UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS
INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS

**Influência da impregnação com estireno e com metacrilato de
metila em propriedades físicas e mecânicas da madeira de
Eucalyptus grandis e de *Pinus caribaea* var. *hondurensis***

DENISE ORTIGOSA STOLF

Tese apresentada à Área Interunidades em
Ciência e Engenharia de Materiais, da
Universidade de São Paulo, como parte dos
requisitos para a obtenção do Título de
Doutora em Ciência e Engenharia de
Materiais.

Orientador: Francisco Antonio Rocco Lahr

São Carlos

2005

*Ao meu companheiro Weber, aos meus pais
Luiz Roberto e Maria Eloiza e às minhas
irmãs Adriana e Patricia, pelo incentivo,
auxílio e apoio integral em todos os
momentos.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Francisco Antonio Rocco Lahr pela sua orientação, amizade e dedicação profissional durante a elaboração e execução deste trabalho.

Em especial agradeço ao Weber por todo incentivo e compreensão, aos meus pais e às minhas irmãs, que são as pessoas mais importantes na minha vida.

À Débora Terezia Balogh (IFSC), pela ajuda e pelas dicas importantes na parte experimental do trabalho. Aos Professores José Augusto Marcondes Agnelli (UFSCar) e Roberto Mendonça Faria (IFSC) pelo auxílio na definição dos materiais utilizados neste trabalho.

Ao Professor Antonio Aprigio da Silva Curvelo pela preciosa ajuda na análise microscópica das madeiras.

À Professora Mariangela Tassinari de Figueiredo (IFSC) pela amizade e conselhos durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu tio, o Professor Mário César Cunha, e à minha irmã Adriana pelo auxílio na elaboração de algumas figuras.

A todos os amigos do LaMEM, em especial: Cristiane, Edna, Elen, Fabrício, Fátima e Thalita pela amizade e pelo apoio ao longo dos preciosos anos de convivência.

Aos funcionários do LaMEM: Cido, Silvio, Roberto, Samuel e Tânia. Em especial agradeço ao Arnaldo, Jaime e Bragatto pela boa vontade e ajuda essenciais para a realização deste trabalho.

Ao técnico Carlos, da Central de Análises Química Instrumental (IQSC), pelas micrografias.

Agradeço a: Wladerez e Cristiane do Serviço de Pós-Graduação da Interunidades, Beth e Samira da Assistência Técnica Acadêmica do IFSC e Alessandra e Loren da Diretoria da EESC, pelos conselhos, amizade e paciência em todos os sentidos.

Aos Professores que fizeram parte da banca do meu Exame Geral de Qualificação pelas sugestões e observações valiosas e pertinentes.

À Companhia Brasileira de Estireno, de Cubatão/SP, à Companhia Química Metacril, de São Bernardo do Campo/SP e à empresa DML Produtos Químicos Ltda., de São Paulo/SP, pelo fornecimento dos produtos químicos utilizados no trabalho. Também agradeço à Eucatex SA, de Botucatu/SP, por permitir o uso de seu laboratório.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de estudos concedida, que se revelou fundamental para que o trabalho fosse realizado.

E a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a conclusão deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xvi
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xviii
RESUMO.....	xx
ABSTRACT.....	xxi
1- INTRODUÇÃO.....	1
2- JUSTIFICATIVA.....	3
3- OBJETIVOS.....	4
4- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
4.1- Madeira.....	5
4.1.1- As árvores.....	6
4.1.2- Estrutura e composição química da madeira.....	7
4.1.3- Umidade da madeira.....	10
4.2- Polímeros.....	11
4.2.1- Plásticos.....	14
4.2.1.1- Termoplásticos.....	14
4.2.1.2- Termorrígidos.....	14
4.2.2- Fibras poliméricas.....	15
4.2.3- Borrachas ou elastômeros.....	15
4.3- Compósitos polímero-madeira (CPMs).....	16
4.3.1- Impregnação.....	16
4.3.1.1- Imersão.....	17

4.3.1.2- Vácuo-imersão.....	17
4.3.1.3- Vácuo-pressão.....	17
4.3.2- Polimerização.....	18
4.3.3- Madeiras e monômeros utilizados na obtenção de CPMs.....	18
4.3.4- Contribuições da literatura.....	19
4.4- Considerações finais sobre a revisão bibliográfica.....	23
5- MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
5.1- Madeiras.....	24
5.1.1- <i>Eucalyptus grandis</i>	24
5.1.2- <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	25
5.2- Ensaio para a determinação das propriedades de madeiras impregnadas e não impregnadas.....	26
5.3- Retirada e identificação dos corpos-de-prova.....	28
5.4- Produtos químicos.....	32
5.4.1- Estireno.....	32
5.4.2- Metacrilato de metila.....	33
5.4.3- Peróxido de benzoíla.....	34
5.5- Fases do processo obtenção dos CPMs.....	35
5.5.1- Secagem da madeira.....	35
5.5.2- Monômeros e iniciador.....	36
5.5.3- Dosagem requerida.....	36
5.5.4- Impregnação e polimerização.....	36
5.6- Equipamentos utilizados.....	38
5.7- Laboratórios.....	42
5.8- Procedimentos para análise dos resultados.....	43
6- APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	44

6.1- Etapa A - <i>Eucalyptus grandis</i>	44
6.1.1- Sem impregnação, impregnado com estireno e com metacrilato de metila, à pressão de impregnação 0,66 MPa.....	44
6.1.1.1- Propriedades físicas e mecânicas.....	44
6.1.1.2- Análise e discussão dos resultados.....	49
6.2- Etapa A - <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	53
6.2.1- Sem impregnação, impregnado com estireno e com metacrilato de metila, à pressão de impregnação 0,66 MPa.....	53
6.2.1.1- Propriedades físicas e mecânicas.....	53
6.2.1.2- Análise e discussão dos resultados.....	58
6.3- Etapa B - <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	63
6.3.1- Sem impregnação e impregnado com metacrilato de metila.....	63
6.3.1.1- Propriedades mecânicas à pressão de impregnação 0,66 MPa...	63
a) Módulo de resistência à flexão estática (f_M) e Módulo de elasticidade longitudinal na flexão estática (f_{M0}).....	63
b) Taxa de desgaste (abrasão).....	66
6.3.1.2- Influência do intemperismo artificial em propriedades mecânicas.....	67
6.3.1.3- Influência da pressão de impregnação em propriedades mecânicas.....	70
6.4- Propriedades dos compósitos de PC e de algumas espécies de uso consagrado.....	73
7- CONCLUSÕES.....	74
ANEXO I.....	76
ANEXO II.....	78
ANEXO III.....	79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	120

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Direções principais da madeira.....	6
Figura 2- Estrutura celular do lenho de uma conífera.....	7
Figura 3- Estrutura celular do lenho de uma dicotiledônea.....	8
Figura 4- Modelo da estrutura celular de traqueídes de coníferas e fibras de folhosas, onde: LM= lamela média, P= parede primária, S1= camada 1 da parede secundária, S2= camada 2 da parede secundária, S3= camada 3 da parede secundária, W= camada verrugosa.....	9
Figura 5- Representação esquemática da estrutura molecular dos polímeros: a) linear, b) ramificado, c) ligação cruzada e d) em rede (tri-dimensional).....	12
Figura 6- Comparação entre a deformação de corpos-de-prova de <i>Tilia Americana</i> tratada e não tratada no ensaio de: a) flexão estática; b) compressão paralela às fibras.....	20
Figura 7- Plantação de <i>Eucalyptus grandis</i>	25
Figura 8- Plantação de <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	26
Figura 9- Esquema da retirada dos corpos-de-prova da viga de madeira na Etapa A, para a determinação de: a) Resistência e Módulo de elasticidade longitudinal na tração paralela às fibras; b) Dureza paralela e Dureza normal às fibras; c) Resistência e Módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras; d) Resistência à tração normal às fibras; e) Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; f) Tenacidade e Resistência ao impacto na flexão; g) Densidade; h) Retratabilidade radial total, Retratabilidade tangencial total, Inchamento radial total e Inchamento tangencial total.....	29
Figura 10- Representação dos CPs utilizados para ensaios da Etapa A.....	30
Figura 11- Esquema da retirada dos corpos-de-prova da viga de madeira na Etapa B, para a determinação de: b) Dureza paralela e Dureza normal às fibras; c) Resistência e Módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras; i) Módulo de resistência e Módulo de elasticidade longitudinal na flexão estática.....	30
Figura 12- Representação dos CPs utilizados para ensaios de flexão estática, Etapa B.	31
Figura 13- Representação dos CPs utilizados para ensaios de compressão paralela às fibras e, durezas paralela e normal às fibras, da Etapa B.....	31
Figura 14- Representação dos CPs utilizados para ensaios de desgaste mecânico, Etapa B.....	31

Figura 15- Esquema do processo de impregnação: a) amostra sem impregnação; b) autoclave; c) amostras no interior da autoclave; d) amostra impregnada.....	37
Figura 16- Esquema do processo de polimerização: a) retirada do excesso de produto químico da superfície da amostra; b) amostra envolvida por papel alumínio; c) estufa com amostras; d) compósito polímero-madeira.....	38
Figura 17- Máquina de Ensaio Universal AMSLER.....	40
Figura 18- Equipamento para determinação da tenacidade da madeira.....	40
Figura 19- Máquina de Envelhecimento Acelerado.....	41
Figura 20- Máquina de Abrasão.....	41
Figura 21- Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).....	42
Figura 22- Comparação entre as massas do EG - (si) e (i-E), média de doze CPs para cada propriedade.....	45
Figura 23- Comparação entre as massas do EG - (si) e (i-M), média de doze CPs para cada propriedade.....	46
Figura 24- Comparação entre as propriedades físicas do EG - (si), (i-E) e (i-M), média de doze CPs para cada propriedade.....	47
Figura 25- Comparação entre as propriedades mecânicas do EG - (si), (i-E) e (i-M), média de doze CPs para cada propriedade.....	47
Figura 26- Comparação entre as propriedades mecânicas do EG - (si), (i-E) e (i-M), média de doze CPs para cada propriedade.....	48
Figura 27- Comparação entre as propriedades mecânicas do EG - (si), (i-E) e (i-M), média de doze CPs para cada propriedade.....	48
Figura 28- Estrutura microscópica do <i>Eucalyptus grandis</i> observada ao Microscópio Eletrônico de Varredura: a) sem impregnação; b) impregnado com estireno; c) impregnado com metacrilato de metila.....	52
Figura 29- Curva característica de secagem para madeira de <i>Eucalyptus grandis</i>	53
Figura 30- Comparação entre as massas do PC - (si) e (i-E), média de doze CPs para cada propriedade.....	54
Figura 31- Comparação entre as massas do PC - (si) e (i-M), média de doze CPs para cada propriedade.....	55
Figura 32- Comparação entre as propriedades físicas do PC - (si), (i-E) e (i-M), média de doze CPs para cada propriedade.....	56
Figura 33- Comparação entre as propriedades mecânicas do PC - (si), (i-E) e (i-M), média de doze CPs para cada propriedade.....	56

Figura 34- Comparação entre as propriedades mecânicas do PC - (si), (i-E) e (i-M), média de doze CPs para cada propriedade.....	57
Figura 35- Comparação entre as propriedades mecânicas do PC - (si), (i-E) e (i-M), média de doze CPs para cada propriedade.....	57
Figura 36- Estrutura microscópica do <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> observada ao Microscópio Eletrônico de Varredura: a) sem impregnação; b) impregnado com estireno; c) impregnado com metacrilato de metila.....	63
Figura 37- Comparação entre as massas do PC - (si) e (i-M), média de seis CPs para cada propriedade.....	64
Figura 38- Comparação entre as propriedades mecânicas do PC - (si) e (i-M), média de seis CPs para cada propriedade.....	65
Figura 39- Comparação entre a massa inicial (m_i) e a massa final (m_f) do PC - (si) e (i-M), média de três CPs para cada propriedade.....	67
Figura 40- Comparação entre as propriedades mecânicas do PC - (si) e (si / Env), média de seis CPs para cada propriedade.....	68
Figura 41- Comparação entre as propriedades mecânicas do PC - (i-M) e (i-M / Env), média de seis CPs para cada propriedade.....	69
Figura 42- Resistência à compressão paralela às fibras versus pressão em CPs de PC..	71
Figura 43- Módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras versus pressão em CPs de PC.....	72
Figura 44- Dureza paralela às fibras versus pressão em CPs de PC.....	72
Figura 45- Dureza normal às fibras versus pressão em CPs de PC.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Classificação de polímeros.....	13
Tabela 2- Comparação entre as amostras de Japanese cedar não tratadas e impregnadas.....	22
Tabela 3- Algumas características do monômero de estireno.....	33
Tabela 4- Algumas características do monômero de metacrilato de metila.....	34
Tabela 5- Algumas características do peróxido de benzoíla.....	35
Tabela 6- Valores médios das massas do EG - (si) e (i-E).....	45
Tabela 7- Valores médios das massas do EG - (si) e (i-M).....	45
Tabela 8- Valores médios das propriedades físicas e mecânicas do EG - (si), (i-E) e (i-M).....	46
Tabela 9- Variação percentual média das massas do EG (i-E) e (i-M) em relação ao EG (si).....	49
Tabela 10- Variação percentual média das propriedades físicas e mecânicas do EG (i-E) e (i-M) em relação ao EG (si).....	49
Tabela 11- Intervalos de confiança entre: EG (si) e (i-E) / EG (si) e (i-M) / EG (i-E) e (i-M).....	50
Tabela 12- Valores médios das massas do PC - (si) e (i-E).....	54
Tabela 13- Valores médios das massas do PC - (si) e (i-M).....	54
Tabela 14- Valores médios das propriedades físicas e mecânicas do PC - (si), (i-E) e (i-M).....	55
Tabela 15- Variação percentual média das massas do PC (i-E) e (i-M) em relação ao PC (si).....	58
Tabela 16- Variação percentual média das propriedades físicas e mecânicas do PC (i-E) e (i-M) em relação ao PC (si).....	58
Tabela 17- Intervalos de confiança entre: PC (si) e (i-E) / PC (si) e (i-M) / PC (i-E) e (i-M).....	61
Tabela 18- Valor médio da massa do PC - (si) e (i-M), no ensaio de flexão estática..	64
Tabela 19- Valores médios das propriedades mecânicas do PC - (si) e (i-M).....	64

Tabela 20- Variação percentual média da massa do PC (i-M) em relação ao PC (si)..	65
Tabela 21- Variação percentual média das propriedades mecânicas do PC (i-M) em relação ao PC (si).....	65
Tabela 22- Intervalos de confiança entre: PC (si) e (i-M).....	66
Tabela 23- Variação percentual média das massas e taxa de desgaste do PC (si) e (i-M), no ensaio de desgaste mecânico.....	67
Tabela 24- Valores médios das propriedades mecânicas do PC - (si) e (si - Env).....	68
Tabela 25- Valores médios das propriedades mecânicas do PC - (i-M) e (i-M - Env)..	68
Tabela 26- Variação percentual média das propriedades mecânicas do PC (si / Env) e (i-M / Env) em relação ao PC (si) e (i-M) sem envelhecimento.....	69
Tabela 27- Valores médios da massa do PC - (si) e (i-M), à P = 0,22 MPa.....	70
Tabela 28- Valores médios da massa do PC - (si) e (i-M), à P = 0,44 MPa.....	70
Tabela 29- Valores médios das propriedades mecânicas do PC - (si) e (i-M), à P = 0,22 e 0,44 MPa.....	70
Tabela 30- Variação percentual média das massas do PC (i-M), à P = 0,22 e 0,44 MPa, em relação ao PC (si).....	71
Tabela 31- Variação percentual média das propriedades mecânicas do PC (i-M), à P = 0,22 e 0,44 MPa, em relação ao PC (si).....	71
Tabela 32- Valores médios das propriedades do PC - (i-E) e (i-M) comparados com os do Angelim vermelho, Ipê, Itaúba e Jatobá.....	73
Tabela 33- Preço dos produtos em Janeiro de 2005.....	78
Tabela 34- Massa dos CPs de EG - (si) e (i-E), no ensaio de densidade.....	79
Tabela 35- Massa dos CPs de EG - (si) e (i-M), no ensaio de densidade.....	80
Tabela 36- Densidade dos CPs de EG - (si), (i-E) e (i-M).....	80
Tabela 37- Massa dos CPs de EG - (si) e (i-E), no ensaio para a determinação da retratibilidade radial e tangencial total e do inchamento radial e tangencial total.....	81
Tabela 38- Massa dos CPs de EG - (si) e (i-M), no ensaio para a determinação da retratibilidade radial e tangencial total e do inchamento radial e tangencial total.....	81
Tabela 39- Retratibilidade radial total dos CPs de EG - (si), (i-E) e (i-M).....	82
Tabela 40- Retratibilidade tangencial total dos CPs de EG - (si), (i-E) e (i-M).....	82
Tabela 41- Inchamento radial total dos CPs de EG - (si), (i-E) e (i-M).....	83

Tabela 42- Inchamento tangencial total dos CPs de EG - (si), (i-E) e (i-M).....	83
Tabela 43- Massa dos CPs de EG - (si) e (i-E), no ensaio de compressão paralela às fibras.....	84
Tabela 44- Massa dos CPs de EG - (si) e (i-M), no ensaio de compressão paralela às fibras.....	84
Tabela 45- Resistência à compressão paralela às fibras dos CPs de EG - (si), (i-E) e (i-M).....	85
Tabela 46- Módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras dos CPs de EG - (si), (i-E) e (i-M).....	85
Tabela 47- Massa dos CPs de EG - (si) e (i-E), no ensaio de tração paralela às fibras.....	86
Tabela 48- Massa dos CPs de EG - (si) e (i-M), no ensaio de tração paralela às fibras.....	86
Tabela 49- Resistência à tração paralela às fibras dos CPs de EG - (si), (i-E) e (i-M)..	87
Tabela 50- Módulo de elasticidade longitudinal na tração paralela às fibras dos CPs de EG - (si), (i-E) e (i-M).....	87
Tabela 51- Massa dos CPs de EG - (si) e (i-E), no ensaio de tração normal às fibras.....	88
Tabela 52- Massa dos CPs de EG - (si) e (i-M), no ensaio de tração normal às fibras.....	88
Tabela 53- Resistência à tração normal às fibras dos CPs de EG - (si), (i-E) e (i-M)...	89
Tabela 54- Massa dos CPs de EG - (si) e (i-E), no ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.....	89
Tabela 55- Massa dos CPs de EG - (si) e (i-M), no ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.....	90
Tabela 56- Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras dos CPs de EG - (si), (i-E) e (i-M).....	90
Tabela 57- Massa dos CPs de EG - (si) e (i-E), no ensaio para a determinação das durezas paralela e normal às fibras.....	91
Tabela 58- Massa dos CPs de EG - (si) e (i-M), no ensaio para a determinação das durezas paralela e normal às fibras.....	91
Tabela 59- Dureza paralela às fibras dos CPs de EG - (si), (i-E) e (i-M).....	92
Tabela 60- Dureza normal às fibras dos CPs de EG - (si), (i-E) e (i-M).....	92

Tabela 61- Massa dos CPs de EG - (si) e (i-E), no ensaio de impacto na flexão.....	93
Tabela 62- Massa dos CPs de EG - (si) e (i-M), no ensaio de impacto na flexão.....	93
Tabela 63- Tenacidade dos CPs de EG - (si), (i-E) e (i-M).....	94
Tabela 64- Resistência ao impacto na flexão dos CPs de EG - (si), (i-E) e (i-M).....	94
Tabela 65- Valores de $\bar{x}_m$ e s_m das populações P _A , P _B e P _C para o EG.....	95
Tabela 66- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-E), no ensaio de densidade.....	96
Tabela 67- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-M), no ensaio de densidade.....	96
Tabela 68- Densidade dos CPs de PC - (si), (i-E) e (i-M).....	97
Tabela 69- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-E), no ensaio para a determinação da retratibilidade radial e tangencial total e do inchamento radial e tangencial total.....	97
Tabela 70- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-M), no ensaio para a determinação da retratibilidade radial e tangencial total e do inchamento radial e tangencial total.....	98
Tabela 71- Retratibilidade radial total dos CPs de PC - (si), (i-E) e (i-M).....	98
Tabela 72- Retratibilidade tangencial total dos CPs de PC - (si), (i-E) e (i-M).....	99
Tabela 73- Inchamento radial total dos CPs de PC - (si), (i-E) e (i-M).....	99
Tabela 74- Inchamento tangencial total dos CPs de PC - (si), (i-E) e (i-M).....	100
Tabela 75- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-E), no ensaio de compressão paralela às fibras.....	100
Tabela 76- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-M), no ensaio de compressão paralela às fibras.....	101
Tabela 77- Resistência à compressão paralela às fibras dos CPs de PC - (si), (i-E) e (i-M).....	101
Tabela 78- Módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras dos CPs de PC - (si), (i-E) e (i-M).....	102
Tabela 79- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-E), no ensaio de tração paralela às fibras...	102
Tabela 80- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-M), no ensaio de tração paralela às fibras..	103
Tabela 81- Resistência à tração paralela às fibras dos CPs de PC - (si), (i-E) e (i-M)..	103
Tabela 82- Módulo de elasticidade longitudinal na tração paralela às fibras dos CPs de PC - (si), (i-E) e (i-M).....	104
Tabela 83- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-E), no ensaio de tração normal às fibras...	104

Tabela 84- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-M), no ensaio de tração normal às fibras...	105
Tabela 85- Resistência à tração normal às fibras dos CPs de PC - (si), (i-E) e (i-M)...	105
Tabela 86- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-E), no ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.....	106
Tabela 87- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-M), no ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.....	106
Tabela 88- Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras dos CPs de PC - (si), (i-E) e (i-M).....	107
Tabela 89- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-E), no ensaio para a determinação das durezas paralela e normal às fibras.....	107
Tabela 90- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-M), no ensaio para a determinação das durezas paralela e normal às fibras.....	108
Tabela 91- Dureza paralela às fibras dos CPs de PC - (si), (i-E) e (i-M).....	108
Tabela 92- Dureza normal às fibras dos CPs de PC - (si), (i-E) e (i-M).....	109
Tabela 93- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-E), no ensaio de impacto na flexão.....	109
Tabela 94- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-M), no ensaio de impacto na flexão.....	110
Tabela 95- Tenacidade dos CPs de PC - (si), (i-E) e (i-M).....	110
Tabela 96- Resistência ao impacto na flexão dos CPs de PC - (si), (i-E) e (i-M).....	111
Tabela 97- Valores de $\bar{x}_m$ e s_m das populações P _A , P _B e P _C para o PC.....	112
Tabela 98- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-M), no ensaio de flexão estática.....	113
Tabela 99- Módulo de resistência à flexão estática dos CPs de PC - (si) e (i-M).....	113
Tabela 100- Módulo de elasticidade longitudinal na flexão estática dos CPs de PC - (si) e (i-M).....	113
Tabela 101- Valores de $\bar{x}_m$ e s_m da população P _B para o PC.....	114
Tabela 102- Massa dos CPs de PC - (si) antes e depois do ensaio de desgaste mecânico, de 3000 ciclos.....	114
Tabela 103- Massa dos CPs de PC - (i-M) antes e depois do ensaio de desgaste mecânico, de 3000 ciclos.....	114
Tabela 104- Resistência à compressão paralela às fibras dos CPs de PC - (si) e (si - Env).....	115

Tabela 105- Módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras dos CPs de PC - (si) e (si - Env).....	115
Tabela 106- Dureza normal às fibras dos CPs de PC - (si) e (si - Env).....	115
Tabela 107- Resistência à compressão paralela às fibras dos CPs de PC - (i-M) e (i-M - Env).....	116
Tabela 108- Módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras dos CPs de PC - (i-M) e (i-M - Env).....	116
Tabela 109- Dureza normal às fibras dos CPs de PC - (i-M) e (i-M - Env).....	116
Tabela 110- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-M), no ensaio de compressão paralela às fibras, à P = 0,22 MPa.....	117
Tabela 111- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-M), no ensaio de compressão paralela às fibras, à P = 0,44 MPa.....	117
Tabela 112- Resistência à compressão paralela às fibras dos CPs de PC - (si) e (i-M), à P = 0,22 MPa e 0,44 MPa.....	118
Tabela 113- Módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras dos CPs de PC - (si) e (i-M), à P = 0,22 MPa e 0,44 MPa.....	118
Tabela 114- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-M), no ensaio para a determinação das durezas paralela e normal às fibras, à P = 0,22 MPa.....	118
Tabela 115- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-M), no ensaio para a determinação das durezas paralela e normal às fibras, à P = 0,44 MPa.....	119
Tabela 116- Dureza paralela às fibras dos CPs de PC - (si) e (i-M), à P = 0,22 MPa e 0,44 MPa.....	119
Tabela 117- Dureza normal às fibras dos CPs de PC - (si) e (i-M), à P = 0,22 MPa e 0,44 MPa.....	119

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	: Álcool alílico;
ABNT	: Associação Brasileira de Normas Técnicas;
AN	: Acrilonitrila;
ASTM	: American Society for Testing and Materials;
CAQI	: Central de Análises Químicas Instrumentais;
CP	: Corpo-de-prova;
CPM	: Compósito Polímero-Madeira;
DEMa	: Departamento de Engenharia de Materiais;
DP	: Desvio padrão;
EESC	: Escola de Engenharia de São Carlos;
EG	: <i>Eucalyptus grandis</i> ;
Env	: Envelhecidas (os);
GMA	: Metacrilato de glicidil;
i-(E+M)	: Impregnadas com estireno + metacrilato de metila;
i-E	: Impregnadas (os) com monômero de estireno;
IFSC	: Instituto de Física de São Carlos;
i-M	: Impregnadas (os) com monômero de metacrilato de metila;
IPEF	: Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais;
IQSC	: Instituto de Química de São Carlos;
LaMEM	: Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira;
LM	: Lamela média;
M	: Média;
MEHQ	: Monometil éter de hidroquinona;
MEV	: Microscópio Eletrônica de Varredura;
MMA	: Monômero de metacrilato de metila;
NBR	: Norma Brasileira Registrada;
NEMA	: National Electrical Manufacturers Association;
P	: Parede primária;
PC	: <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> ;
PSF	: Ponto de saturação das fibras;

S1	: Camada 1 da parede secundária;
S2	: Camada 2 da parede secundária;
S3	: Camada 3 da parede secundária;
SBR	: Estireno-Butadieno;
SBS	: Sociedade Brasileira de Silvicultura;
SET	: Departamento de Engenharia de Estruturas;
si	: Sem impregnação;
UE	: Umidade de equilíbrio;
UFSCar	: Universidade Federal de São Carlos;
USP	: Universidade de São Paulo;
UV	: Ultravioleta;
W	: Camada verrugosa;
WPC	: Wood-Polymer / Plastic Composite.

