINGH, R. P.; TOMER, N. S.; BHADRAIAH, S. V. Photo-oxidation studies on polyurethane coating: effect of additives on yellowing of polyurethane. p. p. 443–446, 2001.
- [45] VERTEMATTI, J. C. **Manual brasileiro de geossintéticos**. Edgard Blücher, 2004. 413 p.
- [46] KOERNER, R. M. **Designing with geosynthetics**. Prentice Hall Upper Saddle River; New Jersey;, 5 edition, 2005. 796 p.
- [47] SHUKLA, S. K. YIN, J. H. **Fundamentals of geosynthetic engineering**. Taylor & Francis, 2006. 410 p.
- [48] COOKE, T. F. REBENFELD, L. Effect of chemical composition and physical structure of geotextiles on their durability. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 7, p. 7–22, 1988.
- [49] BHATIA, S. K. SMITH, J. L. Geotextile characterization and pore-size distribution: Part I. A review of manufacturing processes. **Geosynthetics International**, v. 3, p. 85–105, 1996.
- [50] NBR12553. Geossintéticos: Terminologia. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, Rio de Janeiro, 2003.
- [51] COSTA, C. M. L. **Fluência de Geotêxteis**, 1999. 97 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos - Departamento de Geotcnia - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.
- [52] BRAND, E. W. PANG, P. L. R. Durability of geotextiles to outdoor exposure in Hong Kong. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 117, p. 979–1000, 1991.
- [53] KOERNER, R. M.; LORD Jr, A. E.; HALSE, Y. H. Long-term durability and aging of geotextiles. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 7, p. 147–158, 1988.
- [54] LODI, P. C.; BUENO, B. S.; VILAR, O. M.; CORREIA, N. S. Weathering Degradation of Polyester and Polypropylene Geotextiles. In: 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics, 2008, Shanghai. **Proceeding...** Springer Berlin Heidelberg, 2008. p. 35–39.
- [55] MATHUR, A.; NETRAVALI, A. N.; O'ROURKE, T. D. Chemical aging effects on the physio-mechanical properties of polyester and polypropylene geotextiles. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 13, p. 591–626, 1994.
- [56] HALSE, Y.; KOERNER, R. M.; LORD Jr, A. E. Effect of high levels of alkalinity on geotextiles. Part 1: Ca (OH)₂ solutions. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 5, p. 261–282, 1987.
- [57] HALSE, Y.; KOERNER, R. M.; LORD Jr, A. E. Effect of High Levels of Alkalinity on Geotextiles. Part 2. NaOH Solutions. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 6, p. 295–305, 1987.

- [58] GAMSKI, K. Geomembranes: Classification, use and performance. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 1, p. 85–117, 1984.
- [59] LOOMIS, R. M. Polyurea Geomembranes: High Performance Seamless Liners. In: The First Pan American Geosynthetics Conference & Exhibition, 2008, **Cancun**, 2008.
- [60] GIROUD, J. P. Geotextiles and geomembranes. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 1, p. 5–40, 1984.
- [61] Bayer Corporation (Pittsburg, PA). Peter H. Markusch e Ashok Sarpeshkar e Marylyn Donaldson e W. Tracy Estabrook e Ralf Guether. **Polyurethane geotextile composite liner with improved water resistance and a process for the production thereof**. United States Patent 6669407 B2.
- [62] Bayer Material Science LLC (Pittsburg, PA). Peter H. Markusch e Ralf Guether e Thomas L. Sekelik. **Geotextile/Polyurethane composites based on blocked isocyanate compositions**. United States Patent 20050158131 A1.
- [63] KUMAR, M. N. S. SIDDARAMAIAH. Thermo gravimetric analysis and morphological behavior of castor oil based polyurethane-polyester nonwoven fabric composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 106, p. 3521–3528, 2007.
- [64] KUMAR, M. N. S.; MANJULA, K. S.; SIDDARAMAIAH. Castor oil-based polyurethane-polyester nonwoven fabric composites: Mechanical properties, chemical resistance, and water sorption behavior at different temperatures. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 105, p. 3153–3161, 2007.
- [65] ASTM D257. Standard Test Methods for DC Resistance or Conductance of Insulating Materials. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM, 2007.
- [66] NBR 5403. Determinação da resistividade volumétrica e superficial. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, Rio de Janeiro, 1983.
- [67] ASTM D570. Standard Test Method for Water Absorption of Plastics. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM, 2010.
- [68] ELLISON, S. L. R.; BARWICK, V. J.; FARRANT, T. J. D. **Practical Statistics for the Analytical Scientist**. RSC Publishing, 2009. 282 p.
- [69] RAMACHANDRAN, K. M. TSOKOS, C. P. **Mathematical Statistics with Applications**. Academic Press, 2009. 824 p.
- [70] Cells, B. L. Célula de Carga Rocker Pin - BRT. Disponível em: <http://www.bermanloadcells.com.br/PDF/BRT_10-22t.pdf> Acesso em 15 de novembro de 2010.

Apêndice A

Prensa Elétrica

Em paralelo à realização dos procedimentos experimentais, preparação e ensaio das amostras, uma prensa elétrica foi desenvolvida neste trabalho. A ideia para a montagem do equipamento surgiu da necessidade de se ter um dispositivo de baixo custo que satisfizesse os requisitos de ensaio exigidos pela NBR 7190 [4].