LISTA DE SÍMBOLOS

γ	: Radiação gama;
$\bar{x}_m$	: Média aritmética amostral;
s_m	: Desvio padrão amostral;
$t_{\frac{\alpha}{2}, n-1}$	: Valor tabelado da distribuição “t” de Student com $n-1$ graus de liberdade;
%	: Porcento;
ρ	: Densidade;
α	: Nível de confiança;
$\epsilon_{i,2}$	: Inchamento radial total;
$\epsilon_{i,3}$	: Inchamento tangencial total;
μm	: Micrômetro;
$\epsilon_{r,2}$	: Retratabilidade radial total;
$\epsilon_{r,3}$	: Retratabilidade tangencial total;
cal	: Caloria;
cm	: Centímetro;
cm^3	: Centímetro cúbico;
cP	: Centipoise;
E_{c0}	: Módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de compressão paralela às fibras;
EHT	: Tensão de aceleração;
E_{M0}	: Módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de flexão estática;
E_{t0}	: Módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de tração paralela às fibras;
f_{bw}	: Resistência ao impacto na flexão;
f_{c0}	: Resistência à compressão paralela às fibras;
f_{H0}	: Dureza paralela às fibras;
f_{H90}	: Dureza normal às fibras;
f_M	: Módulo de resistência obtido no ensaio de flexão estática;
f_{t0}	: Resistência à tração paralela às fibras;
f_{t90}	: Resistência à tração normal às fibras;
f_{v0}	: Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras;

g	: Grama;
h	: Hora;
in	: Polegada;
J	: Joule;
kg	: Quilograma;
kJ	: Quilojoule;
kV	: Quilovolt;
L	: Litro;
lb	: Libra;
m	: Massa; Metro;
m ²	: Metro quadrado;
Mag	: Magnitude;
m _f	: Massa final;
m _i	: Massa inicial;
min	: Minuto;
mm	: Milímetro;
mmHg	: Milímetro de mercúrio;
mol	: Molécula-grama;
MPa	: Megapascal;
<i>n</i>	: Número de amostras;
N	: Newton;
°C	: Graus Celsius;
P	: Pressão;
P _A	: População A;
P _B	: População B;
P _C	: População C;
pH	: Potencial hidrogeniônico;
R ²	: Coeficiente de correlação;
SE1	: Detetor de elétrons;
US\$	: Dólar;
W	: Tenacidade; Watts;
WD	: Distância de trabalho;
μ	: Intervalo de confiança.

RESUMO

A exploração não racional dos recursos florestais nativos, no Brasil, tem provocado a redução da oferta de espécies de uso consagrado em diversos segmentos, notadamente na construção civil e na indústria de móveis. A alternativa mais imediata tem sido o emprego da madeira de reflorestamento, em particular, dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*, freqüentes nas regiões sul e sudeste do país. Porém, muitas das espécies disponíveis comercialmente não apresentam propriedades físico-mecânicas que as tornem capazes de promover a substituição das espécies tradicionalmente empregadas. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo demonstrar a viabilidade de se obterem compósitos polímero-madeira (CPMs) que podem apresentar comportamento equivalente ou superior ao da madeira sem tratamento, proveniente das regiões de reflorestamento dos mencionados gêneros. Para tal, foi feita a impregnação da madeira das espécies *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis* por apresentarem maior disponibilidade e densidade compatível para viabilizar o processo. Empregaram-se os monômeros poliméricos de estireno e metacrilato de metila e, como iniciador no processo de polimerização, o peróxido de benzoíla. Foi utilizado o método de vácuo-pressão para a impregnação da solução monômero-iniciador. Os resultados mostraram, para os CPMs de *Pinus*, um significativo aumento nos valores de todas as propriedades estudadas. Nos CPMs de *Eucalyptus*, em decorrência de sua baixa permeabilidade, somente os valores das durezas paralela e normal às fibras apresentaram aumento.

Palavras-chave: madeira de reflorestamento; polímero; compósito polímero-madeira; estireno; metacrilato de metila.

ABSTRACT

Large exploration of native forestry resources in Brazil has led to a decrease in supply of the most widely used species in several sectors, notably in civil construction and furniture industries. The most immediate remedy has been the use of reforestation timber, obtained from the common *Eucalyptus* and *Pinus* species available in the south and southwest regions of the country. However, most of these species do not present adequate physical and mechanical properties to viably the mentioned uses. In this context, the main objective of the present research is to demonstrate the viability of obtaining wood-polymer composites (WPCs), which may exhibit similar or superior physical and mechanical properties than untreated aforementioned species from reforestation regions of Brazil. In order to achieve this goal, the impregnation of *Pinus caribaea* var. *hondurensis* and *Eucalyptus grandis*, which have compatible density and are available in large amounts to permit such processing, was carried out. In the process, polymeric monomers of styrene and methyl methacrylate were employed with benzyl peroxide, whose functions as an initiator in the polymerization process. Vacuum-pressure method was used in the impregnation of the monomer-indicator solution. Properties of the WPCs – *Pinus* were significantly improved in all tests, however, because of its low permeability, only hardness parallel and perpendicular to grain showed increase for the WPCs – *Eucaliptus*.

Keywords: reforestation wood; polymer; wood-polymer composite; styrene; methyl methacrylate.

1- INTRODUÇÃO

A madeira, matéria-prima versátil, de aspecto bastante agradável, que apresenta, em geral, fácil trabalhabilidade e elevada resistência mecânica em relação à sua massa específica, vem sendo empregada ao longo do tempo para melhorar a qualidade de vida do ser humano. Entretanto, algumas das suas peculiaridades, como a instabilidade dimensional (decorrente do processo de secagem ou da variação da umidade relativa do ar) e a sua susceptibilidade a ataques de fungos e insetos (em especial nas espécies de rápido crescimento como aquelas plantadas em florestas artificiais) restringem, em alguns casos, sua utilização. Por isso mesmo é que se observa uma constante preocupação de técnicos e pesquisadores ligados à indústria da madeira em desenvolver métodos de estabilização dimensional e de preservação de madeiras. Tais métodos visam ampliar suas áreas de aplicação e aumentar a sua durabilidade, mantendo a competitividade de preço e o desempenho da mesma em relação a outros materiais.

Com o advento dos polímeros sintéticos e com a perspectiva de utilização da radiação na polimerização de vários monômeros, durante o período de 1930 a 1960, novos métodos de estabilização da madeira foram criados, levando ao estabelecimento de uma classe de materiais denominada Compósitos Polímero-Madeira (CPMs) (Wood-Polymer / Plastic Composites - WPCs), de acordo com Meyer (1982).

Estes materiais são resultantes da impregnação de madeiras por monômeros ou oligômeros líquidos, posteriormente polimerizados no interior da mesma através de radiação γ ou por simples aquecimento utilizando iniciadores químicos de decomposição térmica, conforme Schneider; Witt (2004). Em princípio, com esse tipo de tratamento, pode-se verificar um aumento significativo nas propriedades mecânicas, na estabilidade dimensional, maior resistência química e à degradação

biológica, e redução na absorção de água pelos compósitos em relação à madeira não tratada, segundo Manrich (1984).

O Brasil dispõe de vastas reservas de espécies tropicais. Entretanto, a exploração seletiva e predatória das florestas nativas tem provocado a redução da oferta de espécies de uso consagrado, cuja demanda permanece crescente. Com isso, diversas destas espécies, como a Aroeira (*Astronium urundeuva*) e a Cerejeira (*Torresea sp*), entre outras, se encontram praticamente esgotadas em suas reservas. Os preços, conseqüentemente, atingem patamares proibitivos, culminando por inviabilizar a aplicação da referida matéria-prima.

A alternativa para buscar solução para esta questão tem passado pelo emprego de espécies de reflorestamento, em particular dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*. Programas governamentais de incentivo, além de providências da iniciativa privada, aumentaram a oferta de madeira de reflorestamento nas regiões sul e sudeste do país. Informações do IPEF (Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais) (2005) dão conta que até o ano de 2002, apenas no Estado de São Paulo, houve cerca de 770 mil hectares reflorestados, com espécies de *Eucalyptus* e *Pinus*.

De acordo com dados da SBS (Sociedade Brasileira de Silvicultura) (2005), foi verificado um crescimento do consumo de matéria-prima proveniente das florestas plantadas para obtenção de produtos de madeira sólida, em relação a uma tendência de diminuição do consumo de madeiras oriundas de florestas nativas no Brasil, a partir do ano de 1997. Quanto ao volume total de madeira consumida, as espécies nativas ainda representam uma fração expressiva da matéria-prima consumida. Contudo, a longo prazo, as perspectivas são de uma inversão deste quadro.

Segundo Cavalcante (1986), as pesquisas realizadas sobre tratamentos de madeira estavam, então, mais restritas à impregnação com preservativos, substâncias retardadoras de chama e recobrimentos superficiais.

Mais recentemente, se verifica um aumento no interesse pelo estudo dos CPMs, obtidos a partir de espécies de reflorestamento. Entretanto, para viabilizar o emprego desta alternativa, em escala industrial, é fundamental que o comportamento dos CPMs seja muito bem caracterizado, desde o processo de obtenção até os requisitos para as diversas aplicações nos segmentos ligados à construção civil, à indústria de móveis e à indústria de embalagens, entre outras.

2- JUSTIFICATIVA

No Brasil, a exploração não racional dos recursos florestais nativos tem provocado a redução da oferta de espécies de uso consagrado em diversos segmentos, notadamente na construção civil e na indústria de móveis. Como exemplos dessa situação, merecem ser mencionados o Pau marfim (*Balfourodendron riedelianum*) para pisos, o Ipê (*Tabebuia sp*) e o Jatobá (*Hymenaea sp*) para estruturas e o Mogno (*Swietenia macrophylla*) para móveis. A alternativa mais imediata para contornar o problema tem sido o emprego de madeira de reflorestamento, em particular, dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*, freqüentes nas regiões sul e sudeste do país.

Além disto, há grande interesse científico e industrial na obtenção de CPMs a partir de espécies de reflorestamento, para se consumir o processo de substituição das espécies de uso consagrado por tais produtos.

De acordo com Manrich (1984) e Gomes (1996), até então era reduzido o número de pesquisas relativas ao estudo das propriedades de resistência e rigidez de madeiras impregnadas com monômeros poliméricos em comparação com aquelas não impregnadas. Poucas pesquisas também vinham sendo desenvolvidas no intuito de analisar a microestrutura dos CPMs e a forma como o polímero está depositado na complexa estrutura da madeira.

Um trabalho de pesquisa que estude as propriedades da madeira das espécies *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, impregnadas com dois tipos de monômeros poliméricos (estireno e metacrilato de metila), justifica-se não somente como forma de ampliar os conhecimentos sobre esses compósitos, mas também como possibilidade de geração de subsídios para expandir sua aplicação.

3- OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral ampliar o conhecimento a respeito de compósitos polímero-madeira e sua microestrutura, com ênfase nos compósitos obtidos a partir das espécies de reflorestamentos *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, as quais são origem de parcela significativa da madeira empregada nos diversos segmentos da indústria de nosso país.

Como objetivos específicos, incluem-se:

- ◆ Verificar a possibilidade da utilização de madeira de espécies de reflorestamento, dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*, na obtenção de CPMs.
- ◆ Analisar propriedades físicas e mecânicas dos CPMs obtidos através da impregnação das madeiras citadas com os monômeros poliméricos estireno e metacrilato de metila e comparar os valores obtidos com aqueles da madeira não impregnada, seguindo para isso as prescrições da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), contidas no documento normativo NBR 7190:1997 - Projeto de estruturas de madeira, em seu Anexo B.

4- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados aspectos relacionados ao tema central da tese. Desta forma, espera-se registrar a fundamentação bibliográfica adequada para o desenvolvimento das etapas que compõem o trabalho.

4.1- Madeira

A madeira é muito importante para a engenharia, fato que se deve, em princípio, à sua relação resistência-peso. Entre outras características do uso da madeira estão: renovabilidade, facilidade de processamento, possibilidade de obtenção de peças de grandes dimensões, desdobráveis em peças de dimensões compatíveis para diferentes aplicações, facilidade de ligações e emendas, condições naturais satisfatórias de isolamento térmico e absorção acústica, e custo competitivo em relação a outros materiais, como os metais e cimentos.

Para Van Vlack (1989) é de fundamental importância, para a utilização adequada da madeira, o conhecimento de suas propriedades e estrutura. Por se tratar de um organismo heterogêneo, constituído por células dispostas e organizadas em diferentes direções, conforme esquematizado na Figura 1, o aspecto da madeira varia de acordo com a face observada. Além da aparência, também o comportamento físico-mecânico da madeira difere em cada uma das direções principais, fenômeno conhecido como anisotropia, de acordo com Burger; Richter (1991).

Figura 1- Direções principais da madeira. Fonte: Shackelford (1996).

4.1.1- As árvores

As árvores são plantas superiores, de elevada complexidade anatômica e fisiológica. Botanicamente, estão contidas na Divisão das Fanerógamas. Estas, por sua vez, se subdividem em Gimnospermas e Angiospermas, segundo Bodig; Jayne (1992).

Nas Gimnospermas, a classe mais importante é a das Coníferas, também designadas na literatura internacional como *softwoods*, ou seja, madeiras moles. Nas árvores classificadas como Coníferas, as folhas em geral são perenes, têm formato de escamas ou agulhas. São árvores típicas dos climas temperados e frios, embora existam algumas espécies tropicais, de acordo com registros de Hellmeister (1983). As coníferas constituem grandes áreas de florestas, fornecendo madeira para múltiplos usos, seja na construção civil, seja na indústria dos mais diferentes segmentos.

Nas Angiospermas, os mais organizados vegetais, distinguem-se as Dicotiledôneas, usualmente designadas na literatura internacional como *hardwoods*, ou seja, madeiras duras, de acordo com Kollmann; Côté Jr (1968). Elas produzem árvores com folhas de diferentes formatos, renovadas periodicamente, e constituem a quase totalidade das espécies das florestas tropicais.

4.1.2- Estrutura e composição química da madeira

A madeira é composta por milhões de unidades individuais, ditas células. Estas se diferem em forma e tamanho, dependendo da sua função fisiológica na árvore, segundo Kollmann; Côté Jr (1968). As células que compõem o lenho das coníferas possuem estruturas mais simples que as das dicotiledôneas.

De acordo com Bodig; Jayne (1992) as coníferas são constituídas principalmente por células tubulares, alongadas, pontiaguadas e fechadas nas extremidades, chamadas traqueídes. Entre os traqueídes, observa-se a presença de células pequenas, retangulares, de paredes finas, ditas parênquimas. Uma típica estrutura das coníferas está mostrada na Figura 2.

Figura 2- Estrutura celular do lenho de uma conífera. Fonte: http://fai.unne.edu.ar/biologia/plantas/maderas.htm#comparativo_del_leño (2005).

Já as dicotiledôneas são constituídas por células que apresentam maior variação na forma e nas dimensões, como mostra a Figura 3. A maioria das células das dicotiledôneas é longa e estreita, com extremidades pontiagudas e fechadas – as fibras. Outros constituintes importantes são os parênquimas e, numa quantidade relativamente pequena, os vasos, designados nos cortes transversais como poros, segundo Esau (1974), entre outros. Os vasos apresentam extremidades abertas e geralmente são menores, em comprimento, que as fibras, variando bastante na forma.

Figura 3- Estrutura celular do lenho de uma dicotiledônea. Fonte: http://fai.unne.edu.ar/biologia/plantas/maderas.htm#comparativo_del_leño (2005).

As células da madeira são conectadas umas as outras através de uma substância cimentante, a lamela média. De acordo com Burger; Richter (1991), duas camadas compõem a parede de uma célula: a parede primária, uma fina camada externa, e a parede secundária (uma camada interna mais espessa composta por outras três camadas), como esquematizado na Figura 4.

Figura 4- Modelo da estrutura celular de traqueídes de coníferas e fibras de folhosas, onde: LM= lamela média, P= parede primária, S1= camada 1 da parede secundária, S2= camada 2 da parede secundária, S3= camada 3 da parede secundária, W= camada verrugosa. Fonte: Adaptada de Sjöström (1981).

De acordo com Lepage (1986), os principais constituintes da parede celular são a celulose, as polioses ou hemiceluloses e a lignina. A celulose é um polissacarídeo linear de alto peso molecular, constituído por um único tipo de unidade de açúcar. É o principal componente das paredes das células dos vegetais, conforme Fengel; Wegener (1989).

O termo polioses refere-se a uma mistura de polímeros polissacarídeos de baixo peso molecular, os quais estão intimamente associados com a celulose nas paredes celulares (principalmente na parede primária) e na lamela média (traços), de acordo com D'Almeida (1988).

Outro constituinte fundamental da madeira é a lignina. Ela é localizada principalmente na lamela média onde é depositada durante a lignificação do tecido

vegetal. Quando o processo de lignificação é completado, geralmente coincide com a morte da célula, formando o que se denomina tecido de resistência. A lignina, como a celulose, também é um polímero, mas que difere desta por ser predominantemente um composto aromático e altamente irregular em sua constituição e estrutura molecular, segundo Brito; Barrichelo (1985).

Além dos componentes estruturais celulose, polioses e lignina, a madeira também apresenta inclusões de materiais orgânicos e inorgânicos, com baixos e altos pesos moleculares. Estes podem ser extraídos por intermédio da água, de solventes orgânicos ou por volatilização, segundo Browning (1963). São os extrativos, os quais abrangem taninos, óleos, gomas, resinas, corantes, sais de ácidos orgânicos, compostos aromáticos, depositados preponderantemente no cerne, que lhe conferem uma coloração mais acentuada.

4.1.3- Umidade da madeira

Uma árvore viva absorve água e sais minerais do solo que circulam por toda a planta até atingirem as folhas constituindo a seiva bruta. O processo inverso, das folhas até as raízes, é feito pela seiva elaborada, que é constituída basicamente de água e produtos elaborados na fotossíntese. Desta forma, a madeira das árvores vivas ou recentemente derrubadas apresenta alto teor de umidade. Nessas condições, os vasos e os canais da madeira, assim como o lúmen das suas células, apresentam-se saturados de água, segundo Jankowsky (1990). Da mesma maneira, os espaços vazios, localizados no interior das paredes celulares, também podem encontrar-se saturados.

De acordo com Hellmeister (1983), entre outros, no interior da madeira podem ser encontradas:

- **Água de capilaridade (água livre):** localizada no interior dos vasos, meatos, canais e lúmen das células.
- **Água de adesão ou higroscópica (água presa):** localizada nas paredes celulares.

Quando toda a água livre ou de capilaridade foi retirada da madeira remanesecendo apenas a água de adesão, diz-se que a madeira atingiu o ponto de saturação das fibras (PSF). Normalmente o PSF situa-se numa faixa entre 22 e 30% de umidade, variando de espécie para espécie. A partir do PSF ocorrem importantes alterações na estrutura da madeira, tais como: contrações que podem causar defeitos como empenos e rachaduras, e alterações na sua resistência mecânica, segundo Galvão; Jankowsky (1985).

Após o PSF, a evaporação vai prosseguindo com menor velocidade até alcançar o nível de umidade de equilíbrio (UE), que é função da espécie considerada, da temperatura e da umidade relativa do ar, de acordo com a Calil Jr et al. (2003).

Em contrapartida, quando uma peça de madeira é seca previamente a 0% de umidade, e exposta ao meio ambiente, tende a absorver a água que está dispersa no ar em forma de vapor. Neste sentido a água absorvida irá corresponder à água higroscópica ou de adesão, segundo Galvão; Jankowsky (1985).

4.2- Polímeros

Os polímeros são uma classe de materiais, que na sua forma final de utilização, geram como produtos os plásticos, as fibras poliméricas, as borrachas ou elastômeros, as espumas, as tintas e os adesivos. São macromoléculas caracterizadas por seu tamanho, estrutura química e interações intra e intermoleculares. Segundo Smith (1998), eles possuem unidades químicas ligadas por covalência, as quais são repetidas regularmente ao longo da cadeia, e denominadas de *meros*. O número de meros da cadeia polimérica é denominado *grau de polimerização*, de acordo com Van Vlack (1984).

Monômeros são micromoléculas e consistem de compostos químicos suscetíveis de reagir e formar polímeros. A reação química pela qual os monômeros são unidos para a formação de um polímero é a *polimerização*, segundo Chawla (1998).

Quando um polímero tem apenas um tipo de monômero, usa-se a expressão *homopolímero* e, quando há mais de um tipo de monômero, é designado *copolímero*, de acordo com Elias (1993). O termo copolímero é geral; quando há três ou mais

monômeros na reação, pode-se particularizar este número, usando a expressão *terpolímero*, *tetrapolímero*, e assim por diante.

Segundo Callister Jr (1994), os polímeros podem ter suas cadeias sem ramificações, admitindo conformação em zigue-zague. Nesse caso são denominados lineares. Podem apresentar ramificações e, nessa situação, são denominados polímeros ramificados, com maior ou menor complexidade. Podem, ainda, exibir cadeias com ligações cruzadas, formando polímeros reticulados, como mostra a Figura 5. O tipo dessas cadeias poliméricas, os seus pesos moleculares e as suas formas de interação definem as características de cada polímero.

Figura 5- Representação esquemática da estrutura molecular dos polímeros: a) linear, b) ramificado, c) ligação cruzada e d) em rede (tri-dimensional). Fonte: Callister Jr (1994).

Além dos polímeros clássicos produzidos e comercializados, há alguns anos vêm surgindo novos polímeros, oriundos das pesquisas científicas e tecnológicas desenvolvidas em todo o mundo. Logo, devido à grande variedade de materiais poliméricos existentes, torna-se necessário selecioná-los em grupos que possuam características comuns, para facilitar a compreensão e o estudo das propriedades desses materiais. Portanto, com este objetivo, de acordo com Mano; Mendes (1999), os polímeros podem ser classificados de diversas maneiras, conforme o critério escolhido, e as principais classificações têm como base os aspectos descritos na Tabela 1.

De acordo com Askeland (1994), o método mais usado para descrever os polímeros está relacionado com seu comportamento mecânico e, nesse critério, são divididos em três categorias: plásticos, fibras poliméricas e borrachas ou elastômeros.

Tabela 1- Classificação de polímeros. Fonte: Mano; Mendes (1999).

Critério	Classe de polímero
Origem do polímero	<ul style="list-style-type: none"> • Natural • Sintético
Número de monômeros	<ul style="list-style-type: none"> • Homopolímero • Copolímero
Método de preparação do polímero	<ul style="list-style-type: none"> • Polímero de adição • Polímero de condensação • Modificação de outro polímero
Estrutura química da cadeia polimérica	<ul style="list-style-type: none"> • Poli-hidrocarboneto • Poliamida • Poliéster, e muitos outros
Encadeamento da cadeia polimérica	<ul style="list-style-type: none"> • Sequência cabeça-cauda • Sequência cabeça-cabeça, cauda-cauda
Configuração dos átomos da cadeia polimérica	<ul style="list-style-type: none"> • Sequência <i>cis</i> • Sequência <i>trans</i>
Taticidade da cadeia polimérica	<ul style="list-style-type: none"> • Isotático • Sindiotático • Atático
Fusibilidade e/ou solubilidade do polímero	<ul style="list-style-type: none"> • Termoplástico • Termorrígido
Comportamento mecânico do polímero	<ul style="list-style-type: none"> • Plástico • Fibra • Borracha ou elastômero

4.2.1- Plásticos

Segundo Blass (1985), os plásticos são materiais artificiais, formados de polímeros, geralmente de origem orgânica sintética que, em algum estágio de sua fabricação, adquiriram condição plástica, durante a qual foram moldados, geralmente com a ajuda de calor e pressão.

Através das características de fusibilidade e/ou solubilidade, que obrigam à escolha de processamento tecnológico adequado, os polímeros, e de modo particular os plásticos, podem ser agrupados em termoplásticos e termorrígidos.

4.2.1.1- Termoplásticos

Os termoplásticos são polímeros capazes de ser repetidamente amolecidos pelo aumento da temperatura e endurecidos pela diminuição da mesma, segundo Elias (1993). Esta alteração pode provocar alguma degradação no termoplástico para um número elevado de ciclos de aquecimento e resfriamento.

Estruturalmente, os componentes fundamentais dos termoplásticos são polímeros com cadeias lineares ou ramificadas, sem ligações cruzadas, isto é, entre as cadeias poliméricas diferentes só existem interações intermoleculares secundárias e reversíveis com a temperatura, de acordo com Mano; Mendes (1999).

Segundo Mano (1991), são exemplos de termoplásticos: polietileno, polipropileno, poliestireno, poli (cloreto de vinila), poli (acetato de vinila), poli (acrilonitrila), poli (cloreto de vinilideno) e poli (metacrilato de metila).

4.2.1.2- Termorrígidos

Os termorrígidos ou termofixos são materiais plásticos que amolecem inicialmente ao aquecimento, podendo então ser moldados. Porém, caso continue o aquecimento, o material endurece (ou “cura”), tornando-se relativamente rígido. A cura é um processo de reação química, iniciada no molde, em que as moléculas reagem entre si, formando complexos irreversíveis. Após a cura, o material não pode ser reconformado ou moldado, de acordo com Blass (1985).

Estruturalmente, os termorrígidos têm como componentes fundamentais polímeros com cadeias moleculares contendo alta densidade de ligações cruzadas, e que especificam o comportamento dos mesmos, segundo Horath (1995).

Segundo Mano (1991), os termorrígidos normalmente contêm aditivos e podem ter aplicações como plásticos de engenharia. Como exemplo podem ser citados os poliésteres insaturados reforçados com fibras de vidro. Alguns polímeros termorrígidos são: resina epoxídica, resina de fenol-formaldeído e resina de uréia-formaldeído.

4.2.2- Fibras poliméricas

Fibra é um termo geral que designa um corpo flexível, cilíndrico, de reduzida seção transversal e elevada razão (superior a 100) entre o comprimento e o diâmetro (razão de aspecto), podendo ou não ser polimérico, de acordo com Mano; Mendes (1999).

As principais fibras poliméricas industriais, naturais ou sintéticas, são: celulose, acetato de celulose, lã, seda, policaprolactama, poli (hexametilenoadipamida) e poli (teteftalato de etileno), segundo Mano; Mendes (1999).

4.2.3- Borrachas ou elastômeros

São materiais poliméricos de origem natural ou sintética. Dentre todos os tipos de materiais poliméricos, as borrachas ou elastômeros, se distinguem por sua característica única de permitir grande alongamento, seguido instantaneamente de quase completa retração, especialmente quando se encontram na condição vulcanizada, segundo Askeland (1994). Esse fenômeno foi primeiramente observado na borracha natural, e passou a ser conhecido como elasticidade.

Segundo Mano; Mendes (1999), numerosas espécies botânicas, espalhadas pelo planeta, produzem borracha. Entretanto, a única espécie que gera borracha de alta qualidade e em condições econômicas viáveis é a Seringueira (*Hevea brasiliensis*). Alguns exemplos de borracha são: borracha natural, polibutadieno, poliisopreno, policloropreno e polissulfeto.

4.3- Compósitos polímero-madeira (CPMs)

Os CPMs são provenientes da polimerização de monômeros ou oligômeros líquidos no interior da madeira, de acordo com Avilov et al. (1999). A estrutura porosa da madeira é preenchida por uma substância sólida, plástica e bastante dura. De acordo com Schneider; Witt (2004) estes produtos apresentam, em geral, propriedades mecânicas superiores, maior estabilidade dimensional, maior resistência química e à degradação biológica e menor absorção de umidade do que a madeira não impregnada.

Produtos de CPMs são fabricados e comercializados em vários países, tendo aplicações diversas como materiais para construção civil, materiais esportivos, instrumentos musicais, cabos de cutelaria, entre outros, segundo Meyer (1982).

A obtenção dos CPMs passa necessariamente por duas etapas distintas: impregnação com monômero/oligômero e, posterior polimerização do mesmo no interior da madeira. Como o presente trabalho se refere à impregnação feita com monômeros, não serão abordados detalhes sobre os CPMs obtidos de oligômeros.

4.3.1- Impregnação

A impregnação da madeira é obtida por um processo de injeção de determinados produtos químicos (líquidos) no interior da mesma. De um modo geral, os processos de modificação das propriedades físicas e mecânicas da madeira têm sido realizados através de tratamentos tradicionais utilizando alcatrão, piches, creosotos, resinas, pintura da superfície e preenchimento dos poros, segundo Gomes (1996).

No que se refere à impregnação com resinas naturais, cabe registrar o trabalho de Nogueira et al. (2002), no qual são apresentados resultados que evidenciam a melhoria de propriedades físicas da madeira Figueira branca (*Ficus monckii*), impregnada com a resina natural do Jatobá (*Hymenaea courbaril*).

Através da impregnação da madeira com monômeros líquidos, compostos que podem ser transformados em polímeros ou resinas através da combinação com outros compostos similares, originam-se os chamados compósitos polímero-madeira.

A impregnação pode ser feita por imersão, vácuo-imersão e vácuo-pressão, de acordo com Kollmann; Côté Jr (1968), entre outros.

4.3.1.1- Imersão

Este método consiste na simples imersão da madeira no monômero, sendo muito utilizado em estudos envolvendo o deslocamento ou troca de solventes, segundo Kenaga et al. (1962) e Timmons et al. (1971). Neste caso, a madeira é inicialmente imersa em solventes capazes de inchá-la. Posteriormente, o solvente é substituído pelo monômero, o qual pode então penetrar na parede celular.

4.3.1.2- Vácuo-imersão

Neste método, as amostras são submetidas a vácuo e, depois, imersas no monômero, o qual é introduzido no sistema ainda sob vácuo. Logo depois o vácuo é retirado e a impregnação é feita à pressão atmosférica, segundo Meyer (1981).

4.3.1.3- Vácuo-pressão

No método vácuo-pressão, as amostras são submetidas a vácuo e, depois, imersas no monômero, o qual é introduzido no sistema ainda sob vácuo. Em seguida, a impregnação é feita a uma pressão superior à atmosférica. Este tipo de processo é utilizado industrialmente no tratamento de postes e moirões de eucalipto, de acordo com Manrich (1984).

4.3.2- Polimerização

A polimerização do monômero impregnado na madeira pode ser feita por dois processos diferentes: através da incidência de radiação ou da decomposição térmica de iniciadores, segundo Schneider; Witt (2004), entre outros.

Comparando-se os dois métodos de início da polimerização, observa-se que não há diferenças significativas nas propriedades físico-mecânicas dos CPMs obtidos, segundo Meyer (1965). Porém, o processo de polimerização feito por iniciadores, os quais são compostos que, com o aumento da temperatura, facilmente se decompõem em radicais livres, é mais simples e econômico. Nele, a probabilidade de degradação da madeira é muito pequena e, principalmente, os riscos à segurança do operador são baixos. Além disso, na polimerização térmica via radicais livres gerados por iniciadores químicos, as temperaturas podem ser ajustadas através da escolha de iniciadores adequados, com temperaturas de decomposição tais que seja bem reduzida a evaporação dos monômeros. Entretanto, poucas pesquisas de âmbito mundial têm sido feitas com relação à escolha de iniciadores e monômeros adequados, segundo Yalinkilic et al. (1999).

O número de compostos que podem ser utilizados como iniciadores é relativamente pequeno, sendo limitado àqueles com baixas energias de dissociação, segundo Vollmert (1973). Em geral, são usados vários tipos de peróxidos e de azocompostos, de acordo com Manrich (1984).

4.3.3- Madeiras e monômeros utilizados na obtenção de CPMs

Em geral, as espécies de madeira mais utilizadas na obtenção de CPMs são aquelas de baixa densidade, pois apresentam maior quantidade de poros, e com suficiente permeabilidade. Dessa forma, torna-se fácil a impregnação, de acordo com Manrich (1984).

Nas espécies mais densas, com poros de dimensão mais reduzida, é dificultada a impregnação de monômeros. Além disso, em sua condição natural, já se apresentam com elevadas propriedades físico-mecânicas, e o incremento obtido nessas resistências não justifica todo um processo de obtenção de CPMs.

Em relação aos monômeros, os mais amplamente empregados são os do tipo vinílico como, por exemplo, o estireno, o metacrilato de metila e a acrilonitrila, segundo Schneider; Witt (2004).

4.3.4- Contribuições da literatura

Alguns trabalhos publicados sobre compósitos polímero-madeira são mencionados a seguir, com o intuito de contribuir para a melhor compreensão do assunto.

Estudos efetuados por Meyer (1965), Lepage (1982), Manrich (1984), foram empreendidos nesse campo utilizando os processos de impregnação da madeira com monômeros líquidos, para obter-se o CPM. Algumas propriedades que aumentaram significativamente foram: resistência à compressão, tenacidade e dureza. Além destas, houve uma melhora na durabilidade do material e na sua estabilidade dimensional.

Erickson; Balatinecz (1964) estudaram os caminhos de escoamento do líquido do monômero de estireno no interior de corpos-de-prova de Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) e a polimerização do mesmo. Lâminas retiradas desses compósitos foram analisadas através de microscopia para determinar as características desse movimento. A conclusão foi que a contribuição das células não é igual para o escoamento do líquido.

Meyer (1965) descreveu os elementos essenciais que compõem o equipamento de impregnação da madeira por meio de monômeros vinílicos, utilizando o método de vácuo-pressão. Pela revisão da literatura, muitos trabalhos, após essa data, delineiam seus experimentos com base nesse equipamento de impregnação.

Langwig et al. (1968) ensaiaram corpos-de-prova de Basswood (*Tilia americana*) não tratada e impregnada com metacrilato de metila. Eles observaram um pronunciado aumento nas propriedades de flexão estática, ilustrado na Figura 6a, e de compressão paralela às fibras, na Figura 6b, da madeira tratada.

Figura 6- Comparação entre a deformação de corpos-de-prova de *Tilia Americana* tratada e não tratada no ensaio de: a) flexão estática; b) compressão paralela às fibras.
Fonte: Adaptada de Langwig et al. (1968).

Lepage (1982) impregnou corpos-de prova da madeira *Pinus elliottii* (*Pinus elliottii*) com metacrilato de metila e variou a quantidade de iniciador (peróxido de benzoíla) entre 0,05 e 0,20% em relação à massa do monômero, a fim de verificar a influência destas condições experimentais em algumas propriedades da madeira. Também observou a quantidade de polímero na madeira em três faixas de impregnação: faixa A- 25 a 54%; faixa B- 55 a 84% e faixa C- 85 a 114%, todas em relação ao peso seco da madeira. Após a polimerização, que ocorreu a 70 °C, os corpos-de-prova foram testados a fim de avaliar-se o módulo de ruptura na flexão e a dureza. A principal conclusão foi que a dureza do compósito estudado se correlacionou positivamente com a retenção relativa do polímero.

Manrich (1984) estudou em seu trabalho o comportamento físico-mecânico das madeiras Caixeta (*Tabebuia obtusifolia*) e *Pinus elliottii* (*Pinus elliottii*), impregnadas com estireno. A autora verificou que ambos os compósitos apresentaram reduzida absorção de água quando comparados com as madeiras não tratadas. Destacou-se o compósito *Pinus*-poliestireno que apresentou aumento

superior a 130% na resistência à compressão paralela e no módulo de elasticidade longitudinal, obtidos no ensaio de compressão paralela às fibras, em relação ao *Pinus* não tratado.

Gomes (1996) realizou um estudo teórico e experimental de ligações com cavilhas de madeira, de seção cilíndrica, do gênero *Pinus*, impregnadas com estireno. Foram determinadas experimentalmente as características de resistência e elasticidade do material e, posteriormente, realizados ensaios de ligações padronizados com solicitações paralela e normal às fibras. Os resultados dos ensaios mostraram um aumento na resistência de compressão normal de até 292% e um aumento de 80% no limite de proporcionalidade da ligação. Destaca-se que as normas de ensaio utilizadas por Gomes (1996) foram profundamente modificadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas em 1997. Este fato impede quaisquer comparações de seus resultados com os obtidos no presente trabalho.

Schneider; Omidvar (1997) estudaram a penetrabilidade no Red maple (*Acer rubrum*) com monômero de estireno, em quatro situações de penetração (radial, tangencial, longitudinal e em todas simultaneamente) a quatro teores de umidade (0, 10, 18 e 30%). O monômero foi polimerizado e a sua localização foi determinada usando microscopia. Os autores verificaram a distribuição mais uniforme do polímero na madeira com a penetração na direção tangencial. Observaram, também, que o aumento da umidade de 0 para 30% não mudou a quantidade de fluido no interior da madeira, mas tornou a sua distribuição menos uniforme, tanto nos vasos quanto nas fibras.

Yalinkilic et al. (1998) impregnaram amostras de Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*), com os monômeros de estireno, metacrilato de metila e uma mistura dos dois (50% de estireno + 50% de metacrilato de metila) utilizando o peróxido de benzoíla como iniciador. Os autores observaram que os compósitos apresentaram expressivo ganho de massa, baixa absorção de água e baixa perda de massa depois de 12 semanas expostos aos fungos *Tyromyces palustris* e *Coriolus versicolor*, comparados com a madeira não tratada, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2- Comparação entre as amostras de Japanese cedar não tratadas e impregnadas. Fonte: Yalinkilic et al. (1998).

Amostra	Ganho de massa (%)	Absorção de água (%)	Perda de massa (%)	
			<i>Tyromyces palustris</i>	<i>Coriolus versicolor</i>
Não tratada	-	338,9	44,6	50,5
i-E ^a	225,3	23,3	11,1	2,8
i-M ^b	212,8	26,9	12,6	7,2
i-(E+M) ^c	210,5	28,4	6,5	2,9

^aImpregnadas com estireno. ^bImpregnadas com metacrilato de metila. ^cImpregnadas com estireno + metacrilato de metila.

Solpan; Güven (1999) usaram monômeros de metacrilato de metila (MMA), acrilonitrila (AN) e álcool alílico (AA) e, também, as misturas (AA) + (AN) e (AA) + (MMA) para melhorar a resistência mecânica e a durabilidade de amostras de Beech (*Nothofagus sp*) e Spruce (*Picea sp*). Após a impregnação, a polimerização e a copolimerização foram concluídas através de radiação gama. A microestrutura dos compósitos polímero (copolímero)-madeira foi investigada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Verificou-se que todas as misturas dos monômeros usadas proporcionaram aumento nas propriedades de resistência à compressão paralela e normal às fibras da madeira e protegeram as amostras contra a degradação biológica. Também foi observado que as amostras impregnadas com o copolímero (AA) + (MMA) foram as que apresentaram um valor mais alto de resistência mecânica, menor absorção de água e menor degradação contra fungos e bactérias.

Yalinkilic et al. (1999) estudaram amostras de Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*), inicialmente tratadas com ácido bórico (o qual tem como uma de suas características o aumento da resistência ao fogo), e depois secas à temperatura ambiente. Logo após esse processo, as amostras foram impregnadas com monômeros vinílicos (estireno e metacrilato de metila). A temperatura de polimerização situou-se entre 60 e 90 °C. Os CPMs exibiram satisfatória estabilidade dimensional e uma baixa absorção de água.

Hill et al. (2001) modificaram quimicamente amostras de Scots pine (*Pinus sylvestris*) e Corsican pine (*Pinus nigra*) com anidrido metacrílico, as quais posteriormente foram impregnadas com estireno utilizando o azoisobutironitrila como iniciador. Amostras impregnadas com estireno modificadas e não modificadas

quimicamente, após uma exposição à radiação ultravioleta (UV), foram analisadas quanto a mudanças químicas usando espectroscopia de fotoelétrons de raios-X e infravermelho. Não foi observada melhoria na estabilidade química da madeira. Houve evidências que o estireno permaneceu na amostra após a exposição, mas isto não dependeu do mesmo estar ligado covalentemente ao substrato de madeira. Os autores concluíram que as altas temperaturas empregadas nas modificações danificaram as amostras e que este dano foi aumentado pela exposição aos raios ultravioletas.

Devi et al. (2003) realizaram a impregnação da madeira de *Hevea brasiliensis* usando o monômero de estireno em combinação com o elemento de ligação metacrilato de glicidil (GMA). Após a impregnação, foram determinados a dureza, a estabilidade dimensional, módulos de ruptura e de elasticidade, tendo os autores encontrado valores mais altos em todas as propriedades estudadas.

Omidvar; Ruddick (2004) estudaram a resistência de compósitos obtidos através da impregnação da madeira *Populus tremuloides* com o monômero de estireno, utilizando como iniciador o peróxido de benzoíla, contra a degradação causada por fungos. As amostras tiveram um aumento de massa em torno de 55% após a impregnação e não preveniram a degradação causada pelo fungo *Gloeophyllum trabeum*, mas foram eficazes para prevenir a degradação causada pelo fungo *Trametes versicolor*.

4.4- Considerações finais sobre a revisão bibliográfica

A revisão bibliográfica realizada até o momento evidenciou a não disponibilidade de trabalhos científicos abrangentes, abordando a análise das propriedades e da microestrutura de madeiras de reflorestamento brasileiro, dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*, impregnadas com estireno e metacrilato de metila. Assim, confirma-se a conveniência e originalidade da realização do trabalho proposto.

5- MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão apresentados os materiais utilizados na parte experimental do trabalho, os métodos adotados para a realização dos ensaios e os procedimentos assumidos para a obtenção dos corpos-de-prova. Também são mencionados os equipamentos empregados na experimentação e a síntese dos procedimentos estatísticos usados na análise dos resultados.

5.1- Madeiras

Foram realizados ensaios em corpos-de-prova (CPs), obtidos das madeiras de reflorestamento *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, respectivamente com 20 e 15 anos de idade, provenientes do Horto Florestal de Itirapina/SP, não impregnados e impregnados com monômero de estireno e de metacrilato de metila.

5.1.1- *Eucalyptus grandis*

O *Eucalyptus grandis* apresenta: parênquima axial indistinto mesmo sob lente, paratraqueal vasicêntrico escasso; raios visíveis apenas sob lente no topo, finos; vasos visíveis a olho nu, pequenos a médios, poucos, porosidade difusa, arranjo diagonal, solitários, obstruídos por tilos; camadas de crescimento distintas, individualizadas por zonas fibrosas tangenciais mais escuras, de acordo com Ferreira (2003). O cerne e o alburno são distintos pela cor, cerne castanho-rosado-claro, alburno bege-rosado, pouco brilho, cheiro e gosto imperceptíveis. Ocorre nas

áreas de reflorestamento das regiões sul e sudeste do Brasil. A Figura 7 mostra a foto de uma plantação de *Eucalyptus grandis*.

Figura 7- Plantação de *Eucalyptus grandis*. Fonte: Ciesla (2005).

5.1.2- *Pinus caribaea* var. *hondurensis*

O *Pinus caribaea* var. *hondurensis* apresenta: traqueídes individualmente indistintos a olho nu, mas visíveis com auxílio de lente, muito pequenos e com orientação radial bem definida; raios visíveis sob lente no topo, pouco notados nas faces tangencial e radial; camadas de crescimento claramente demarcadas por lenho inicial e tardio, com espessuras variáveis; textura média; cerne de coloração bege acentuada, resinoso e de cheiro agradável, segundo Morales (2002). Ocorre nas áreas de reflorestamento das regiões sul e sudeste do Brasil. A Figura 8 mostra a foto de uma plantação de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*.

Figura 8- Plantação de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. Fonte: Ciesla (2005).

5.2- Ensaios para a determinação das propriedades de madeiras impregnadas e não impregnadas

As propriedades foram obtidas segundo as especificações do Anexo B da Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 7190:1997. A tenacidade foi calculada considerando-se o que prescreve o documento normativo D143-52:1981, da American Society for Testing and Materials (ASTM). A taxa de desgaste foi obtida de acordo com o documento normativo LD 3-2000:2001, da National Electrical Manufacturers Association (NEMA). O ensaio de intemperismo artificial foi feito segundo o documento normativo G 26:1995, da ASTM.

Os ensaios foram divididos em duas etapas: A e B. Na Etapa A foram realizados ensaios em corpos-de-prova das madeiras *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, não impregnados e impregnados com os monômeros de estireno e de metacrilato de metila, para a determinação das seguintes propriedades:

- ♦ Densidade (ρ);
- ♦ Retratabilidade radial total ($\epsilon_{r,2}$);
- ♦ Retratabilidade tangencial total ($\epsilon_{r,3}$);
- ♦ Inchamento radial total ($\epsilon_{i,2}$);
- ♦ Inchamento tangencial total ($\epsilon_{i,3}$);
- ♦ Resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0});
- ♦ Módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras (E_{c0});
- ♦ Resistência à tração paralela às fibras (f_{t0});
- ♦ Módulo de elasticidade longitudinal na tração paralela às fibras (E_{t0});
- ♦ Resistência à tração normal às fibras (f_{t90});
- ♦ Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0});
- ♦ Dureza paralela às fibras (f_{H0});
- ♦ Dureza normal às fibras (f_{H90});
- ♦ Tenacidade (W);
- ♦ Resistência ao impacto na flexão (f_{bw}).

Na Etapa B, realizada após a análise dos resultados da Etapa A, foram feitos ensaios em corpos-de-prova da madeira *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, não impregnados e impregnados com monômero de metacrilato de metila, para a determinação das seguintes propriedades:

- ♦ Resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0});
- ♦ Módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras (E_{c0});
- ♦ Módulo de resistência à flexão estática (f_M);
- ♦ Módulo de elasticidade longitudinal na flexão (E_{M0});
- ♦ Dureza paralela às fibras (f_{H0});
- ♦ Dureza normal às fibras (f_{H90});
- ♦ Taxa de desgaste (abrasão);
- ♦ Desempenho ao intemperismo artificial.

A escolha destes parâmetros se justifica por se tratarem de propriedades relevantes para balizarem a indicação da espécie para as aplicações mais adequadas.