O ponto de partida para a montagem da prensa se baseou na escolha do atuador. No mercado, existe uma variedade de atuadores, sendo os mais comuns os hidráulicos e pneumáticos. No entanto, o controle desses dispositivos requer um sistema complexo, o qual encarece e inviabiliza o projeto. A alternativa encontrada foi o uso de um atuador elétrico, onde o controle é facilmente implementado.

Definido o atuador, o próximo passo foi a determinação da estrutura mecânica que comportaria a carga requerida pelo sistema. A armação de uma prensa controlada manualmente foi usada e o sistema de carga manual substituído por um elétrico.

Uma célula de carga acoplada ao atuador foi a responsável pela medição do esforço aplicado no corpo-de-prova. A célula de carga está conectada em um mostrador digital, o qual está ligado a um computador. A funcionalidade do mostrador é executar a interface entre célula de carga e computador. Para a medição do deslocamento relativo à carga exercida será usado um sensor comercialmente denominado de *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT).

Por meio da figura A.1, é possível notar todos os equipamentos presente no sistema. Na sequência será descrito cada um desses dispositivos.

Figura A.1: Sistema completo da prensa elétrica.

A.1 Estrutura metálica

Optou-se em fazer a montagem da prensa elétrica usando a estrutura metálica de uma prensa hidráulica com capacidade de 15 toneladas, a qual é facilmente encontrada no mercado e apresenta a robustez necessária.

A.2 Mostrador digital

Além de expor para o operador a força exercida pela célula de carga, o mostrador digital tem função vital no sistema de aquisição dos dados, pois o mesmo é dotado de uma porta de comunicação serial RS232, a qual estabelece a comunicação entre o computador e a célula de carga. O modelo do indicador é WT3000 ABS, da fabricante *Weightech*. Esse dispositivo tem uma sensibilidade de $0,3\mu V/d$.

A.3 Computador

Um programa para a aquisição dos dados originados na célula de carga e no sensor de deslocamento foi implementado no aplicativo *Borland C++ Builder*. Para facilitar o manuseio do operador uma tela com botões e algumas informações também foi criada. A imagem da tela do programa é apresentada na figura A.2.

Figura A.2: Tela do *software* de aquisição.

A função dos botões e dos demais objetos presentes na tela é relatada na continuidade:

- Porta - refere-se à entrada serial que o sensor está conectado.
- Conectar - botão responsável por efetuar a conexão entre o computador e o indicador da célula de carga. A conexão só será estabelecida se a porta selecionada estiver correta. Se o endereço da porta estiver incorreto, o programa emitirá uma mensagem alertando o usuário sobre o erro. Quando a conexão for feita, o *Status Conexão* mudará para a cor verde e com a escrita - conectado.
- Iniciar Aquisição - após iniciada a conexão, o clique neste botão inicia a aquisição dos dados. Se a conexão com o indicador ainda não foi efetuada, o clique no botão emitirá uma mensagem de erro. No momento em que é iniciada a aquisição, os dados são enviados para as respectivas caixas indicadas no programa, Força (kN), Massa (kg) e Deformação (mm). O campo massa só é utilizado para a conferência dos dados relativos à célula de carga. O gráfico também é traçado em tempo real, após o clique no botão Iniciar Aquisição.
- Parar Aquisição - para a aquisição a qualquer momento.
- Apagar dados - botão utilizado para apagar os valores contidos em todas as caixas do programa e também apagar o gráfico. Por motivo de segurança, sempre que esse botão é acionado, uma mensagem é mostrada na tela perguntando se o operador realmente deseja excluir os dados.
- Salvar gráfico - quando esse botão é pressionado, o gráfico é salvo em formato Bitmap.
- Exportar dados - exporta todos os dados para um arquivo.txt.
- Campo informações - apresenta a força máxima atingida no ensaio e também a deformação sofrida pela amostra neste momento.

A.4 Atuador elétrico

O atuador adquirido é comercializado como um macaco elétrico automotivo, figura A.3, produzido pela *Schulz*. Como o macaco é utilizado em automóveis, sua tensão de alimentação é a mesma da bateria, 12V. O macaco também possui uma limitação em relação ao esforço suportado, atingindo a carga máxima de 2 toneladas.

Algumas modificações foram feitas no esqueleto do macaco para garantir a fixação na estrutura metálica com segurança. O controle manual e o adaptador para o acendedor de cigarros também foram removidos do equipamento.

Figura A.3: Macaco elétrico.

A.5 Célula de carga

Como já mencionado anteriormente, a célula de carga, figura A.4, é responsável pela medição da carga exercida pelo atuador. A célula é fabricada pela empresa *Berman Load Cells* e o modelo usado no trabalho é o BRT 10T.

Figura A.4: Célula de carga.

Na tabela que segue, estão algumas especificações da célula de carga disponíveis no site do fabricante [70]:

Tabela A.1: Parâmetros da Célula de carga

Capacidade Máxima	10 toneladas
Sensitividade	$2,85 \pm 0,005 \text{ mV/V}$
Erro total	$\pm 0,02 \%$
Limite de carga de segurança	150% da capacidade nominal
Sobrecarga de ruptura	300% da capacidade nominal

Figura A.5: Circuito ponte H.

Figura A.6: Circuito fonte ajustável.