5.3- Retirada e identificação dos corpos-de-prova

Para os ensaios da Etapa A, os corpos-de-prova (CPs) foram obtidos a partir de doze peças com dimensões nominais (5 x 12 x 180) cm, para cada espécie de madeira (*Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*). Foram retirados, de cada peça, conjuntos de três amostras, para cada propriedade estudada, conforme esquematizado na Figura 9. Os CPs foram ensaiados de acordo com o esquema apresentado na Figura 10. Ao todo foram obtidos 624 corpos-de-prova, cada um identificado com uma letra maiúscula (referente à viga), com uma letra minúscula (referente ao tipo de ensaio) e com um número (referente ao tipo de impregnação).

Os CPs, para os ensaios da Etapa B, foram obtidos a partir de seis peças com dimensões nominais (5 x 6,8 x 126) cm, para a espécie *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, conforme esquematizado na Figura 11. Cada peça forneceu duas amostras para o ensaio de flexão estática, os quais foram extraídos nas dimensões (42 x 1,8 x 1,8) cm, conforme esquema da Figura 12. O ensaio foi realizado com aplicação de força no ponto médio do corpo-de-prova, obedecendo-se a relação vão livre/altura igual a 21, indicada pela NBR 7190:1997. As dimensões da seção transversal foram adotadas considerando o que consta no item B.8.3 do Anexo B da citada norma, e extrapolando sua possibilidade para o caso da flexão estática.

Além disso, foram retirados dessas peças, conjuntos de três amostras para os ensaios de compressão paralela às fibras e, também, para as durezas paralela e normal às fibras, de acordo com o esquema apresentado na Figura 13. Ao todo foram obtidos 60 corpos-de-prova, cada um identificado com uma letra maiúscula (referente à viga), com uma letra minúscula (referente ao tipo de ensaio) e com um número (referente ao tipo de impregnação).

Em ambas as Etapas, as pressões de impregnação estão indicadas nas Figuras correspondentes aos ensaios realizados.

Para calcular o valor da taxa de desgaste (abrasão), os CPs foram obtidos a partir de três amostras da madeira sem impregnação e três da madeira já impregnada com metacrilato de metila (à pressão 0,66 MPa), de dimensões nominais (5 x 5 x 1) cm. As amostras foram coladas entre si, para chegarem nas dimensões requeridas pela norma (10 x 10 x 1) cm, conforme mostra a Figura 14, resultando num total de 6 CPs. O ensaio foi feito nas amostras sem revestimento com verniz.

Figura 9- Esquema da retirada dos corpos-de-prova da viga de madeira na Etapa A, para a determinação de: a) Resistência e Módulo de elasticidade longitudinal na tração paralela às fibras; b) Dureza paralela e Dureza normal às fibras; c) Resistência e Módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras; d) Resistência à tração normal às fibras; e) Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; f) Tenacidade e Resistência ao impacto na flexão; g) Densidade; h) Retratabilidade radial total, Retratabilidade tangencial total, Inchamento radial total e Inchamento tangencial total.

Technical drawing of a concrete slab cross-section and longitudinal section.

CORTE - AA

Dimensions (cm):

- Width: 5
- Height: 18

Longitudinal Section

Dimensions (cm):

- Total length: 126
- Segment lengths: 42, 42, 42
- Column width: 15
- Reinforcement: i (top), c (bottom)
- Right end: estimativa

Unidade (cm)

Figura 11- Esquema da retirada dos corpos-de-prova da viga de madeira na Etapa B, para a determinação de: b) Dureza paralela e Dureza normal às fibras; c) Resistência e Módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras; i) Módulo de resistência e Módulo de elasticidade longitudinal na flexão estática.

Figura 12- Representação dos CPs utilizados para ensaios de flexão estática, Etapa B.

Figura 13- Representação dos CPs utilizados para ensaios de compressão paralela às fibras e, durezas paralela e normal às fibras, da Etapa B.

Figura 14- Representação dos CPs utilizados para ensaios de desgaste mecânico, Etapa B.

O ensaio de intemperismo artificial foi realizado com o apoio do Professor Dr. José Augusto Marcondes Agnelli, empregando-se a Máquina de Envelhecimento Acelerado da UFSCar (Universidade Federal de São Carlos). Neste equipamento, emprega-se lâmpada de xenônio com fonte de emissão da energia responsável pelo envelhecimento acelerado das amostras estudadas. Este método é comprovadamente eficiente na reprodução das condições do envelhecimento natural. Colocaram-se na referida máquina, seis CPs sem impregnação e seis impregnados com metacrilato de metila, para os ensaios de compressão paralela às fibras e, também, seis para os de dureza normal às fibras. Os CPs permaneceram na máquina por 2400h (100 dias), equivalendo ao envelhecimento natural proporcionado por dois anos de exposição à natureza.

5.4- Produtos químicos

Os itens a seguir descrevem os produtos químicos utilizados na parte experimental do trabalho. Registra-se que a maneira indicada de utilizá-los e os preços dos mesmos encontram-se, respectivamente, no ANEXO I e no ANEXO II.

5.4.1- Estireno

O monômero de estireno é um produto químico da família dos hidrocarbonetos aromáticos, líquido, incolor, utilizado na fabricação de poliestireno, borracha sintética tipo SBR (Estireno-Butadieno), emulsões de estireno, poliéster, óleos estirenizados, resinas sulfonadas, copolímeros de estireno, resinas estirênico-maleicas e derivados químicos.

Estes derivados, por sua vez, são utilizados em inúmeros produtos acabados, tais como: caixas de rádio e televisão, peças para geladeiras, telefones, acessórios para automóveis, brinquedos, canetas, materiais descartáveis, borrachas, tintas à base de água, vernizes, colas, impermeabilizantes, isolamento térmico, solas e saltos para sapatos, entre outros.

O monômero de estireno utilizado no presente trabalho foi cedido pela COMPANHIA BRASILEIRA DE ESTIRENO, de Cubatão/SP. Algumas de suas características, fornecidas pela empresa, encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3- Algumas características do monômero de estireno.

Propriedades físico-químicas	
Nome do produto	estireno
Fórmula química	C ₈ H ₈
Estado físico	líquido límpido
Cor	incolor
Odor	característico aos hidrocarbonetos aromáticos
Ponto de ebulição	145,2 °C a 760 mmHg
Ponto de congelamento	-30,628 °C
Ponto de fulgor (aberto)	37 °C
Calor de vaporização a 25°C	102,65 cal/g
Calor de polimerização	160,2 cal/mol
Índice de refração a 25°C	1,5439
Densidade a 20°C	0,906 g/cm ³
Pressão de vapor	6,1 mmHg a 25 °C
Solubilidade em água	Insolúvel

5.4.2- Metacrilato de metila

O monômero de metacrilato de metila (MMA) é um produto químico orgânico, de constituição definida. O MMA é obtido através de esterificação, pelo sistema contínuo, de duas matérias-primas básicas: acetona cianidrina e metanol.

O produto é utilizado na produção de chapas acrílicas, resinas para injeção e extrusão e polímeros/copolímeros para usos em tintas, vernizes e resinas para papéis. Pode também ser aplicado como intermediário em sínteses orgânicas diversas, bem como na produção de resinas odontológicas.

Parte do monômero de metacrilato de metila utilizado foi cedido pela COMPANHIA QUÍMICA METACRIL, de São Bernardo do Campo/SP e o restante do material foi adquirido na SCHENECTADY CRIOS S/A, de Rio Claro/SP. Algumas de suas características, fornecidas pelas empresas, encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4- Algumas características do monômero de metacrilato de metila.

Propriedades físico-químicas	
Nome do produto	metacrilato de metila
Fórmula química	C5 H8 O2
Estado físico	líquido límpido
Cor	incolor
Odor	irritante
Inibidor	monometil éter de hidroquinona (MEHQ)
Ponto de ebulição	101 °C
Ponto de fusão	-48 °C
Índice de refração a 25°C	1,412
Densidade a 20/4°C	0,94 g/cm ³
Pressão de vapor	46,7 mmHg a 20 °C
Calor específico	0,45 cal/g°C
Viscosidade	0,5 cP (absoluta)
PH	7,0 para uma solução aquosa a 5%
Solubilidade em água	1,6 g/L a 20 °C
Solubilidade em álcool	Completa

5.4.3- Peróxido de benzoíla

Os peróxidos são compostos orgânicos iniciadores de reações químicas utilizados como fontes de radicais livres. Promovem a polimerização entre diversos tipos de produtos usados para obtenção de resinas para fabricação de tintas, plásticos e compósitos. São também usados como agentes alvejantes de fibras e farinhas. Na área farmacêutica são empregados em cremes para pele e xampus.

O peróxido de benzoíla é utilizado como um iniciador na polimerização de monômeros como, por exemplo: estireno, acetato de vinila, metacrilatos e compostos alílicos.

O peróxido de benzoíla utilizado foi cedido pela empresa DML PRODUTOS QUÍMICOS LTDA., de São Paulo/SP. Algumas características do produto, fornecidas pela empresa, estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5- Algumas características do peróxido de benzoíla.

Dados técnicos	
Nome do produto	peróxido de benzoíla
Fórmula química	C14 H10 O4
Aspecto	pó branco, úmido
Teor de peróxido	aprox. 75% p
Oxigênio ativo	aprox. 4,95% p
Agente dessensibilizante	água
Densidade aparente	aprox. 0,59 kg/L
Ponto de fusão (seco)	aprox. 102-105 °C
Tempo de meia vida: 10 h / 1 h / 1 min (0,1 m/benzeno)	72 °C / 91 °C / 103 °C
Temperatura crítica (SADT)	70 °C
Temperatura de estocagem recomendada	5 a 30 °C

5.5- Fases do processo de obtenção dos CPMs

Para realizar a impregnação da madeira, tanto com o monômero de estireno quanto com o monômero de metacrilato de metila, é necessário que sejam seguidas algumas etapas, as quais encontram-se descritas a seguir.

5.5.1- Secagem da madeira

Antes da impregnação com os monômeros, foi necessária a remoção de parte da água da madeira, em virtude do teor de umidade contido na mesma. Os corpos-de-prova foram então colocados em estufa, numa temperatura entre 40 e 50 °C, até atingirem umidade em torno de 12%. A temperatura da estufa foi elevada gradativamente para redução da probabilidade de ocorrência de rachaduras ou empenamentos.

Para a obtenção dos corpos-de-prova com umidade em torno de 12%, calculou-se a umidade de uma amostra da peça de onde os mesmos foram retirados e admitiu-se que a amostra apresentava a mesma porcentagem de umidade da peça. Dessa forma, foi possível estimar-se a massa da peça em questão e, por consequência, de cada corpo-de-prova, quando atingida a umidade de 12%.

5.5.2- Monômeros e iniciador

Utilizaram-se os monômero de estireno e de metacrilato de metila, na forma líquida, e o peróxido de benzoíla, na forma de pó.

5.5.3- Dosagem requerida

A seguinte proporção dos elementos químicos foi utilizada no preparo das resinas: volume de monômero igual à soma dos volumes aparentes de todos os corpos-de-prova e, 1,24% desse volume, de peróxido de benzoíla, com base nos estudos realizados por Manrich (1984) e Gomes (1996).

5.5.4- Impregnação e polimerização

O método utilizado para a impregnação da solução monômero-iniciador foi o de vácuo-pressão, em autoclave com capacidade de 159 L. Os corpos-de-prova foram colocados dentro da autoclave e, após o fechamento da mesma, efetuou-se vácuo por 30 min. Após esse período, foi injetada na autoclave a solução monômero-iniciador e, em seguida, aplicada uma pressão que podia atingir, dependendo do caso, 0,22 MPa, 0,44 MPa ou 0,66 MPa, durante 30 min, para completar o processo de impregnação. Cabe registrar que a pressão de 0,66 MPa foi usada tomando-se como base os trabalhos desenvolvidos por Manrich (1984), Gomes (1996), entre outros e, as demais pressões, para fins de comparação. A Figura 15 ilustra o processo de impregnação.

Figura 15- Esquema do processo de impregnação: a) amostra sem impregnação; b) autoclave; c) amostras no interior da autoclave; d) amostra impregnada.

Em seguida, os corpos-de-prova foram removidos da autoclave. Também retirou-se dos mesmos o excesso de resina de impregnação, com o auxílio de um papel toalha, segundo procedimento empregado por Gomes (1996), Devi, et al. (2003), entre outros. Na sequência, os corpos-de-prova foram pesados, embrulhados em papel alumínio, de acordo com Meyer (1981), e levados à estufa por um período de 48 h a uma temperatura de 60 °C. Após isto, as amostras foram desembulhadas, pesadas e colocadas novamente na estufa, por um período de 72 h, a uma temperatura de 50 °C, para consolidação do processo de polimerização no interior da madeira. O tempo de permanência e a temperatura da estufa foram definidos tomando-se como base os trabalhos citados no item 4.3.4. Decorrido esse período, os corpos-de-prova foram retirados da estufa e, logo em seguida, pesados e suas dimensões medidas, possibilitando a realização dos ensaios para obtenção das

propriedades desejadas. Uma ilustração do processo de polimerização se encontra na Figura 16.

Figura 16- Esquema do processo de polimerização: a) retirada do excesso de produto químico da superfície da amostra; b) amostra envolvida por papel alumínio; c) estufa com amostras - Fonte: Adaptada de Nascimento (2003); d) compósito polímero-madeira.

5.6- Equipamentos utilizados

Os equipamentos utilizados durante a realização do trabalho foram:

♦ **Impregnação:**

- Autoclave, capacidade de 159 L (Figura 15b).

♦ **Ensaaios físicos e mecânicos:**

- Máquina de Ensaio Universal AMSLER, com capacidade de 250 kN (Figura 17).
- Equipamento para determinação da tenacidade da madeira, construído por Siqueira (1986) (Figura 18).
- Máquina de Envelhecimento Acelerado Atlas Weather-Ometer, modelo 65 XW-WR1, com fonte de radiação de lâmpada de xenônio de 6500 W, filtros interno e externo de borossilicato (Figura 19).
- Máquina de Abrasão, com capacidade de 70 ciclos/min, modelo ABRASER 5151 / TABER Industries, a qual utiliza Lixa (S-42), com base na NEMA LD 3-2000 (Figura 20).
- Relógios comparadores, Mitutoyo Indústria Brasileira, com sensibilidade de 0,01 mm e 0,001 mm.
- Estufa retilínea, FANEM LTDA / SP.
- Estufa com circulação e renovação MA 035, MARCONI Equipamentos e Calibração para Laboratórios (Figura 16c).
- Balança eletrônica digital, ACATEC – BDC 3300, com sensibilidade de 0,01 g.
- Paquímetro, Mitutoyo Digimatic Caliper MIP E-103, com sensibilidade de 0,01 mm.
- Oficina completa para a preparação dos corpos-de-prova.

♦ **Análise microscópica:**

- Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) LEO-440 (Figura 21).

Figura 17- Máquina de Ensaio Universal AMSLER. Fonte: Stolf (2000).

Figura 18- Equipamento para determinação da tenacidade da madeira. Fonte: Stolf (2000).

Figura 19- Máquina de Envelhecimento Acelerado. Fonte: Nascimento (2003).

Figura 20- Máquina de Abrasão.

Figura 21- Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Fonte: IQSC (2005).

5.7- Laboratórios

A preparação da solução (monômero + iniciador) realizou-se no laboratório do Grupo de Polímeros Bernhard Gross, do Instituto de Física de São Carlos (IFSC), Universidade de São Paulo (USP).

O processo de impregnação e os ensaios mecânicos foram efetuados no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM), do Departamento de Engenharia de Estruturas (SET), Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP).

O ensaio de desgaste mecânico foi realizado no Laboratório de Produto Acabado da Eucatex SA, de Botucatu/SP. O ensaio de intemperismo artificial foi feito no Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa), da Universidade de Federal de São Carlos.

A análise microscópica foi realizada na Central de Análises Químicas Instrumentais (CAQI), do Instituto de Química de São Carlos (IQSC), da Universidade de São Paulo (USP).

5.8- Procedimentos para análise dos resultados

Na análise dos resultados empregaram-se os procedimentos estatísticos análise de regressão e comparação de pares, usuais em casos desta natureza, Meyer (1972). O teste de comparação de pares consiste em avaliar, considerando-se os CPs sem impregnação (si) e impregnados com o monômero de estireno (i-E) ou de metacrilato de metila (i-M), se a diferença entre as médias das propriedades físicas e mecânicas estudadas pode ser nula, evidenciando que as mesmas podem ser admitidas como estatisticamente equivalentes.

Calculou-se a diferença entre os valores das propriedades, dois a dois – (si) e (i-E), (si) e (i-M), (i-E) e (i-M) – gerando-se as populações P_A , P_B e P_C , respectivamente. A média e o desvio padrão dessas populações foram calculados e os intervalos de confiança obtidos, a um nível de probabilidade de 95%, conforme a Equação 1. Genericamente, trata-se de determinar o intervalo de confiança da média das diferenças entre dois conjuntos de dados.

$$\bar{x}_m - t_{\frac{\alpha}{2}, n-1} \frac{s_m}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x}_m + t_{\frac{\alpha}{2}, n-1} \frac{s_m}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

Onde: μ é o intervalo de confiança, $\bar{x}_m$ é a média aritmética amostral da população, s_m é o desvio padrão amostral dessa população, n é o número de amostras, α é o nível de confiança (neste trabalho adotado como 95%) e $t_{\frac{\alpha}{2}, n-1}$ é o valor tabelado da distribuição “t” de Student com $n-1$ graus de liberdade.

A análise foi feita usando esse intervalo. Se o zero pertencer a ele, as médias das duas populações podem ser consideradas como equivalentes. Caso o zero não pertença a esse intervalo, isso significa que as mesmas são consideradas estatisticamente não equivalentes.

6- APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Foram ensaiados corpos-de-prova (CPs) sem impregnação (si), impregnados com monômero de estireno (i-E) e impregnados com monômero de metacrilato de metila (i-M), para as espécies *Eucalyptus grandis* (EG) e *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (PC).

Nos itens a seguir constam os resultados das propriedades físicas e mecânicas da madeira propostas no trabalho, referenciados a 12% de umidade. Além disso, são apresentadas as análises da estrutura microscópica da madeira sem impregnação e das impregnadas com os mencionados monômeros. As Tabelas contendo os dados obtidos nos ensaios realizados encontram-se no ANEXO III.

6.1- Etapa A - *Eucalyptus grandis*

6.1.1- Sem impregnação, impregnado com estireno e com metacrilato de metila, à pressão de impregnação 0,66 MPa

6.1.1.1- Propriedades físicas e mecânicas

Nas Tabelas 6 a 8 e nas Figuras 22 a 27 estão apresentados os valores médios das massas e das propriedades estudadas, obtidos na Etapa A (item 5.2), para o *Eucalyptus grandis*.

Tabela 6- Valores médios das massas do EG - (si) e (i-E).

CP (g)	EG (si)	EG (i-E)
ρ	28,0	27,5
$\epsilon_{r,2} - \epsilon_{r,3} - \epsilon_{i,2} - \epsilon_{i,3}$	27,9	27,4
$f_{c0} - E_{c0}$	362,9	357,0
$f_{t0} - E_{t0}$	284,5	273,8
f_{t90}	121,3	106,9
f_{v0}	131,7	128,1
$f_{H0} - f_{H90}$	357,9	351,6
$W - f_{bw}$	111,6	105,4

Figura 22- Comparação entre as massas do EG - (si) e (i-E), média de doze CPs para cada propriedade.

Tabela 7- Valores médios das massas do EG - (si) e (i-M).

CP (g)	EG (si)	EG (i-M)
ρ	27,2	27,3
$\epsilon_{r,2} - \epsilon_{r,3} - \epsilon_{i,2} - \epsilon_{i,3}$	27,0	27,1
$f_{c0} - E_{c0}$	346,3	342,5
$f_{t0} - E_{t0}$	291,0	273,6
f_{t90}	230,5	229,2
f_{v0}	113,2	112,1
$f_{H0} - f_{H90}$	340,1	339,7
$W - f_{bw}$	109,2	105,0

Figura 23- Comparação entre as massas do EG - (si) e (i-M), média de doze CPs para cada propriedade.

Tabela 8- Valores médios das propriedades físicas e mecânicas do EG - (si), (i-E) e (i-M).

Propriedade	EG (si)	EG (i-E)	EG (i-M)
ρ (g/cm ³)	0,990	0,992	0,973
$\epsilon_{r,2}$ (%)	7,1	6,8	6,7
$\epsilon_{r,3}$ (%)	8,3	8,5	8,4
$\epsilon_{i,2}$ (%)	7,7	7,3	7,2
$\epsilon_{i,3}$ (%)	9,2	9,3	9,3
f_{c0} (MPa)	55,9	63,3	62,2
E_{c0} (MPa)	19061	18885	18548
f_{t0} (MPa)	68,2	63,3	57,2
E_{t0} (MPa)	14023	15840	15357
f_{t90} (MPa)	5,8	6,4	5,9
f_{v0} (MPa)	17,9	18,9	18,8
f_{H0} (MPa)	126,0	187,9	181,8
f_{H90} (MPa)	99,2	135,7	132,3
W (J)	32,1	25,3	27,2
f_{bw} (kJ/m ²)	83805	69664	72728

Figura 24- Comparação entre as propriedades físicas do EG - (si), (i-E) e (i-M), média de doze CPs para cada propriedade.

Figura 25- Comparação entre as propriedades mecânicas do EG - (si), (i-E) e (i-M), média de doze CPs para cada propriedade.

Figura 26- Comparação entre as propriedades mecânicas do EG - (si), (i-E) e (i-M), média de doze CPs para cada propriedade.

Figura 27- Comparação entre as propriedades mecânicas do EG - (si), (i-E) e (i-M), média de doze CPs para cada propriedade.

6.1.1.2- Análise e discussão dos resultados

As Tabelas 9 e 10 apresentam as variações percentuais médias das massas e das propriedades físicas e mecânicas, respectivamente, obtidas para a espécie *Eucalyptus grandis* impregnada com os monômeros de estireno e de metacrilato de metila, em relação à madeira sem impregnação.

Tabela 9- Variação percentual média das massas do EG (i-E) e (i-M) em relação ao EG (si).

CP (g)	EG (si) e (i-E) (%)	EG (si) e (i-M) (%)
ρ	-1,8	0,4
$\epsilon_{r,2} - \epsilon_{r,3} - \epsilon_{i,2} - \epsilon_{i,3}$	-1,8	0,4
$f_{c0} - E_{c0}$	-1,6	-1,1
$f_{t0} - E_{t0}$	-3,8	-6,0
f_{t90}	-11,9	-0,6
f_{v0}	-2,7	-1,0
$f_{H0} - f_{H90}$	-1,8	-0,1
$W - f_{bw}$	-5,6	-3,8

Tabela 10- Variação percentual média das propriedades físicas e mecânicas do EG (i-E) e (i-M) em relação ao EG (si).

Propriedade	EG (si) e (i-E) (%)	EG (si) e (i-M) (%)
ρ (g/cm ³)	0,2	-1,7
$\epsilon_{r,2}$ (%)	-4,2	-5,6
$\epsilon_{r,3}$ (%)	2,4	1,2
$\epsilon_{i,2}$ (%)	-5,2	-6,5
$\epsilon_{i,3}$ (%)	1,1	1,1
f_{c0} (MPa)	13,2	11,3
E_{c0} (MPa)	-0,9	-2,7
f_{t0} (MPa)	-7,2	-16,1
E_{t0} (MPa)	13,0	9,5
f_{t90} (MPa)	10,3	1,7
f_{v0} (MPa)	5,6	5,0
f_{H0} (MPa)	49,1	44,3
f_{H90} (MPa)	36,8	33,4
W (J)	-21,2	-15,3
f_{bw} (kJ/m ²)	-16,9	-13,2

- (a) A partir dos resultados obtidos para o *Eucalyptus grandis* ficou evidente que não houve absorção dos monômeros por parte da madeira, já que a massa desta diminuiu após o procedimento de impregnação. Esta diminuição de massa pode ser explicada devido à perda água contida no interior dos corpos-de-prova quando estes ficaram na estufa. Como não houve absorção, não foi observada variação significativa nos valores de quase todas as propriedades físicas e mecânicas estudadas, conforme demonstra a síntese da análise estatística dos resultados, na Tabela 11.
- (b) As únicas propriedades que apresentaram uma variação relevante foram a dureza paralela e a dureza normal às fibras. Isso pode ser entendido considerando-se que estas são propriedades relacionadas à superfície do corpo-de-prova. Embora não tenha ocorrido absorção dos monômeros, houve a formação de uma camada fina dos mesmos sobre a superfície da madeira, contribuindo para o aumento da dureza. Também pela Tabela 11, observa-se que as propriedades do *Eucalyptus grandis* (i-E) e (i-M) são equivalentes, no nível de confiabilidade adotado.

Tabela 11- Intervalos de confiança entre: EG (si) e (i-E) / EG (si) e (i-M) / EG (i-E) e (i-M).

Propriedade	EG (si) e (i-E)	EG (si) e (i-M)	EG (i-E) e (i-M)
ρ (g/cm ³)	$-0,017 \leq \mu \leq 0,014$	$-0,001 \leq \mu \leq 0,034$	$-0,001 \leq \mu \leq 0,038$
$\varepsilon_{r,2}$ (%)	$-0,3 \leq \mu \leq 0,9$	$-0,2 \leq \mu \leq 1,1$	$-0,2 \leq \mu \leq 0,4$
$\varepsilon_{r,3}$ (%)	$-0,6 \leq \mu \leq 0,3$	$-1,1 \leq \mu \leq 1,0$	$-0,7 \leq \mu \leq 0,9$
$\varepsilon_{i,2}$ (%)	$-0,3 \leq \mu \leq 1,1$	$-0,2 \leq \mu \leq 1,2$	$-0,3 \leq \mu \leq 0,5$
$\varepsilon_{i,3}$ (%)	$-0,7 \leq \mu \leq 0,4$	$-1,3 \leq \mu \leq 1,2$	$-0,9 \leq \mu \leq 1,1$
f_{c0} (MPa)	$-14,83 \leq \mu \leq 0,03$	$-12,54 \leq \mu \leq 0,09$	$-10,53 \leq \mu \leq 12,87$
E_{c0} (MPa)	$-3046 \leq \mu \leq 3398$	$-4321 \leq \mu \leq 5346$	$-2647 \leq \mu \leq 3320$
f_{t0} (MPa)	$-13 \leq \mu \leq 23$	$-5 \leq \mu \leq 27$	$-12 \leq \mu \leq 24$
E_{t0} (MPa)	$-3988 \leq \mu \leq 353$	$-2697 \leq \mu \leq 27$	$-2482 \leq \mu \leq 3447$
f_{t90} (MPa)	$-1,8 \leq \mu \leq 0,4$	$-1,1 \leq \mu \leq 0,8$	$-0,9 \leq \mu \leq 1,9$
f_{v0} (MPa)	$-2,9 \leq \mu \leq 0,9$	$-2,1 \leq \mu \leq 0,3$	$-1,7 \leq \mu \leq 2,0$
f_{H0} (MPa)	$-69 \leq \mu \leq -55$	$-61 \leq \mu \leq -50$	$-2 \leq \mu \leq 14$
f_{H90} (MPa)	$-42 \leq \mu \leq -31$	$-42 \leq \mu \leq -24$	$-7 \leq \mu \leq 13$
W (J)	$-0,4 \leq \mu \leq 13,9$	$-3,1 \leq \mu \leq 12,9$	$-10,1 \leq \mu \leq 6,3$
f_{bw} (kJ/m ²)	$-3936 \leq \mu \leq 32219$	$-11762 \leq \mu \leq 33916$	$-26511 \leq \mu \leq 20382$

(c) Tais conclusões são reforçadas pela análise das estruturas microscópicas do *Eucalyptus grandis* (si), (i-E) e (i-M), apresentadas, respectivamente, nas Figuras 28a, 28b e 28c. Conforme nelas observado, não houve penetração dos monômeros e posterior polimerização dos mesmos no interior das fibras e vasos da madeira.

(a)

(b)

(c)

Figura 28- Estrutura microscópica do *Eucalyptus grandis* observada ao Microscópio Eletrônico de Varredura: a) sem impregnação; b) impregnado com estireno; c) impregnado com metacrilato de metila.

Estes resultados confirmam os registros de Kollmann; Côté Jr (1968). Segundo os autores, a movimentação da água capilar ocorre de uma célula para outra através das pontoações. Porém, para as espécies do gênero *Eucalyptus* esse movimento sofre restrições pelas características anatômicas da espécie, com predomínio de pontoações de pequenos diâmetros e com vasos usualmente bloqueados por tiloses.

Essa característica define a madeira de *Eucalyptus grandis* como impermeável, de acordo com Vermaas¹ apud Santos et al. (2003). Isso também pode ser comprovado através da Figura 29, onde a curva característica de secagem do *Eucalyptus grandis* não apresenta a taxa de secagem constante. A baixa permeabilidade dessa madeira é a principal responsável pelo impedimento do

¹ VERMAAS, H.F. A review of drying technology for young fast-grown eucalypts. In: IUFRO, THE FUTURE OF EUCALYPTS FOR WOOD PRODUCTS, Tasmania, 2000. *Proceedings*. Tasmania: IUFRO, p.225-237, 2000. apud SANTOS, G.R.V.; JANKOWSKY, I.P.; ANDRADE, A. Curva característica de secagem para madeira de *Eucalyptus grandis*. *Scientia Forestalis*, n.63, p. 214-220, jun., 2003.

deslocamento de líquidos no seu interior, pela dificuldade de secagem e pela alta incidência de defeitos.

Figura 29- Curva característica de secagem para madeira de *Eucalyptus grandis*. Fonte: Adaptada de Santos et al. (2003).

A baixa permeabilidade da madeira de *Eucalyptus grandis* também é confirmada por Severo (2004), que propôs procedimentos de pré-vaporização para viabilizar a redução dos problemas de secagem, mesmo com acréscimo não desprezível do custo do produto final, para melhorar a permeabilidade da mesma.

6.2- Etapa A - *Pinus caribaea* var. *hondurensis*

6.2.1- Sem impregnação, impregnado com estireno e com metacrilato de metila, à pressão de impregnação 0,66 MPa

6.2.1.1- Propriedades físicas e mecânicas

Nas Tabelas 12 a 14 e nas Figuras 30 a 35 estão apresentados os valores médios das massas e das propriedades estudadas, obtidos na Etapa A (item 5.2), para o *Pinus caribaea* var. *hondurensis*.

Tabela 12- Valores médios das massas do PC - (si) e (i-E).

CP (g)	PC (si)	PC (i-E)
ρ	14,9	27,1
$\epsilon_{r,2} - \epsilon_{r,3} - \epsilon_{i,2} - \epsilon_{i,3}$	14,4	27,1
$f_{c0} - E_{c0}$	186,1	324,1
$f_{t0} - E_{t0}$	166,8	314,7
f_{t90}	65,0	123,0
f_{v0}	71,2	124,8
$f_{H0} - f_{H90}$	189,4	323,7
$W - f_{bw}$	61,6	115,4

Figura 30- Comparação entre as massas do PC - (si) e (i-E), média de doze CPs para cada propriedade.

Tabela 13- Valores médios das massas do PC - (si) e (i-M).

CP (g)	PC (si)	PC (i-M)
ρ	14,9	24,6
$\epsilon_{r,2} - \epsilon_{r,3} - \epsilon_{i,2} - \epsilon_{i,3}$	15,1	25,8
$f_{c0} - E_{c0}$	185,4	325,7
$f_{t0} - E_{t0}$	162,1	266,9
f_{t90}	132,0	228,9
f_{v0}	71,6	114,6
$f_{H0} - f_{H90}$	189,8	328,0
$W - f_{bw}$	57,4	96,7

Figura 31- Comparação entre as massas do PC - (si) e (i-M), média de doze CPs para cada propriedade.

Tabela 14- Valores médios das propriedades físicas e mecânicas do PC - (si), (i-E) e (i-M).

Propriedade	PC (si)	PC (i-E)	PC (i-M)
ρ (g/cm ³)	0,531	0,949	0,899
$\epsilon_{r,2}$ (%)	4,3	3,6	3,4
$\epsilon_{r,3}$ (%)	5,9	5,1	5,0
$\epsilon_{i,2}$ (%)	4,4	3,7	3,5
$\epsilon_{i,3}$ (%)	6,1	4,9	4,7
f_{c0} (MPa)	42,0	85,2	86,8
E_{c0} (MPa)	10945	19083	17333
f_{t0} (MPa)	48,8	83,7	81,6
E_{t0} (MPa)	10217	15016	14097
f_{t90} (MPa)	2,7	4,5	4,4
f_{v0} (MPa)	10,1	16,7	16,3
f_{H0} (MPa)	47,1	188,2	187,5
f_{H90} (MPa)	25,3	133,2	143,5
W (J)	12,7	23,1	25,4
f_{bw} (kJ/m ²)	32855	60857	65423

Figura 32- Comparação entre as propriedades físicas do PC - (si), (i-E) e (i-M), média de doze CPs para cada propriedade.

Figura 33- Comparação entre as propriedades mecânicas do PC - (si), (i-E) e (i-M), média de doze CPs para cada propriedade.

Figura 34- Comparação entre as propriedades mecânicas do PC - (si), (i-E) e (i-M), média de doze CPs para cada propriedade.

Figura 35- Comparação entre as propriedades mecânicas do PC - (si), (i-E) e (i-M), média de doze CPs para cada propriedade.

6.2.1.2- Análise e discussão dos resultados

As Tabelas 15 e 16 apresentam as variações percentuais médias das massas e das propriedades físicas e mecânicas, respectivamente, obtidas para a espécie *Pinus caribaea* var. *hondurensis* impregnada com os monômeros de estireno e de metacrilato de metila, em relação à madeira sem impregnação.

Tabela 15- Variação percentual média das massas do PC (i-E) e (i-M) em relação ao PC (si).

CP (g)	PC (si) e (i-E) (%)	PC (si) e (i-M) (%)
ρ	81,9	65,1
$\epsilon_{r,2} - \epsilon_{r,3} - \epsilon_{i,2} - \epsilon_{i,3}$	88,2	70,9
$f_{c0} - E_{c0}$	74,2	75,7
$f_{t0} - E_{t0}$	88,7	64,7
f_{t90}	89,2	73,4
f_{v0}	75,3	60,1
$f_{H0} - f_{H90}$	70,9	72,8
$W - f_{bw}$	87,3	68,5

Tabela 16- Variação percentual média das propriedades físicas e mecânicas do PC (i-E) e (i-M) em relação ao PC (si).

Propriedade	PC (si) e (i-E) (%)	PC (si) e (i-M) (%)
ρ (g/cm ³)	78,7	69,3
$\epsilon_{r,2}$ (%)	-16,3	-20,9
$\epsilon_{r,3}$ (%)	-13,6	-15,3
$\epsilon_{i,2}$ (%)	-15,9	-20,5
$\epsilon_{i,3}$ (%)	-19,7	-23,0
f_{c0} (MPa)	102,9	106,7
E_{c0} (MPa)	74,4	58,4
f_{t0} (MPa)	71,5	67,2
E_{t0} (MPa)	47,0	38,0
f_{t90} (MPa)	66,7	63,0
f_{v0} (MPa)	65,3	61,4
f_{H0} (MPa)	299,6	298,1
f_{H90} (MPa)	426,5	467,2
W (J)	81,9	100,0
f_{bw} (kJ/m ²)	85,2	99,1

- (a) A partir dos resultados apresentados para o *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, ficou evidente que houve absorção dos monômeros por parte da madeira, já que a massa desta aumentou consideravelmente após a impregnação.
- (b) No tocante à estabilidade dimensional, observou-se redução da retratibilidade radial total (16% para i-E e 21% para i-M), da retratibilidade tangencial total (14% para i-E e 15% para i-M), do inchamento radial total (16% para i-E e 21% para i-M) e do inchamento tangencial total (20% para i-E e 23% para i-M). Estes valores mostram que a impregnação atingiu o lúmen e as paredes dos elementos anatômicos, estabelecendo ligações químicas que levaram às reduções citadas, melhorando consideravelmente a estabilidade dimensional dos compósitos. Os valores percentualmente mais elevados para as propriedades na direção radial confirmam o efeito positivo da impregnação.
- (c) No que se refere às propriedades na compressão paralela às fibras, observa-se que o ganho de f_{c0} (103% para i-E e 107% para i-M) supera o ganho em E_{c0} (74% para i-E e 58% para i-M). Este fato pode ser justificado pela maior influência, em f_{c0} , do preenchimento do lúmen celular (o que aumenta a restrição à perda da estabilidade dos feixes de traqueídes comprimidos), do que a impregnação das paredes celulares, cujo aumento de rigidez é responsável pelo aumento dos valores de E_{c0} .
- (d) Os aumentos em f_{t0} (72% para i-E e 67% para i-M) e em E_{t0} (47% para i-E e 38% para i-M) mostram que as propriedades na tração paralela às fibras são mais afetadas pela impregnação das paredes celulares do que pelo preenchimento do lúmen. Pelas Figuras 36b e 36c, observa-se que o volume do polímero no lúmen das células é superior ao que terá se alojado nas paredes, fazendo com que f_{t0} e E_{t0} apresentem ganhos percentuais inferiores a f_{c0} e E_{c0} .
- (e) Observou-se, para as amostras ensaiadas sem impregnação, $f_{t0} \approx 1,16 f_{c0}$, enquanto que $f_{t0} \approx f_{c0}$ para as amostras impregnadas. Este fato evidencia outro aspecto favorável da impregnação, qual seja a redução da heterogeneidade dos compósitos (em relação à madeira natural) no que se refere à compressão paralela

e à tração paralela às fibras. A respeito da rigidez, obteve-se $E_{c0} \approx E_{t0}$ para todas as situações (si, i-E e i-M), o que era de se esperar, seja para a madeira natural, segundo Rocco Lahr (1983), seja para a madeira impregnada, conforme comentários anteriores.

- (f) Os ganhos de resistência à tração normal às fibras (67% para i-E e 63% para i-M) e de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (65% para i-E e 61% para i-M) são da mesma ordem de grandeza do observado para a resistência à tração paralela às fibras e são explicados de modo análogo ao item 6.2.1.2.d.
- (g) Os ganhos mais acentuados ocorreram na dureza paralela e na dureza normal às fibras. No caso de f_{H0} alcançou-se 300% (i-E) e 298% (i-M) enquanto que, para f_{H90} , chegou-se a 427% (i-E) e 467% (i-M). As variações mais acentuadas de f_{H90} se devem ao fato de que esta propriedade é mais afetada pelo preenchimento do lúmen em relação a f_{H0} .
- (h) Os ganhos de tenacidade e de resistência ao impacto na flexão são, obviamente, equivalentes (82% para i-E e 100% para i-M) mostrando, também para estas propriedades, a conveniência da impregnação. W e f_{bw} são sensíveis à impregnação das paredes, sendo pouco afetadas pelo preenchimento do lúmen das células.
- (i) A análise estatística dos resultados do *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (si) em relação ao *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (i-E) e (i-M) confirma a variação significativa das propriedades estudadas, conforme apresentado na Tabela 17. Novamente foi observada equivalência estatística entre as propriedades do *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (i-E) e (i-M).

Tabela 17- Intervalos de confiança entre: PC (si) e (i-E) / PC (si) e (i-M) / PC (i-E) e (i-M).

Propriedade	PC (si) e (i-E)	PC (si) e (i-M)	PC (i-E) e (i-M)
ρ (g/cm ³)	$-0,52 \leq \mu \leq -0,32$	$-0,44 \leq \mu \leq -0,29$	$-0,03 \leq \mu \leq 0,13$
$\epsilon_{r,2}$ (%)	$0,5 \leq \mu \leq 0,9$	$0,5 \leq \mu \leq 1,2$	$-0,2 \leq \mu \leq 0,5$
$\epsilon_{r,3}$ (%)	$0,4 \leq \mu \leq 1,2$	$0,5 \leq \mu \leq 1,4$	$-0,1 \leq \mu \leq 0,5$
$\epsilon_{i,2}$ (%)	$0,6 \leq \mu \leq 0,9$	$0,7 \leq \mu \leq 1,1$	$-0,1 \leq \mu \leq 0,4$
$\epsilon_{i,3}$ (%)	$0,7 \leq \mu \leq 1,8$	$0,8 \leq \mu \leq 2,2$	$-0,1 \leq \mu \leq 0,5$
f_{c0} (MPa)	$-49 \leq \mu \leq -37$	$-53 \leq \mu \leq -36$	$-10 \leq \mu \leq 7$
E_{c0} (MPa)	$-12392 \leq \mu \leq -3883$	$-9638 \leq \mu \leq -3136$	$-3099 \leq \mu \leq 6600$
f_{t0} (MPa)	$-47 \leq \mu \leq -23$	$-40 \leq \mu \leq -26$	$-6 \leq \mu \leq 11$
E_{t0} (MPa)	$-6599 \leq \mu \leq -3001$	$-5269 \leq \mu \leq -2492$	$-662 \leq \mu \leq 2501$
f_{t90} (MPa)	$-2,4 \leq \mu \leq -1,3$	$-2,4 \leq \mu \leq -1,1$	$-0,5 \leq \mu \leq 0,6$
f_{v0} (MPa)	$-10 \leq \mu \leq -4$	$-8 \leq \mu \leq -4$	$-1 \leq \mu \leq 2$
f_{H0} (MPa)	$-159 \leq \mu \leq -123$	$-153 \leq \mu \leq -128$	$-16 \leq \mu \leq 17$
f_{H90} (MPa)	$-126 \leq \mu \leq -89$	$-142 \leq \mu \leq -94$	$-24 \leq \mu \leq 4$
W (J)	$-14 \leq \mu \leq -7$	$-17 \leq \mu \leq -8$	$-9 \leq \mu \leq 4$
f_{bw} (kJ/m ²)	$-37067 \leq \mu \leq -18938$	$-44829 \leq \mu \leq -20307$	$-22122 \leq \mu \leq 12990$

- (j) A análise das estruturas microscópicas do *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (si), (i-E) e (i-M), apresentadas, respectivamente, nas Figuras 36a, 36b e 36c, mostrou que houve penetração dos monômeros e posterior polimerização dos mesmos no interior de praticamente todos os traqueídes, bem como nas paredes celulares. Isso ocorre devido à estrutura mais porosa e permeável do *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, que permite a sua impregnação e a posterior retenção do poliestireno e do polimetacrilato de metila no lúmen das células.

(a)

(b)

(c)

Figura 36- Estrutura microscópica do *Pinus caribaea* var. *hondurensis* observada ao Microscópio Eletrônico de Varredura: a) sem impregnação; b) impregnado com estireno; c) impregnado com metacrilato de metila.

6.3- Etapa B - *Pinus caribaea* var. *hondurensis*

6.3.1- Sem impregnação e impregnado com metacrilato de metila

Constatada a equivalência estatística entre as propriedades já citadas do *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (i-E) e (i-M), as propriedades mecânicas a seguir foram obtidas apenas para o *Pinus* impregnado com metacrilato de metila, mencionadas na Etapa B (item 5.2).

6.3.1.1- Propriedades mecânicas à pressão de impregnação 0,66 MPa

a) **Módulo de resistência à flexão estática (f_M) e Módulo de elasticidade longitudinal na flexão estática (f_{M0})**

Nas Tabelas 18 e 19 e, também, nas Figuras 37 e 38 estão apresentados os valores médios das massas e das propriedades estudadas (f_M e E_{M0}), para o *Pinus caribaea* var. *hondurensis*.

Tabela 18- Valor médio das massas do PC - (si) e (i-M), no ensaio de flexão estática.

CP (g)	PC (si)	PC (i-M)
$f_M - E_{M0}$	74,5	124,6

Figura 37- Comparação entre as massas do PC - (si) e (i-M), média de seis CPs para cada propriedade.

Tabela 19- Valores médios das propriedades mecânicas do PC - (si) e (i-M).

Propriedade	PC (si)	PC (i-M)
f_M (MPa)	79,8	120,2
E_{M0} (MPa)	7814	11045

Figura 38- Comparação entre as propriedades mecânicas do PC - (si) e (i-M), média de seis CPs para cada propriedade.

As Tabelas 20 e 21 apresentam as variações percentuais médias da massa e das propriedades físicas e mecânicas, respectivamente, obtidas para a espécie *Pinus caribaea* var. *hondurensis* impregnada com o monômero de metacrilato de metila, em relação à madeira sem impregnação.

Tabela 20- Variação percentual média da massa do PC (i-M) em relação ao PC (si).

CP (g)	PC (si) e (i-M) (%)
$f_M - E_{M0}$	67,2

Tabela 21- Variação percentual média das propriedades mecânicas do PC (i-M) em relação ao PC (si).

Propriedade	PC (si) e (i-M) (%)
f_M (MPa)	50,6
E_{M0} (MPa)	41,3

A partir dos resultados apresentados para o *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, pode-se observar que houve absorção dos monômeros por parte da madeira, já que a massa desta aumentou após o processo de impregnação. Foi também observada variação significativa nos valores de todas as propriedades mecânicas estudadas.

A análise estatística dos resultados do *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (si) em relação ao *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (i-M) confirma a variação estatisticamente significativa das propriedades estudadas, conforme apresentado na Tabela 22.

Tabela 22- Intervalos de confiança entre: PC (si) e (i-M).

Propriedade	PC (si) e (i-M)
f_M (MPa)	$-53 \leq \mu \leq -28$
E_{M0} (MPa)	$-4007 \leq \mu \leq -2456$

b) Taxa de desgaste (abrasão)

A Figura 39 e a Tabela 23 apresentam, respectivamente, os valores médios das massas, as variações percentuais médias das mesmas e a taxa de desgaste no ensaio de desgaste mecânico, efetuado com 3000 ciclos, para a espécie *Pinus caribaea* var. *hondurensis* sem impregnação e impregnada com metacrilato de metila.

Figura 39- Comparação entre a massa inicial (m_i) e a massa final (m_f) do PC - (si) e (i-M), média de três CPs para cada propriedade.

Tabela 23- Variação percentual média das massas e taxa de desgaste do PC (si) e (i-M), no ensaio de desgaste mecânico.

CP	m_i (g)	m_f (g)	Variação de massa - PC (%)	Taxa de desgaste - PC (% / 100 ciclos)
si	40,3	39,0	-3,2	0,11
i-M	85,3	83,5	-2,1	0,07

A análise dos resultados mostrou que o compósito resiste mais à abrasão do que a madeira sem impregnação, conforme comparação das variações médias das massas e da taxa de desgaste entre o PC (si) e o PC (i-M), no ensaio de desgaste mecânico.

6.3.1.2- Influência do intemperismo artificial em propriedades mecânicas

Nas Tabelas 24 e 25 e, também, nas Figuras 40 e 41 estão apresentados os valores médios das propriedades mecânicas estudadas (f_{c0} , E_{c0} e f_{H90}) para o *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, sem impregnação e impregnado com metacrilato de metila

(à pressão 0,66 MPa), antes e depois do processo de envelhecimento acelerado (Env). As amostras permaneceram na Máquina de Envelhecimento Acelerado por 2400h, equivalendo ao envelhecimento proporcionado por dois anos de exposição ao intemperismo natural.

Tabela 24- Valores médios das propriedades mecânicas do PC - (si) e (si - Env).

Propriedade	PC (si)	PC (si - Env)
f_{c0} (MPa)	47,5	39,9
E_{c0} (MPa)	11253	9869
f_{H90} (MPa)	29,6	27,6

Figura 40- Comparação entre as propriedades mecânicas do PC - (si) e (si / Env), média de seis CPs para cada propriedade.

Tabela 25- Valores médios das propriedades mecânicas do PC - (i-M) e (i-M - Env).

Propriedade	PC (i-M)	PC (i-M - Env)
f_{c0} (MPa)	87,6	80,4
E_{c0} (MPa)	15360	14409
f_{H90} (MPa)	132,4	128,8

Figura 41- Comparação entre as propriedades mecânicas do PC - (i-M) e (i-M / Env), média de seis CPs para cada propriedade.

Tabela 26 apresenta as variações percentuais médias das propriedades mecânicas para a espécie *Pinus caribaea* var. *hondurensis* sem impregnação e impregnada com metacrilato de metila (à pressão 0,66 MPa) envelhecida artificialmente, em relação à madeira sem envelhecimento.

Tabela 26- Variação percentual média das propriedades mecânicas do PC (si / Env) e (i-M / Env) em relação ao PC (si) e (i-M) sem envelhecimento.

Propriedade	PC (si) e (si / Env) (%)	PC (i-M) e (i-M / Env) (%)
f_{c0} (MPa)	-16,0	-8,2
E_{c0} (MPa)	-12,3	-6,2
f_{H90} (MPa)	-6,8	-2,7

A análise dos resultados mostrou que o compósito *Pinus*-Metacrilato é menos suscetível ao envelhecimento do que a madeira sem impregnação.

6.3.1.3- Influência da pressão de impregnação em propriedades mecânicas

Com o intuito de se avaliar a influência da pressão de impregnação nas propriedades mecânicas, quatro propriedades (f_{c0} , E_{c0} , f_{H0} e f_{H90}) foram determinadas para o PC (si) e para o PC (i-M) às pressões 0,22 e 0,44 MPa.

As Tabelas 27 a 29 apresentam os valores médios das massas e das propriedades mecânicas estudadas para o *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, sem impregnação e impregnado com metacrilato de metila (média de seis CPs para cada propriedade), para cada pressão de impregnação utilizada.

Tabela 27- Valores médios da massa do PC - (si) e (i-M), à P = 0,22 MPa.

CP (g)	PC (si)	PC (i-M) P = 0,22 Mpa
$f_{c0} - E_{c0}$	115,4	145,9
$f_{H0} - f_{H90}$	116,1	145,4

Tabela 28- Valores médios da massa do PC - (si) e (i-M), à P = 0,44 MPa.

CP (g)	PC (si)	PC (i-M) P = 0,44 Mpa
$f_{c0} - E_{c0}$	114,9	174,8
$f_{H0} - f_{H90}$	116,2	174,6

Tabela 29- Valores médios das propriedades mecânicas do PC - (si) e (i-M), à P = 0,22 e 0,44 MPa.

Propriedade	Pressão (MPa)		
	0	0,22	0,44
f_{c0} (MPa)	44,9	60,4	73,8
E_{c0} (MPa)	10008	12693	14844
f_{H0} (MPa)	60,8	106,6	149,3
f_{H90} (MPa)	37,0	75,9	112,4

As Tabelas 30 e 31 apresentam as variações médias das massas e das propriedades mecânicas, respectivamente, obtidas para a espécie *Pinus caribaea* var. *hondurensis* impregnada com o monômero de metacrilato de metila, em relação à madeira sem impregnação.

Tabela 30- Variação percentual média das massas do PC (i-M), à $P = 0,22$ e $0,44$ MPa, em relação ao PC (si).

CP (g)	PC (si) e (i-M / $0,22$ MPa) (%)	PC (si) e (i-M / $0,44$ MPa) (%)
$f_{c0} - E_{c0}$	26,4	52,1
$f_{H0} - f_{H90}$	25,2	50,3

Tabela 31- Variação percentual média das propriedades mecânicas do PC (i-M), à $P = 0,22$ e $0,44$ MPa, em relação ao PC (si).

Propriedade	PC (si) e (i-M / $0,22$ MPa) (%)	PC (si) e (i-M / $0,44$ MPa) (%)
f_{c0} (MPa)	34,5	64,4
E_{c0} (MPa)	26,8	48,3
f_{H0} (MPa)	75,3	145,6
f_{H90} (MPa)	105,1	203,8

As Figuras 42 a 45 apresentam gráficos das propriedades mecânicas em função da pressão de impregnação, para o *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. As propriedades à $P = 0,66$ MPa, obtidas na Etapa A, foram incluídas nos gráficos. Para efeito de comparação, os valores das propriedades da madeira impregnada foram calculados em relação àqueles obtidos para a madeira sem impregnação.

Figura 42- Resistência à compressão paralela às fibras versus pressão em CPs de PC.

Figura 43- Módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras versus pressão em CPs de PC.

Figura 44- Dureza paralela às fibras versus pressão em CPs de PC.

Figura 45- Dureza normal às fibras versus pressão em CPs de PC.

A análise de regressão mostrou que, no intervalo entre 0 e 0,66 MPa, um aumento na pressão de 0,1 MPa corresponde a um aumento de 14% na resistência à compressão paralela às fibras, de 11% no módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras, de 32% na dureza paralela às fibras e de 44% na dureza normal às fibras.

6.4- Propriedades dos compósitos de PC e de algumas espécies de uso consagrado

Para efeito exclusivo de comparação, apresentam-se, na Tabela 32, os valores médios das propriedades estudadas dos compósitos de PC (i-E e i-M) e das espécies Angelim vermelho (*Dinizia excelsa*), Ipê (*Tabebuia serritefolia*), Itaúba (*Mezilaurus itauba*) e Jatobá (*Hymenaea sp.*). Tais espécies foram objeto de estudo de Dias; Rocco Lahr (2004).

Esta comparação valoriza, sobremaneira, os resultados alcançados no decorrer do presente trabalho.

Tabela 32- Valores médios das propriedades do PC - (i-E) e (i-M) comparados com os do Angelim vermelho, Ipê, Itaúba e Jatobá, extraídos do trabalho de Dias; Rocco Lahr (2004).

Propriedade	PC (i-E)	PC (i-M)	Angelim-vermelho	Ipê	Itaúba	Jatobá
ρ (g/cm ³)	1,0	0,9	1,1	1,1	0,9	1,1
f_{c0} (MPa)	85	87	78	78	69	91
E_{c0} (MPa)	19083	17333	16695	17398	17443	22967
f_{t0} (MPa)	84	82	105	108	104	162
E_{t0} (MPa)	15016	14097	17024	16469	17630	21394
f_{i90} (MPa)	4,5	4,4	4,8	3,5	2,1	3,4
f_{v0} (MPa)	17	16	19	21	17	25,5
f_{H0} (MPa)	188	188	146	158	77	166
f_{H90} (MPa)	133	144	137	131	74	127

7- CONCLUSÕES

A comparação entre a estrutura microscópica do *Eucalyptus grandis* sem impregnação e impregnado, tanto com o monômero de estireno quanto com o de metacrilato de metila, mostrou que houve pouca penetração dos monômeros e posterior polimerização dos mesmos no interior das fibras da madeira.

Em consequência dessa pouca penetração, os resultados obtidos evidenciaram variação estatisticamente não significativa para todas as propriedades propostas no estudo, com exceção das durezas paralela e normal às fibras, entre a madeira sem impregnação e impregnada com os monômeros de estireno e de metacrilato de metila. A presença do poliestireno e do polimetacrilato de metila, apenas na superfície da amostra, provocou variações das propriedades acima citadas.

A análise da estrutura microscópica do *Pinus caribaea* var. *hondurensis* sem impregnação comparada com aquela do *Pinus* impregnado, tanto com o monômero de estireno quanto com o de metacrilato de metila, mostrou que houve penetração dos monômeros mencionados e posterior polimerização dos mesmos no interior dos elementos anatômicos da madeira.

Portanto, os resultados, no caso do *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, apontaram significativo aumento nos valores de todas as propriedades físicas e mecânicas da madeira impregnada com os monômeros de estireno e de metacrilato de metila em comparação aos valores da madeira natural. Destaca-se o aumento das durezas paralela e normal às fibras para os dois tipos de impregnação, cujo aumento percentual médio foi da ordem de 300% e 400%, respectivamente, aspecto muito interessante para a aplicação em pisos, por exemplo. Salienta-se que a incorporação de poliestireno e polimetacrilato de metila também foi muito satisfatória para o *Pinus*, atingindo um percentual médio de 82% e 69%, respectivamente, em massa na madeira.

A partir dos resultados já discutidos, ficou claro que, conforme se aumenta a pressão de impregnação, ocorre um aumento linear nos valores das propriedades mecânicas estudadas para o *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. Além disso, o compósito *Pinus*-Metacrilato de metila se mostrou mais resistente à abrasão e ao intemperismo, em relação à madeira sem impregnação.

Concluiu-se, a partir desses resultados e das condições experimentais às quais foram submetidas as madeiras, que o *Eucalyptus grandis* não se comporta adequadamente para esse tipo de impregnação, devido à sua baixa permeabilidade. O *Pinus caribaea* var. *hondurensis* apresentou facilidade de absorção dos monômeros de estireno e de metacrilato de metila, evidenciando a eficiência do processo de impregnação da madeira para permitir sua utilização em aplicações que necessitem de materiais com melhores propriedades mecânicas absolutas.

A grande vantagem dos compósitos de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* é que permitem a substituição de madeiras nativas, para diferentes finalidades, as quais, devido à sua grande utilização, se encontram cada vez menos disponíveis.

Recomendações para futuras pesquisas

Sugere-se, para o desenvolvimento de trabalhos futuros, a verificação da influência das variáveis quantidade e proporção de monômero e iniciador, tempo de impregnação, tempo e temperatura de polimerização em estufa, utilizadas na obtenção dos CPMs, sobre suas propriedades físicas e mecânicas.

ANEXO I

Informações sobre segurança e manuseio dos produtos

Depois de polimerizados, os produtos não oferecem riscos à saúde. Entretanto, antes da polimerização é necessário que o operador siga alguns cuidados especiais de proteção pessoal durante o manuseio dos produtos, os quais foram transmitidos pelas empresas que os doaram, conforme detalhado a seguir:

a) Preparação do local

Evitar fontes de ignição nos locais de manuseio. Não comer, beber ou fumar durante o manuseio dos produtos.

b) Proteção ocular

Usar óculos de proteção de segurança química e proteção facial para evitar contato com os olhos. Dispor de instalações para lavar os olhos caso ocorra contato com os mesmos.

c) Proteção cutânea

Usar luvas impermeáveis e roupas protetoras para evitar o contato com a pele. Os materiais protetores sugeridos são os seguintes: neopreno, borracha butílica e polietileno. Colocar chuveiros de segurança em todo lugar onde possa ocorrer contato com a pele.

d) Proteção respiratória

Usar proteção respiratória, devidamente aprovada, se os limites de exposição excederem os valores estabelecidos nas normas de higiene. A ventilação e outras formas de controles de engenharia são muitas vezes os meios preferidos para controlar exposições químicas. Proteção respiratória pode ser necessária para situações não rotineiras ou de emergência. Usar máscaras com filtro para gases orgânicos ou máscara de ar respirável.

ANEXO II

Preço dos produtos

Na Tabela 33 estão apresentados os preços dos produtos, informados pelas empresas que os doaram. Registra-se que os citados preços são praticados para vendas superiores a 1000 L.

Tabela 33- Preço dos produtos em Janeiro de 2005.

Nome do produto	Preço (US\$/L)
Monômero de estireno	1,72
Monômero de metacrilato de metila	1,88
Peróxido de benzoíla	3,69

ANEXO III

Apresentam-se, nas Tabelas 34 a 117, resumos dos resultados obtidos nos ensaios realizados para a determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira sem impregnação (si), impregnada com monômero de estireno (i-E) e impregnada com monômero de metacrilato de metila (i-M), para cada espécie de madeira estudada - *Eucalyptus grandis* (EG) e *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (PC).

III.1- Etapa A - *Eucalyptus grandis*

III.1.1- Sem impregnação, impregnado com estireno e com metacrilato de metila, à pressão de impregnação 0,66 MPa

III.1.1.1- Propriedades físicas e mecânicas

a) Densidade (ρ)

Tabela 34- Massa dos CPs de EG - (si) e (i-E), no ensaio de densidade.

CP (ρ)	m /si (g)	m _i / (i-E) (g)	m _f / (i-E) (g)
A2g	28,6	29,1	28,2
B2g	27,8	28,6	27,4
C2g	26,8	27,3	26,1
D2g	28,2	29,3	27,8
E2g	26,5	27,4	26,0
F2g	29,8	30,5	29,2
G2g	29,7	30,3	28,9
H2g	28,3	29,0	27,6
I2g	28,0	29,1	27,5
J2g	25,9	26,5	25,6
K2g	28,5	29,5	28,2
L2g	28,3	29,2	28,0
M	28,0	28,8	27,5
DP	1,2	1,2	1,1

Tabela 35- Massa dos CPs de EG - (si) e (i-M), no ensaio de densidade.

CP (ρ)	m /si (g)	m _i / (i-M) (g)	m _f / (i-M) (g)
A3g	27,7	28,9	27,8
B3g	28,1	29,4	28,1
C3g	26,5	27,5	26,4
D3g	26,9	28,5	27,1
E3g	25,5	26,4	25,5
F3g	29,5	31,6	29,8
G3g	28,7	29,8	28,7
H3g	26,5	27,8	26,5
I3g	27,2	28,9	27,4
J3g	25,5	26,3	25,4
K3g	27,2	28,7	27,4
L3g	27,1	28,5	27,2
M	27,2	28,5	27,3
DP	1,2	1,5	1,3

Tabela 36- Densidade dos CPs de EG - (si), (i-E) e (i-M).

CP	ρ /si (g/cm ³)	ρ / i-E (g/cm ³)	ρ / i-M (g/cm ³)
Ag	1,000	1,010	0,990
Bg	1,000	0,980	0,960
Cg	0,960	0,970	0,950
Dg	1,020	1,000	0,930
Eg	0,940	0,940	0,920
Fg	1,040	1,020	1,030
Gg	1,060	1,030	1,070
Hg	0,950	1,000	0,950
Ig	0,990	0,970	0,970
Jg	0,960	0,970	0,980
Kg	0,990	1,010	0,980
Lg	0,970	1,000	0,950
M	0,990	0,992	0,973
DP	0,037	0,026	0,042

**b) Retratabilidade radial total ($\epsilon_{r,2}$), retratabilidade tangencial total ($\epsilon_{r,3}$),
inchamento radial total ($\epsilon_{i,2}$), inchamento tangencial total ($\epsilon_{i,3}$)**

Tabela 37- Massa dos CPs de EG - (si) e (i-E), no ensaio para a determinação da retratabilidade radial e tangencial total e do inchamento radial e tangencial total.

CP ($\epsilon_{r,2}$ - $\epsilon_{r,3}$ - $\epsilon_{i,2}$ - $\epsilon_{i,3}$)	m /si (g)	m _i / (i-E) (g)	m _f / (i-E) (g)
A2h	28,9	29,7	28,4
B2h	28,0	28,9	27,6
C2h	27,5	28,1	26,9
D2h	26,5	27,8	26,1
E2h	26,1	26,3	25,8
F2h	30,3	30,8	29,9
G2h	30,0	30,7	29,3
H2h	27,6	28,6	27,0
I2h	28,1	28,8	27,8
J2h	26,1	26,3	25,6
K2h	28,1	28,8	27,8
L2h	27,0	27,7	26,7
M	27,9	28,5	27,4
DP	1,4	1,4	1,3

Tabela 38- Massa dos CPs de EG - (si) e (i-M), no ensaio para a determinação da retratabilidade radial e tangencial total e do inchamento radial e tangencial total.

CP ($\epsilon_{r,2}$ - $\epsilon_{r,3}$ - $\epsilon_{i,2}$ - $\epsilon_{i,3}$)	m /si (g)	m _i / (i-M) (g)	m _f / (i-M) (g)
A3h	27,5	28,8	27,7
B3h	27,4	28,5	27,5
C3h	27,1	28,6	27,4
D3h	25,8	27,6	26,1
E3h	25,2	25,9	25,0
F3h	29,6	31,9	29,8
G3h	29,0	30,6	29,1
H3h	26,5	27,6	26,4
I3h	26,9	28,0	27,0
J3h	26,2	27,0	26,1
K3h	27,2	28,5	27,4
L3h	26,1	27,1	26,2
M	27,0	28,3	27,1
DP	1,3	1,6	1,3

Tabela 39- Retratibilidade radial total dos CPs de EG - (si), (i-E) e (i-M).

CP	$\epsilon_{r,2} / \text{si} (\%)$	$\epsilon_{r,2} / \text{i-E} (\%)$	$\epsilon_{r,2} / \text{i-M} (\%)$
Ah	5,4	7,5	7,4
Bh	5,6	5,8	6,2
Ch	7,0	6,8	5,4
Dh	5,0	5,2	5,6
Eh	11,5	10,6	10,4
Fh	6,0	5,3	5,5
Gh	7,1	5,4	5,8
Hh	7,8	6,6	6,8
Ih	5,5	5,5	5,1
Jh	8,4	7,6	7,4
Kh	5,2	4,9	4,6
Lh	10,6	9,7	9,8
M	7,1	6,8	6,7
DP	2,1	1,8	1,8

Tabela 40- Retratibilidade tangencial total dos CPs de EG - (si), (i-E) e (i-M).

CP	$\epsilon_{r,3} / \text{si} (\%)$	$\epsilon_{r,3} / \text{i-E} (\%)$	$\epsilon_{r,3} / \text{i-M} (\%)$
Ah	9,0	9,4	9,0
Bh	6,0	7,0	8,3
Ch	10,6	10,7	7,4
Dh	7,7	8,4	8,7
Eh	7,3	7,5	8,0
Fh	7,2	7,0	8,1
Gh	8,6	7,4	7,6
Hh	11,1	11,4	10,5
Ih	6,7	7,3	7,9
Jh	12,6	11,7	10,4
Kh	6,8	7,0	8,0
Lh	6,6	7,2	7,1
M	8,3	8,5	8,4
DP	2,1	1,8	1,1

Tabela 41- Inchamento radial total dos CPs de EG - (si), (i-E) e (i-M).

CP	$\epsilon_{i,2}$ / si (%)	$\epsilon_{i,2}$ / i-E (%)	$\epsilon_{i,2}$ / i-M (%)
Ah	5,7	8,1	8,0
Bh	6,0	6,1	6,6
Ch	7,6	7,3	5,7
Dh	5,2	5,5	5,9
Eh	12,9	11,9	11,6
Fh	6,4	5,6	5,8
Gh	7,6	5,7	6,2
Hh	8,4	7,1	7,3
Ih	5,8	5,9	5,4
Jh	9,2	8,3	8,0
Kh	5,5	5,1	4,9
Lh	11,9	10,8	10,9
M	7,7	7,3	7,2
DP	2,5	2,2	2,1

Tabela 42- Inchamento tangencial total dos CPs de EG - (si), (i-E) e (i-M).

CP	$\epsilon_{i,3}$ / si (%)	$\epsilon_{i,3}$ / i-E (%)	$\epsilon_{i,3}$ / i-M (%)
Ah	9,8	10,4	9,9
Bh	6,4	7,5	9,1
Ch	11,8	11,9	8,0
Dh	8,3	9,1	9,5
Eh	7,8	8,1	8,7
Fh	7,8	7,6	8,8
Gh	9,4	8,0	8,8
Hh	12,5	12,8	11,8
Ih	7,2	7,8	8,6
Jh	14,8	13,2	11,7
Kh	7,3	7,6	8,7
Lh	7,0	7,7	7,7
M	9,2	9,3	9,3
DP	2,6	2,2	1,3

c) Resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) e Módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras (E_{c0})

Tabela 43- Massa dos CPs de EG - (si) e (i-E), no ensaio de compressão paralela às fibras.

CP (f_{c0} - E_{c0})	m /si (g)	m_i / (i-E) (g)	m_f / (i-E) (g)
A2c	370,6	373,6	365,0
B2c	368,3	372,8	361,2
C2c	383,6	387,5	377,8
D2c	366,1	368,9	360,0
E2c	342,6	347,0	336,8
F2c	364,9	369,3	360,0
G2c	357,9	361,7	352,4
H2c	368,1	372,5	359,2
I2c	389,6	394,8	382,5
J2c	362,9	372,2	362,1
K2c	339,7	348,1	335,3
L2c	340,9	343,8	331,6
M	362,9	367,7	357,0
DP	15,8	15,5	15,8

Tabela 44- Massa dos CPs de EG - (si) e (i-M), no ensaio de compressão paralela às fibras.

CP (f_{c0} - E_{c0})	m /si (g)	m_i / (i-M) (g)	m_f / (i-M) (g)
A3c	356,4	366,6	351,8
B3c	356,2	364,7	352,0
C3c	367,6	377,4	363,5
D3c	348,3	356,0	344,2
E3c	330,3	337,2	325,8
F3c	345,8	355,6	342,8
G3c	334,7	348,0	329,8
H3c	345,4	355,6	339,0
I3c	363,5	373,0	356,9
J3c	347,0	360,3	343,5
K3c	320,4	335,0	319,6
L3c	340,3	351,9	340,8
M	346,3	356,8	342,5
DP	13,7	12,9	12,8

Tabela 45- Resistência à compressão paralela às fibras dos CPs de EG - (si), (i-E) e (i-M).

CP	$f_{c0} / \text{si (MPa)}$	$f_{c0} / \text{i-E (MPa)}$	$f_{c0} / \text{i-M (MPa)}$
Ac	54,2	64,3	54,6
Bc	54,4	56,4	57,3
Cc	49,4	51,4	60,5
Dc	55,7	56,8	89,5
Ec	58,4	63,6	64,9
Fc	61,5	64,3	70,0
Gc	56,0	57,6	62,2
Hc	51,1	93,8	46,2
Ic	55,7	56,1	63,3
Jc	55,6	64,8	60,7
Kc	60,4	62,1	56,7
Lc	58,8	68,8	60,0
M	55,9	63,3	62,2
DP	3,5	10,8	10,4

Tabela 46- Módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras dos CPs de EG - (si), (i-E) e (i-M).

CP	$E_{c0} / \text{si (MPa)}$	$E_{c0} / \text{i-E (MPa)}$	$E_{c0} / \text{i-M (MPa)}$
Ac	16585	17565	14105
Bc	16805	17184	18149
Cc	10966	17641	25640
Dc	20073	17773	25102
Ec	17751	22043	23612
Fc	21270	23485	17811
Gc	15891	14761	14369
Hc	14850	16804	18965
Ic	18081	20146	15869
Jc	16630	18349	14228
Kc	26461	19883	13673
Lc	33365	20979	21057
M	19061	18885	18548
DP	5865	2471	4399

d) Resistência à tração paralela às fibras (f_{t0}) e Módulo de elasticidade longitudinal na tração paralela às fibras (E_{t0})

Tabela 47- Massa dos CPs de EG - (si) e (i-E), no ensaio de tração paralela às fibras.

CP (f_{t0}-E_{t0})	m /si (g)	m_i / (i-E) (g)	m_f / (i-E) (g)
A2a	298,2	300,6	292,1
B2a	260,3	260,9	251,2
C2a	289,4	290,2	280,1
D2a	284,8	287,7	277,9
E2a	279,5	282,8	262,8
F2a	286,5	291,9	276,6
G2a	287,5	288,9	278,9
H2a	288,1	289,3	279,6
I2a	290,5	292,2	279,2
J2a	294,1	299,3	288,7
K2a	273,7	278,3	260,2
L2a	281,3	283,4	258,6
M	284,5	287,1	273,8
DP	10,0	10,4	12,6

Tabela 48- Massa dos CPs de EG - (si) e (i-M), no ensaio de tração paralela às fibras.

CP (f_{t0}-E_{t0})	m /si (g)	m_i / (i-M) (g)	m_f / (i-M) (g)
A3a	296,9	301,4	281,0
B3a	293,4	296,4	270,1
C3a	299,0	303,4	277,6
D3a	308,1	312,2	289,2
E3a	293,1	299,8	277,3
F3a	245,7	250,6	232,2
G3a	286,2	291,1	275,0
H3a	291,0	294,2	270,5
I3a	304,3	308,8	285,1
J3a	301,5	307,9	285,7
K3a	305,8	311,2	287,1
L3a	267,1	272,6	252,4
M	291,0	295,8	273,6
DP	18,0	17,9	16,4

Tabela 49- Resistência à tração paralela às fibras dos CPs de EG - (si), (i-E) e (i-M).

CP	f_{t0} /si (MPa)	f_{t0} / i-E (MPa)	f_{t0} / i-M (MPa)
Aa	57,8	77,9	39,0
Ba	83,0	63,6	33,0
Ca	86,1	44,8	68,8
Da	58,0	89,3	54,1
Ea	63,2	32,1	52,1
Fa	47,8	74,9	55,6
Ga	103,7	45,2	50,0
Ha	78,7	99,7	63,1
Ia	35,6	49,2	38,6
Ja	47,7	43,7	74,8
Ka	69,6	63,9	47,0
La	86,7	75,6	110,8
M	68,2	63,3	57,2
DP	20,0	20,7	20,9

Tabela 50- Módulo de elasticidade longitudinal na tração paralela às fibras dos CPs de EG - (si), (i-E) e (i-M).

CP	E_{t0} /si (MPa)	E_{t0} / i-E (MPa)	E_{t0} / i-M (MPa)
Aa	10706	12086	14768
Ba	13848	19520	11876
Ca	12682	12010	17958
Da	12206	17719	13841
Ea	13254	19387	12375
Fa	10762	12739	10531
Ga	19183	14628	21497
Ha	18675	23124	19938
Ia	13608	10273	13212
Ja	15174	17395	17898
Ka	12670	14603	12512
La	15502	16598	17884
M	14023	15840	15357
DP	2716	3791	3541

e) Resistência à tração normal às fibras (f_{t90})

Tabela 51- Massa dos CPs de EG - (si) e (i-E), no ensaio de tração normal às fibras.

CP (f_{t90})	m /si (g)	m_i / (i-E) (g)	m_f / (i-E) (g)
A2d	124,0	126,4	109,4
B2d	121,5	123,7	106,9
C2d	122,8	130,2	112,5
D2d	122,3	124,0	107,8
E2d	115,2	117,6	101,5
F2d	118,1	121,0	103,9
G2d	117,6	118,8	100,8
H2d	124,5	127,4	108,7
I2d	126,0	128,0	109,6
J2d	127,6	129,9	111,2
K2d	122,3	125,7	105,0
L2d	114,1	124,4	106,0
M	121,3	124,8	106,9
DP	4,2	4,0	3,7

Tabela 52- Massa dos CPs de EG - (si) e (i-M), no ensaio de tração normal às fibras.

CP (f_{t90})	m /si (g)	m_i / (i-M) (g)	m_f / (i-M) (g)
A3d	237,4	247,3	237,0
B3d	237,6	244,3	234,2
C3d	242,3	255,8	242,5
D3d	229,3	235,0	226,7
E3d	217,6	223,3	216,0
F3d	227,6	238,5	228,6
G3d	224,8	232,4	221,1
H3d	233,2	243,6	231,7
I3d	227,5	236,8	224,1
J3d	230,2	242,7	230,1
K3d	238,1	244,3	234,6
L3d	220,8	247,3	224,0
M	230,5	240,9	229,2
DP	7,5	8,4	7,4

Tabela 53- Resistência à tração normal às fibras dos CPs de EG - (si), (i-E) e (i-M).

CP	f_{t90} / si (MPa)	f_{t90} / i-E (MPa)	f_{t90} / i-M (MPa)
Ad	6,8	8,4	5,8
Bd	5,8	6,9	5,3
Cd	5,2	6,4	5,0
Dd	6,9	6,6	5,3
Ed	4,4	7,6	4,3
Fd	7,7	10,2	7,2
Gd	4,6	5,3	8,0
Hd	4,7	1,9	5,2
Id	4,9	6,7	6,3
Jd	6,5	5,4	4,7
Kd	6,8	5,6	7,6
Ld	4,7	6,1	6,1
M	5,8	6,4	5,9
DP	1,1	2,0	1,2

f) Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0})

Tabela 54- Massa dos CPs de EG - (si) e (i-E), no ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.

CP (f_{v0})	m /si (g)	m_i / (i-E) (g)	m_f / (i-E) (g)
A2e	133,4	136,0	129,3
B2e	136,4	138,9	133,2
C2e	133,6	138,4	131,2
D2e	136,3	138,8	132,4
E2e	119,5	122,0	117,7
F2e	128,1	132,5	125,7
G2e	123,2	125,0	119,3
H2e	136,7	138,6	130,6
I2e	132,7	134,2	127,7
J2e	137,1	139,7	131,3
K2e	144,8	148,7	142,6
L2e	118,7	120,7	116,6
M	131,7	134,5	128,1
DP	7,9	8,2	7,4

Tabela 55- Massa dos CPs de EG - (si) e (i-M), no ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.

CP (f_{v0})	m /si (g)	m_i / (i-M) (g)	m_f / (i-M) (g)
A3e	115,7	117,8	114,0
B3e	121,3	124,6	119,7
C3e	111,6	123,0	111,0
D3e	118,1	122,9	117,0
E3e	104,3	106,9	103,1
F3e	112,4	118,9	112,4
G3e	110,0	113,7	108,9
H3e	121,6	125,3	120,0
I3e	115,0	117,6	113,2
J3e	114,1	118,0	112,5
K3e	109,3	125,5	110,2
L3e	104,8	106,2	103,5
M	113,2	118,4	112,1
DP	5,6	6,6	5,4

Tabela 56- Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras dos CPs de EG - (si), (i-E) e (i-M).

CP	f_{v0} /si (MPa)	f_{v0} / i-E (MPa)	f_{v0} / i-M (MPa)
Ae	19,7	18,0	18,1
Be	23,2	19,8	21,6
Ce	12,4	17,9	15,3
De	18,4	21,9	21,2
Ee	12,9	14,6	16,0
Fe	17,4	14,1	19,3
Ge	16,9	18,5	18,0
He	17,4	20,9	17,5
Ie	20,7	18,4	22,6
Je	19,4	20,8	20,0
Ke	20,4	23,1	18,2
Le	16,2	18,9	17,7
M	17,9	18,9	18,8
DP	3,1	2,7	2,2

g) Dureza paralela às fibras (f_{H0}) e Dureza normal às fibras (f_{H90})

Tabela 57- Massa dos CPs de EG - (si) e (i-E), no ensaio para a determinação das durezas paralela e normal às fibras.

CP (f_{H0} - f_{H90})	m /si (g)	m_i / (i-E) (g)	m_f / (i-E) (g)
A2b	360,2	365,1	352,4
B2b	370,1	374,5	363,7
C2b	376,6	381,5	369,0
D2b	367,6	371,3	359,5
E2b	339,9	344,5	333,8
F2b	380,4	383,3	373,5
G2b	350,6	353,8	341,8
H2b	350,0	360,5	352,3
I2b	354,4	362,7	352,3
J2b	358,0	362,3	348,5
K2b	342,1	346,2	333,8
L2b	344,7	348,3	339,0
M	357,9	362,8	351,6
DP	13,4	13,1	13,1

Tabela 58- Massa dos CPs de EG - (si) e (i-M), no ensaio para a determinação das durezas paralela e normal às fibras.

CP (f_{H0} - f_{H90})	m /si (g)	m_i / (i-M) (g)	m_f / (i-M) (g)
A3b	351,3	360,4	350,4
B3b	359,0	367,1	357,7
C3b	358,8	370,1	358,1
D3b	337,3	348,8	338,6
E3b	326,0	334,7	326,0
F3b	355,0	363,3	354,6
G3b	338,0	346,4	335,6
H3b	344,0	359,6	345,4
I3b	337,1	357,0	345,1
J3b	336,3	343,8	330,4
K3b	310,1	317,2	308,1
L3b	328,1	335,4	326,3
M	340,1	350,3	339,7
DP	14,6	15,7	15,2

Tabela 59- Dureza paralela às fibras dos CPs de EG - (si), (i-E) e (i-M).

CP	f_{H0} / si (MPa)	$f_{H0} / i-E$ (MPa)	$f_{H0} / i-M$ (MPa)
Ab	115,8	179,8	182,6
Bb	121,6	184,1	172,3
Cb	117,6	177,0	168,2
Db	125,3	191,3	189,2
Eb	96,3	160,4	148,0
Fb	147,9	199,3	203,2
Gb	124,0	159,0	183,0
Hb	137,8	198,2	192,1
Ib	142,2	215,2	187,8
Jb	138,0	199,4	180,4
Kb	111,5	181,1	169,5
Lb	134,0	209,6	206,0
M	126,0	187,9	181,8
DP	14,7	17,7	16,0

Tabela 60- Dureza normal às fibras dos CPs de EG - (si), (i-E) e (i-M).

CP	f_{H90} / si (MPa)	$f_{H90} / i-E$ (MPa)	$f_{H90} / i-M$ (MPa)
Ab	90,5	128,4	115,9
Bb	100,8	144,1	125,4
Cb	93,3	140,1	113,4
Db	94,7	134,9	156,6
Eb	77,0	103,4	125,5
Fb	108,0	145,9	145,4
Gb	89,6	124,3	111,5
Hb	92,1	142,9	139,0
Ib	113,8	134,9	130,7
Jb	115,0	158,0	141,9
Kb	101,6	126,0	122,6
Lb	113,4	146,0	160,0
M	99,2	135,7	132,3
DP	11,7	14,0	16,3

h) Tenacidade (W) e Resistência ao impacto na flexão (f_{bw})

Tabela 61- Massa dos CPs de EG - (si) e (i-E), no ensaio de impacto na flexão.

CP (W- f_{bw})	m /si (g)	m _i / (i-E) (g)	m _f / (i-E) (g)
A2f	115,2	116,3	107,6
B2f	112,0	113,8	103,9
C2f	115,2	116,2	109,3
D2f	110,9	111,3	105,3
E2f	98,1	100,3	93,2
F2f	115,2	116,1	110,9
G2f	113,6	114,1	105,7
H2f	115,8	117,0	108,7
I2f	114,1	114,6	107,8
J2f	111,7	113,0	105,6
K2f	104,6	106,0	98,9
L2f	112,7	113,6	108,0
M	111,6	112,7	105,4
DP	5,2	4,9	4,9

Tabela 62- Massa dos CPs de EG - (si) e (i-M), no ensaio de impacto na flexão.

CP (W- f_{bw})	m /si (g)	m _i / (i-M) (g)	m _f / (i-M) (g)
A3f	117,7	113,1	107,2
B3f	109,3	110,6	104,4
C3f	108,7	110,5	103,5
D3f	107,1	108,6	103,4
E3f	102,2	103,5	99,7
F3f	116,1	118,1	112,0
G3f	113,1	114,7	109,6
H3f	103,4	105,2	99,9
I3f	111,2	112,6	107,2
J3f	106,9	109,5	103,7
K3f	100,8	103,0	98,4
L3f	114,2	116,0	110,5
M	109,2	110,5	105,0
DP	5,5	4,8	4,4

Tabela 63- Tenacidade dos CPs de EG - (si), (i-E) e (i-M).

CP	W / si (J)	W / i-E (J)	W / i-M (J)
Af	44,6	29,6	54,2
Bf	29,1	19,6	41,2
Cf	37,8	18,4	20,6
Df	33,6	38,4	32,4
Ef	19,7	25,6	22,7
Ff	49,0	20,6	29,1
Gf	33,0	28,8	5,0
Hf	24,1	13,9	19,0
If	21,5	22,0	22,4
Jf	35,9	40,1	30,6
Kf	19,4	24,7	26,2
Lf	37,3	22,2	22,9
M	32,1	25,3	27,2
DP	9,6	7,8	12,2

Tabela 64- Resistência ao impacto na flexão dos CPs de EG - (si), (i-E) e (i-M).

CP	f _{bw} / si (kJ/m ²)	f _{bw} / i-E (kJ/m ²)	f _{bw} / i-M (kJ/m ²)
Af	116816	85781	135111
Bf	76612	54451	116195
Cf	99705	50602	56545
Df	88697	106874	88523
Ef	51540	74179	63524
Ff	125682	59607	78894
Gf	86078	83196	2157
Hf	64529	38066	53240
If	55941	59614	61678
Jf	92260	108818	84332
Kf	48820	50861	74397
Lf	98983	63915	58144
M	83805	69664	72728
DP	25031	22488	33368

III.1.1.2- Comparação de pares

Na Tabela 65 estão apresentados os valores da média aritmética ($\bar{x}_m$) e do desvio padrão (s_m) das populações P_A, P_B e P_C, que consistem, respectivamente, das diferenças entre as propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis* em três situações: (si) e (i-E), (si) e (i-M) e, finalmente, (i-E) e (i-M). Esses valores foram usados para calcular o intervalo de confiança da média das diferenças.

Tabela 65- Valores de $\bar{x}_m$ e s_m das populações P_A, P_B e P_C para o EG.

Propriedade	P _A / EG		P _B / EG		P _C / EG	
	$\bar{x}_m$	s_m	$\bar{x}_m$	s_m	$\bar{x}_m$	s_m
ρ (g/cm ³)	-0,002	0,024	0,017	0,028	0,018	0,030
$\epsilon_{r,2}$ (%)	0,33	0,94	0,42	1,01	0,10	0,51
$\epsilon_{r,3}$ (%)	-0,13	0,69	-0,07	1,61	0,06	1,27
$\epsilon_{i,2}$ (%)	0,39	1,09	0,50	1,17	0,11	0,57
$\epsilon_{i,3}$ (%)	-0,13	0,84	-0,04	1,94	0,09	1,53
f_{c0} (MPa)	-7,4	11,7	-6,2	9,9	1,2	18,4
E_{c0} (MPa)	176	5071	512	7608	336	4696
f_{t0} (MPa)	4,8	28,8	10,9	25,0	6,1	27,9
E_{t0} (MPa)	-1817	3416	-1335	2144	483	4666
f_{t90} (MPa)	-0,68	1,72	-0,15	1,46	0,53	2,18
f_{v0} (MPa)	-0,99	2,95	-0,88	1,85	0,12	2,94
f_{H0} (MPa)	-61,8	10,6	-55,8	8,6	6,0	12,9
f_{H90} (MPa)	-36,6	9,1	-33,2	14,6	3,4	15,7
W (J)	6,8	11,3	4,9	12,6	-1,9	12,9
f_{bw} (kJ/m ²)	14142	28452	11077	35945	-3065	36902

III.2- Etapa A - *Pinus caribaea* var. *hondurensis*

III.2.1- Sem impregnação, impregnado com estireno e com metacrilato de metila, à pressão de impregnação 0,66 MPa

III.2.1.1- Propriedades físicas e mecânicas

a) Densidade (ρ)

Tabela 66- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-E), no ensaio de densidade.

CP (ρ)	m /si (g)	m _i / (i-E) (g)	m _f / (i-E) (g)
A2g	12,6	29,7	29,1
B2g	13,9	29,7	27,4
C2g	11,7	29,0	27,1
D2g	12,5	28,9	27,6
E2g	11,4	28,1	26,8
F2g	11,9	29,6	28,0
G2g	20,6	29,4	28,9
H2g	13,1	27,6	25,0
I2g	22,0	30,6	28,6
J2g	17,4	28,6	26,5
K2g	15,5	26,1	23,9
L2g	15,7	28,1	26,5
M	14,9	28,8	27,1
DP	3,5	1,2	1,5

Tabela 67- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-M), no ensaio de densidade.

CP (ρ)	m /si (g)	m _i / (i-M) (g)	m _f / (i-M) (g)
A3g	13,4	28,0	21,2
B3g	14,2	27,1	26,0
C3g	12,1	23,4	22,1
D3g	13,3	23,5	21,2
E3g	11,7	25,4	24,3
F3g	15,1	23,8	22,0
G3g	19,2	29,2	27,5
H3g	14,1	27,7	26,8
I3g	19,2	29,3	28,1
J3g	16,4	28,8	25,8
K3g	14,7	26,4	24,8
L3g	15,6	28,1	25,0
M	14,9	26,7	24,6
DP	2,4	2,2	2,4

Tabela 68- Densidade dos CPs de PC - (si), (i-E) e (i-M).

CP	ρ /si (g/cm ³)	ρ / i-E (g/cm ³)	ρ / i-M (g/cm ³)
Ag	0,460	1,020	0,960
Bg	0,490	0,960	0,950
Cg	0,430	0,980	0,900
Dg	0,460	1,020	0,890
Eg	0,400	0,980	0,740
Fg	0,450	1,010	0,980
Gg	0,740	0,800	1,030
Hg	0,470	0,890	0,865
Ig	0,740	1,010	1,020
Jg	0,640	0,980	0,830
Kg	0,550	0,830	0,890
Lg	0,540	0,910	0,730
M	0,531	0,949	0,899
DP	0,116	0,075	0,098

b) Retratabilidade radial total ($\epsilon_{r,2}$), retratabilidade tangencial total ($\epsilon_{r,3}$),
 inchamento radial total ($\epsilon_{i,2}$), inchamento tangencial total ($\epsilon_{i,3}$)

Tabela 69- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-E), no ensaio para a determinação da retratabilidade radial e tangencial total e do inchamento radial e tangencial total.

CP ($\epsilon_{r,2}$ - $\epsilon_{r,3}$ - $\epsilon_{i,2}$ - $\epsilon_{i,3}$)	m /si (g)	m _i / (i-E) (g)	m _f / (i-E) (g)
A2h	12,2	29,2	28,8
B2h	13,2	29,5	28,2
C2h	12,4	28,4	27,1
D2h	12,5	28,7	27,2
E2h	10,5	28,8	27,1
F2h	11,2	27,9	26,7
G2h	19,4	31,7	28,3
H2h	13,6	21,3	20,4
I2h	19,9	31,2	30,4
J2h	17,2	29,4	26,1
K2h	14,5	30,1	28,6
L2h	15,9	28,2	26,1
M	14,4	28,7	27,1
DP	3,1	2,6	2,5

Tabela 70- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-M), no ensaio para a determinação da retratibilidade radial e tangencial total e do inchamento radial e tangencial total.

CP ($\epsilon_{r,2}-\epsilon_{r,3}-\epsilon_{i,2}-\epsilon_{i,3}$)	m /si (g)	m _i / (i-M) (g)	m _f / (i-M) (g)
A3h	13,2	23,5	21,5
B3h	16,0	27,3	25,5
C3h	12,6	26,2	24,6
D3h	13,3	28,6	26,7
E3h	13,5	28,2	26,2
F3h	12,9	26,4	24,8
G3h	19,3	32,0	30,6
H3h	13,1	28,8	25,6
I3h	21,3	28,3	26,0
J3h	16,3	28,0	27,2
K3h	14,1	27,1	25,1
L3h	15,4	28,6	25,4
M	15,1	27,8	25,8
DP	2,8	2,0	2,1

Tabela 71- Retratibilidade radial total dos CPs de PC - (si), (i-E) e (i-M).

CP	$\epsilon_{r,2}$ /si (%)	$\epsilon_{r,2}$ / i-E (%)	$\epsilon_{r,2}$ / i-M (%)
Ah	3,5	3,2	2,6
Bh	5,0	3,9	3,9
Ch	6,0	5,6	4,2
Dh	5,3	4,8	4,5
Eh	3,7	2,8	2,7
Fh	3,9	3,1	2,2
Gh	4,7	3,6	3,5
Hh	3,7	3,0	3,4
Ih	3,6	2,9	3,6
Jh	4,8	4,2	4,0
Kh	3,8	2,6	3,0
Lh	3,4	3,3	3,4
M	4,3	3,6	3,4
DP	0,8	0,9	0,7

Tabela 72- Retratabilidade tangencial total dos CPs de PC - (si), (i-E) e (i-M).

CP	$\epsilon_{r,3} / \text{si} (\%)$	$\epsilon_{r,3} / \text{i-E} (\%)$	$\epsilon_{r,3} / \text{i-M} (\%)$
Ah	5,7	5,6	4,6
Bh	4,1	2,3	2,8
Ch	5,3	3,5	3,4
Dh	5,0	4,6	4,2
Eh	6,0	5,6	5,2
Fh	5,5	5,1	5,0
Gh	5,9	4,9	4,0
Hh	5,1	4,8	5,0
Ih	5,7	4,3	4,4
Jh	9,1	8,9	8,8
Kh	5,4	4,9	5,3
Lh	8,0	7,0	6,7
M	5,9	5,1	5,0
DP	1,4	1,7	1,6

Tabela 73- Inchamento radial total dos CPs de PC - (si), (i-E) e (i-M).

CP	$\epsilon_{i,2} / \text{si} (\%)$	$\epsilon_{i,2} / \text{i-E} (\%)$	$\epsilon_{i,2} / \text{i-M} (\%)$
Ah	3,7	2,9	2,7
Bh	5,2	4,5	4,2
Ch	6,4	5,9	5,7
Dh	5,6	5,1	4,8
Eh	3,9	2,9	2,8
Fh	3,8	3,2	2,2
Gh	4,9	3,7	3,6
Hh	4,0	3,1	3,6
Ih	3,7	3,1	3,2
Jh	5,0	4,1	4,2
Kh	3,7	2,6	3,1
Lh	3,5	3,1	2,5
M	4,4	3,7	3,5
DP	0,9	1,0	1,0

Tabela 74- Inchamento tangencial total dos CPs de PC - (si), (i-E) e (i-M).

CP	$\epsilon_{i,3}$ / si (%)	$\epsilon_{i,3}$ / i-E (%)	$\epsilon_{i,3}$ / i-M (%)
Ah	6,0	4,9	4,8
Bh	5,5	3,9	2,9
Ch	5,8	3,6	3,5
Dh	4,5	4,1	4,1
Eh	5,7	5,2	5,5
Fh	5,3	5,0	4,8
Gh	6,3	5,0	4,1
Hh	5,4	4,7	4,3
Ih	5,3	4,9	4,8
Jh	10,0	6,6	6,7
Kh	5,2	4,2	4,5
Lh	8,7	6,8	6,0
M	6,1	4,9	4,7
DP	1,6	1,0	1,0

c) Resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) e Módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras (E_{c0})

Tabela 75- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-E), no ensaio de compressão paralela às fibras.

CP (f_{c0} - E_{c0})	m /si (g)	m_i / (i-E) (g)	m_f / (i-E) (g)
A2c	153,3	346,7	338,8
B2c	208,2	374,0	350,0
C2c	141,9	364,9	314,3
D2c	157,9	361,0	315,3
E2c	155,8	373,2	327,5
F2c	168,5	375,6	337,4
G2c	238,7	340,4	320,0
H2c	154,4	324,2	300,4
I2c	255,0	335,2	317,5
J2c	205,5	367,1	339,0
K2c	191,7	397,4	354,0
L2c	202,5	293,4	274,7
M	186,1	354,4	324,1
DP	36,6	28,0	22,2

Tabela 76- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-M), no ensaio de compressão paralela às fibras.

CP (f_{c0} - E_{c0})	m /si (g)	m_i / (i-M) (g)	m_f / (i-M) (g)
A3c	157,8	391,3	317,3
B3c	218,2	414,1	354,6
C3c	158,9	398,6	309,8
D3c	171,6	408,5	320,0
E3c	158,8	400,2	314,5
F3c	185,4	407,1	324,4
G3c	213,8	383,0	331,2
H3c	143,8	334,0	279,0
I3c	250,5	406,2	379,9
J3c	196,9	367,1	315,5
K3c	182,3	401,6	328,3
L3c	186,5	391,7	333,8
M	185,4	392,0	325,7
DP	30,7	22,3	24,6

Tabela 77- Resistência à compressão paralela às fibras dos CPs de PC - (si), (i-E) e (i-M).

CP	f_{c0} /si (MPa)	f_{c0} / i-E (MPa)	f_{c0} / i-M (MPa)
Ac	39,5	70,4	91,6
Bc	47,5	97,3	97,8
Cc	32,6	67,3	58,4
Dc	34,1	80,0	87,8
Ec	28,1	83,1	87,1
Fc	36,6	77,7	63,7
Gc	50,2	94,6	85,3
Hc	35,4	68,4	58,4
Ic	60,7	105,3	119,8
Jc	56,5	103,8	102,6
Kc	39,2	100,6	90,1
Lc	43,0	74,2	98,9
M	42,0	85,2	86,8
DP	10,0	14,3	18,6

Tabela 78- Módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras dos CPs de PC - (si), (i-E) e (i-M).

CP	$E_{c0} / \text{si (MPa)}$	$E_{c0} / \text{i-E (MPa)}$	$E_{c0} / \text{i-M (MPa)}$
Ac	10315	12568	13572
Bc	14902	19652	16603
Cc	11839	13380	14157
Dc	8095	19693	14174
Ec	6190	21397	10322
Fc	12488	36138	21728
Gc	7777	11672	10288
Hc	8605	21540	19469
Ic	16541	19932	23430
Jc	15135	19948	34915
Kc	6916	17115	9929
Lc	12542	15962	19404
M	10945	19083	17333
DP	3479	6381	7153

d) Resistência à tração paralela às fibras (f_{t0}) e Módulo de elasticidade longitudinal na tração paralela às fibras (E_{t0})

Tabela 79- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-E), no ensaio de tração paralela às fibras.

CP (f_{t0} - E_{t0})	m /si (g)	$m_i / \text{(i-E) (g)}$	$m_f / \text{(i-E) (g)}$
A2a	126,8	302,1	291,0
B2a	169,9	329,7	319,9
C2a	138,3	323,8	313,5
D2a	146,3	318,4	298,9
E2a	133,4	320,5	307,2
F2a	132,1	304,6	291,3
G2a	213,1	351,8	340,1
H2a	135,4	328,4	315,2
I2a	226,1	349,8	333,8
J2a	229,7	361,3	342,5
K2a	165,5	337,7	312,1
L2a	184,6	332,8	311,2
M	166,8	330,1	314,7
DP	38,2	18,1	17,2

Tabela 80- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-M), no ensaio de tração paralela às fibras.

CP (f_{t0} - E_{t0})	m /si (g)	m_i / (i-M) (g)	m_f / (i-M) (g)
A3a	134,5	319,6	255,3
B3a	178,6	343,7	291,0
C3a	126,9	299,7	234,0
D3a	137,3	325,3	254,1
E3a	139,0	321,0	267,2
F3a	144,8	334,8	282,8
G3a	194,8	315,0	261,5
H3a	140,1	298,9	250,5
I3a	221,7	320,7	293,0
J3a	204,0	320,1	287,0
K3a	162,6	319,0	271,8
L3a	161,3	312,9	254,1
M	162,1	319,2	266,9
DP	31,0	12,6	18,6

Tabela 81- Resistência à tração paralela às fibras dos CPs de PC - (si), (i-E) e (i-M).

CP	f_{t0} /si (MPa)	f_{t0} / i-E (MPa)	f_{t0} / i-M (MPa)
Aa	52,5	68,6	71,2
Ba	52,1	79,6	81,6
Ca	35,4	101,6	81,2
Da	32,4	70,0	72,5
Ea	45,6	59,2	75,0
Fa	40,9	73,8	59,7
Ga	51,3	73,9	88,4
Ha	40,8	62,7	61,4
Ia	61,5	109,7	110,9
Ja	72,0	146,4	119,9
Ka	34,7	67,8	56,8
La	66,8	91,0	100,8
M	48,8	83,7	81,6
DP	12,9	25,0	20,2

Tabela 82- Módulo de elasticidade longitudinal na tração paralela às fibras dos CPs de PC - (si), (i-E) e (i-M).

CP	E_{t0} /si (MPa)	E_{t0} / i-E (MPa)	E_{t0} / i-M (MPa)
Aa	12275	15284	18727
Ba	10206	15281	13036
Ca	7736	15767	11892
Da	10372	12681	13243
Ea	8605	10119	10869
Fa	11081	13547	15634
Ga	10266	13015	12203
Ha	7424	11268	9709
Ia	15005	22559	23477
Ja	11189	22182	17658
Ka	7833	12198	9490
La	10609	16294	13228
M	10217	15016	14097
DP	2159	3910	4117

e) Resistência à tração normal às fibras (f_{t90})

Tabela 83- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-E), no ensaio de tração normal às fibras.

CP (f_{t90})	m /si (g)	m_i / (i-E) (g)	m_f / (i-E) (g)
A2d	115,3	257,5	258,1
B2d	63,7	118,6	113,6
C2d	53,1	120,8	113,3
D2d	48,2	121,1	111,1
E2d	50,1	118,7	115,2
F2d	55,5	122,1	117,5
G2d	72,5	119,1	113,1
H2d	57,8	99,0	101,6
I2d	74,1	99,2	110,7
J2d	64,5	109,4	99,4
K2d	63,7	124,7	114,3
L2d	61,2	118,4	109,2
M	65,0	127,4	123,0
DP	17,8	42,0	42,7

Tabela 84- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-M), no ensaio de tração normal às fibras.

CP (f_{t90})	m /si (g)	m_i / (i-M) (g)	m_f / (i-M) (g)
A3d	125,2	284,8	227,4
B3d	164,3	300,9	264,7
C3d	116,0	288,3	214,3
D3d	124,3	294,2	232,6
E3d	122,1	292,3	229,8
F3d	130,7	293,8	230,8
G3d	145,1	259,7	211,5
H3d	113,0	264,5	221,7
I3d	157,4	265,8	235,2
J3d	134,7	253,3	231,7
K3d	126,9	262,0	225,2
L3d	123,7	257,6	222,2
M	132,0	276,4	228,9
DP	15,9	17,4	13,4

Tabela 85- Resistência à tração normal às fibras dos CPs de PC - (si), (i-E) e (i-M).

CP	f_{t90} / si (MPa)	f_{t90} / i-E (MPa)	f_{t90} / i-M (MPa)
Ad	2,9	3,6	4,9
Bd	2,6	4,9	3,4
Cd	2,7	4,7	3,4
Dd	3,1	4,3	4,3
Ed	2,8	4,3	3,5
Fd	2,7	3,7	4,5
Gd	3,1	6,4	6,3
Hd	2,1	3,2	3,0
Id	2,1	4,6	4,6
Jd	2,9	6,2	6,1
Kd	2,1	4,0	5,1
Ld	2,7	3,8	3,9
M	2,7	4,5	4,4
DP	0,4	1,0	1,1

f) Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0})

Tabela 86- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-E), no ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.

CP (f_{v0})	m /si (g)	m_i / (i-E) (g)	m_f / (i-E) (g)
A2e	70,9	102,4	99,0
B2e	78,0	142,4	137,0
C2e	59,3	146,0	132,1
D2e	57,6	148,2	128,1
E2e	62,3	152,3	132,3
F2e	69,8	153,4	141,7
G2e	94,5	144,3	136,3
H2e	66,3	112,6	108,6
I2e	76,3	135,9	130,4
J2e	75,3	126,3	121,2
K2e	71,2	102,0	97,6
L2e	72,5	139,4	133,7
M	71,2	133,8	124,8
DP	9,8	18,6	15,0

Tabela 87- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-M), no ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.

CP (f_{v0})	m /si (g)	m_i / (i-M) (g)	m_f / (i-M) (g)
A3e	68,7	136,5	110,6
B3e	48,5	152,5	132,4
C3e	60,1	109,3	92,3
D3e	59,6	146,3	112,9
E3e	62,4	149,7	114,8
F3e	65,4	151,5	119,6
G3e	102,5	153,4	130,2
H3e	69,8	148,0	111,0
I3e	85,6	129,0	111,6
J3e	81,7	128,0	110,5
K3e	75,5	132,9	115,7
L3e	79,3	129,5	113,4
M	71,6	138,9	114,6
DP	14,4	13,6	10,2

Tabela 88- Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras dos CPs de PC - (si), (i-E) e (i-M).

CP	$f_{v0} / \text{si (MPa)}$	$f_{v0} / \text{i-E (MPa)}$	$f_{v0} / \text{i-M (MPa)}$
Ae	8,1	13,6	15,0
Be	9,1	13,9	14,7
Ce	9,1	12,4	13,2
De	7,5	11,3	15,5
Ee	9,5	10,5	13,1
Fe	9,6	20,0	19,5
Ge	12,8	30,6	25,4
He	11,8	14,6	16,2
Ie	11,6	18,9	13,6
Je	11,0	16,1	15,1
Ke	9,7	15,5	12,5
Le	11,1	22,5	21,7
M	10,1	16,7	16,3
DP	1,6	5,7	3,9

g) Dureza paralela às fibras (f_{H0}) e Dureza normal às fibras (f_{H90})

Tabela 89- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-E), no ensaio para a determinação das durezas paralela e normal às fibras.

CP (f_{H0} - f_{H90})	$m / \text{si (g)}$	$m_i / \text{(i-E) (g)}$	$m_f / \text{(i-E) (g)}$
A2b	160,0	352,1	325,0
B2b	211,7	393,1	372,8
C2b	154,8	366,4	312,0
D2b	169,8	380,8	332,7
E2b	156,7	383,1	325,0
F2b	163,0	385,7	323,6
G2b	249,1	400,0	373,5
H2b	173,2	265,0	252,0
I2b	250,5	358,6	342,1
J2b	200,5	320,6	304,3
K2b	188,4	362,5	331,1
L2b	194,8	305,9	290,5
M	189,4	356,2	323,7
DP	33,6	40,2	33,2

Tabela 90- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-M), no ensaio para a determinação das durezas paralela e normal às fibras.

CP ($f_{H0}-f_{H90}$)	m /si (g)	m_i / (i-M) (g)	m_f / (i-M) (g)
A3b	170,6	400,1	314,5
B3b	223,9	415,1	351,4
C3b	155,4	394,2	308,0
D3b	167,4	410,4	319,3
E3b	166,3	405,6	321,2
F3b	172,8	409,5	320,0
G3b	239,7	421,6	379,5
H3b	155,9	402,3	297,7
I3b	242,1	413,3	363,4
J3b	212,5	389,2	323,1
K3b	181,8	403,0	318,8
L3b	189,0	397,8	319,2
M	189,8	405,2	328,0
DP	31,6	9,3	24,0

Tabela 91- Dureza paralela às fibras dos CPs de PC - (si), (i-E) e (i-M).

CP	f_{H0} /si (MPa)	f_{H0} / i-E (MPa)	f_{H0} / i-M (MPa)
Ab	42,2	174,0	155,3
Bb	57,3	212,9	208,3
Cb	41,6	156,3	159,7
Db	44,0	173,5	195,0
Eb	32,0	155,1	177,4
Fb	38,0	153,4	175,9
Gb	60,7	239,7	227,4
Hb	45,5	190,5	154,8
Ib	64,2	256,4	231,3
Jb	42,2	157,3	186,2
Kb	51,6	229,8	186,7
Lb	45,5	160,1	192,6
M	47,1	188,2	187,5
DP	9,6	37,1	25,5

Tabela 92- Dureza normal às fibras dos CPs de PC - (si), (i-E) e (i-M).

CP	f_{H90} /si (MPa)	f_{H90} / i-E (MPa)	f_{H90} / i-M (MPa)
Ab	21,2	99,2	113,9
Bb	33,0	187,4	167,8
Cb	16,6	87,5	110,0
Db	18,6	120,1	122,3
Eb	18,3	107,2	105,8
Fb	18,4	101,1	118,6
Gb	36,7	190,3	241,1
Hb	22,9	123,2	113,8
Ib	36,0	180,0	216,3
Jb	27,7	131,3	132,1
Kb	26,7	150,3	131,8
Lb	27,7	120,3	148,2
M	25,3	133,2	143,5
DP	7,1	35,8	43,8

h) Tenacidade (W) e Resistência ao impacto na flexão (f_{bw})

Tabela 93- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-E), no ensaio de impacto na flexão.

CP (W- f_{bw})	m /si (g)	m_i / (i-E) (g)	m_f / (i-E) (g)
A2f	77,8	117,7	115,3
B2f	66,5	125,5	123,0
C2f	50,7	120,2	116,1
D2f	52,0	119,0	117,2
E2f	45,4	111,1	108,8
F2f	44,9	113,8	111,8
G2f	78,4	129,7	123,3
H2f	49,0	107,0	105,2
I2f	68,9	124,4	118,4
J2f	79,2	112,8	107,4
K2f	60,0	111,3	114,1
L2f	66,1	122,5	124,6
M	61,6	117,9	115,4
DP	13,0	6,9	6,4

Tabela 94- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-M), no ensaio de impacto na flexão.

CP (W-f _{bw})	m /si (g)	m _i / (i-M) (g)	m _f / (i-M) (g)
A3f	56,1	115,2	96,3
B3f	64,1	103,4	89,9
C3f	55,7	128,8	110,1
D3f	50,9	114,3	85,9
E3f	51,3	116,7	92,4
F3f	46,9	116,0	94,7
G3f	71,3	95,4	89,8
H3f	47,1	110,0	97,3
I3f	61,7	105,6	97,6
J3f	59,6	99,5	91,0
K3f	58,4	123,5	103,3
L3f	65,1	125,9	112,6
M	57,4	112,9	96,7
DP	7,5	10,5	8,2

Tabela 95- Tenacidade dos CPs de PC - (si), (i-E) e (i-M).

CP	W / si (J)	W / i-E (J)	W / i-M (J)
Af	8,1	13,2	23,3
Bf	11,4	19,2	35,1
Cf	9,9	17,0	21,2
Df	3,8	12,5	17,8
Ef	8,7	12,6	24,5
Ff	4,4	13,4	16,5
Gf	12,6	21,8	30,5
Hf	10,0	16,6	15,3
If	31,8	52,6	32,8
Jf	16,8	34,7	21,2
Kf	18,1	29,6	28,9
Lf	16,6	33,7	37,6
M	12,7	23,1	25,4
DP	7,6	12,3	7,5

Tabela 96- Resistência ao impacto na flexão dos CPs de PC - (si), (i-E) e (i-M).

CP	f_{bw} / si (kJ/m ²)	$f_{bw} / i-E$ (kJ/m ²)	$f_{bw} / i-M$ (kJ/m ²)
Af	20747	35360	59560
Bf	28158	49200	97449
Cf	25680	44451	50286
Df	9814	33343	48661
Ef	23554	34123	62609
Ff	11493	36492	41812
Gf	32364	58397	75466
Hf	24707	41492	33863
If	84720	141231	86427
Jf	44158	89857	55194
Kf	46311	77742	76737
Lf	42558	88602	97012
M	32855	60857	65423
DP	20121	32832	21115

III.2.1.2- Comparação de pares

Na Tabela 97 estão apresentados os valores da média aritmética ($\bar{x}_m$) e do desvio padrão (s_m) das populações P_A, P_B e P_C, que consistem, respectivamente, das diferenças entre as propriedades da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* em três situações: (si) e (i-E), (si) e (i-M) e, finalmente, (i-E) e (i-M). Esses valores foram usados para calcular o intervalo de confiança da média das diferenças.

Tabela 97- Valores de $\bar{x}_m$ e s_m das populações P_A, P_B e P_C para o PC.

Propriedade	P _A / PC		P _B / PC		P _C / PC	
	$\bar{x}_m$	s_m	$\bar{x}_m$	s_m	$\bar{x}_m$	s_m
ρ (g/cm ³)	-0,42	0,16	-0,37	0,12	0,05	0,12
$\epsilon_{r,2}$ (%)	0,68	0,36	0,85	0,59	0,17	0,58
$\epsilon_{r,3}$ (%)	0,79	0,62	0,95	0,64	0,16	0,47
$\epsilon_{i,2}$ (%)	0,77	0,25	0,91	0,32	0,14	0,4
$\epsilon_{i,3}$ (%)	1,25	0,93	1,47	1,08	0,23	0,44
f_{c0} (MPa)	-43,3	9,6	-44,8	13,4	-1,6	13,1
E_{c0} (MPa)	-8138	6697	-6387	5116	1750	7633
f_{t0} (MPa)	-34,9	19,2	-32,8	11,4	2,1	13,4
E_{t0} (MPa)	-4800	2832	-3880	2185	919	2489
f_{t90} (MPa)	-1,83	0,88	-1,77	0,99	0,06	0,86
f_{v0} (MPa)	-6,59	4,62	-6,21	3,39	0,38	2,95
f_{H0} (MPa)	-141,2	28,5	-140,5	19,0	0,7	26,4
f_{H90} (MPa)	-107,8	29,3	-118,2	37,4	-10,3	21,9
W (J)	-10,4	5,39	-12,71	6,75	-2,31	10,25
f_{bw} (kJ/m ²)	-28002	14266	-32568	19297	-4566	27631

III.3- Etapa B - *Pinus caribaea* var. *hondurensis*

III.3.1- Sem impregnação e impregnado com metacrilato de metila

III.3.1.1- Propriedades mecânicas à pressão de impregnação 0,66 MPa

- a) Módulo de resistência à flexão estática (f_M) e Módulo de elasticidade longitudinal na flexão estática (f_{M0})

Tabela 98- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-M), no ensaio de flexão estática.

CP (f_M - E_{M0})	m /si (g)	m_i / (i-M) (g)	m_f / (i-M) (g)
M3i	74,6	137,4	120,4
N3i	80,6	145,1	129,4
O3i	71,5	134,0	122,0
P3i	70,2	135,5	121,7
Q3i	70,4	141,2	126,6
R3i	79,4	144,1	127,7
M	74,5	139,6	124,6
DP	4,6	4,6	3,7

Tabela 99- Módulo de resistência à flexão estática dos CPs de PC - (si) e (i-M).

CP	f_M /si (Mpa)	f_M / i-M (MPa)
Mi	81,8	137,5
Ni	65,5	104,8
Oi	88,7	106,9
Pi	90,0	115,3
Qi	73,9	108,4
Ri	78,6	148,2
M	79,8	120,2
DP	9,3	18,2

Tabela 100- Módulo de elasticidade longitudinal na flexão estática dos CPs de PC - (si) e (i-M).

CP	E_{M0} /si (MPa)	E_{M0} / i-M (MPa)
Mi	7329	10251
Ni	6755	10206
Oi	9030	11239
Pi	9285	10974
Qi	7789	11923
Ri	6695	11676
M	7814	11045
DP	1118	714

- Comparação de pares

Na Tabela 101 estão apresentados os valores da média aritmética ($\bar{x}_m$) e do desvio padrão (s_m) da população P_B , que consiste da diferença entre as propriedades da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (si) e (i-M), os quais foram usados para calcular o intervalo de confiança da média das diferenças.

Tabela 101- Valores de $\bar{x}_m$ e s_m da população P_B para o PC.

Propriedade	P_B / PC	
	$\bar{x}_m$	s_m
f_M (MPa)	-40,4	19,2
E_{M0} (Mpa)	-3231	1220

b) Taxa de desgaste (abrasão)

Tabela 102- Massa dos CPs de PC - (si) antes e depois do ensaio de desgaste mecânico, de 3000 ciclos.

CP	$m_i / (si) (g)$	$m_f / (si) (g)$
Amostra 1	39,6	38,2
Amostra 2	43,7	42,5
Amostra 3	37,5	36,2
M	40,3	39,0
DP	3,2	3,2

Tabela 103- Massa dos CPs de PC - (i-M) antes e depois do ensaio de desgaste mecânico, de 3000 ciclos.

CP	$m_i / (i-M) (g)$	$m_f / (i-M) (g)$
Amostra 1	92,7	91,0
Amostra 2	80,1	78,3
Amostra 3	83,1	81,2
M	85,3	83,5
DP	6,5	6,6

III.3.1.2- Influência do intemperismo artificial em propriedades mecânicas

Tabela 104- Resistência à compressão paralela às fibras dos CPs de PC - (si) e (si - Env).

CP	f_{c0} / si (MPa)	$f_{c0} / \text{si - Env}$ (MPa)
G1	50,2	39,9
H1	35,4	30,4
I1	60,7	51,6
J1	56,5	48,6
K1	39,2	35,1
L1	43,0	34,0
M	47,5	39,9
DP	10,0	8,5

Tabela 105- Módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras dos CPs de PC - (si) e (si - Env).

CP	E_{c0} / si (MPa)	$E_{c0} / \text{si - Env}$ (MPa)
G1	7777	6993
H1	8605	7192
I1	16541	14472
J1	15135	13277
K1	6916	6188
L1	12542	11091
M	11253	9869
DP	4065	3557

Tabela 106- Dureza normal às fibras dos CPs de PC - (si) e (si - Env).

CP	f_{H90} / si (MPa)	$f_{H90} / \text{si - Env}$ (MPa)
G3b	36,7	33,5
H3b	22,9	21,6
I3b	36,0	34,2
J3b	27,7	25,1
K3b	26,7	25,5
L3b	27,7	25,9
M	29,6	27,6
DP	5,5	5,1

Tabela 107- Resistência à compressão paralela às fibras dos CPs de PC - (i-M) e (i-M - Env).

CP	f_{c0} /i-M (MPa)	f_{c0} / i-M - Env (MPa)
B3	97,8	90,6
D3	87,8	81,4
E3	87,1	80,9
F3	63,7	57,5
K3	90,1	82,6
L3	98,9	89,6
M	87,6	80,4
DP	12,7	12,0

Tabela 108- Módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras dos CPs de PC - (i-M) e (i-M - Env).

CP	E_{c0} /i-M (Mpa)	E_{c0} / i-M - Env (MPa)
B3	16603	15740
D3	14174	13514
E3	10322	9871
F3	21728	19987
K3	9929	9246
L3	19404	18098
M	15360	14409
DP	4790	4348

Tabela 109- Dureza normal às fibras dos CPs de PC - (i-M) e (i-M - Env).

CP	f_{H90} /i-M (Mpa)	f_{H90} / i-M - Env (MPa)
B3b	167,8	163,9
D3b	122,3	119,9
E3b	105,8	102,8
F3b	118,6	114,9
K3b	131,8	128,1
L3b	148,2	142,9
M	132,4	128,8
DP	22,4	21,8

III.3.1.3- Influência da pressão de impregnação em propriedades mecânicas

Tabela 110- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-M), no ensaio de compressão paralela às fibras, à P = 0,22 MPa.

CP (f_{c0} - E_{c0})	m /si (g)	m_i / (i-M) (g) – P=0,22 MPa	m_f / (i-M) (g) – P=0,22 MPa
M2c	113,4	159,0	145,0
N2c	116,9	164,6	150,5
O2c	121,8	170,4	152,3
P2c	111,0	157,7	143,2
Q2c	111,2	148,6	141,3
R2c	118,0	165,4	143,1
M	115,4	161,0	145,9
DP	4,3	7,6	4,5

Tabela 111- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-M), no ensaio de compressão paralela às fibras, à P = 0,44 MPa.

CP (f_{c0} - E_{c0})	m /si (g)	m_i / (i-M) (g) – P=0,44 MPa	m_f / (i-M) (g) – P=0,44 MPa
M3c	113,6	207,5	187,5
N3c	118,0	202,5	181,5
O3c	117,4	198,3	168,3
P3c	110,9	213,5	163,5
Q3c	114,8	201,4	171,4
R3c	114,9	196,7	176,7
M	114,9	203,3	174,8
DP	2,6	6,2	8,8

Tabela 112- Resistência à compressão paralela às fibras dos CPs de PC - (si) e (i-M), à P = 0,22 MPa e 0,44 MPa.

CP	f_{c0} /si (MPa)	f_{c0} / i-M (MPa) – P=0,22 MPa	f_{c0} / i-M (MPa) – P=0,44 MPa
Mc	43,1	59,8	68,0
Nc	42,3	61,4	75,3
Oc	39,9	57,6	71,8
Pc	50,9	62,0	73,3
Qc	43,7	59,5	76,9
Rc	49,5	62,3	77,5
M	44,9	60,4	73,8
DP	4,3	1,8	3,6

Tabela 113- Módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras dos CPs de PC - (si) e (i-M), à P = 0,22 MPa e 0,44 MPa.

CP	E_{c0} /si (MPa)	E_{c0} / i-M (MPa) – P=0,22 MPa	E_{c0} / i-M (MPa) – P=0,44 MPa
Mc	10367	12833	14975
Nc	9362	13548	16753
Oc	9403	12562	14110
Pc	11741	12885	14376
Qc	8980	12107	14732
Rc	10194	12224	14119
M	10008	12693	14844
DP	1001	523	996

Tabela 114- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-M), no ensaio para a determinação das durezas paralela e normal às fibras, à P = 0,22 MPa.

CP (f_{H0} - f_{H90})	m /si (g)	m_i / (i-M) (g) – P=0,22 MPa	m_f / (i-M) (g) – P=0,22 MPa
M2b	113,4	157,0	145,0
N2b	113,4	160,3	141,5
O2b	116,9	163,5	148,3
P2b	117,5	160,8	143,2
Q2b	121,8	169,3	151,3
R2b	113,5	158,4	143,1
M	116,1	161,6	145,4
DP	3,4	4,4	3,7

Tabela 115- Massa dos CPs de PC - (si) e (i-M), no ensaio para a determinação das durezas paralela e normal às fibras, à P = 0,44 MPa.

CP (f_{H0} - f_{H90})	m /si (g)	m_i / (i-M) (g) – P=0,44 MPa	m_f / (i-M) (g) – P=0,44 MPa
M3b	113,6	210,5	177,5
N3b	115,9	213,0	173,0
O3b	118,0	200,5	181,5
P3b	121,1	198,4	179,4
Q3b	117,4	218,3	168,3
R3b	111,3	206,1	168,1
M	116,2	207,8	174,6
DP	3,5	7,6	5,7

Tabela 116- Dureza paralela às fibras dos CPs de PC - (si) e (i-M), à P = 0,22 MPa e 0,44 MPa.

CP	f_{H0} /si (MPa)	f_{H0} / i-M (MPa) – P=0,22 MPa	f_{H0} / i-M (MPa) – P=0,44 MPa
Mb	63,8	103,1	163,4
Nb	59,4	101,6	134,3
Ob	54,6	114,0	151,8
Pb	56,3	112,2	139,4
Qb	69,2	104,7	155,4
Rb	61,5	103,9	151,7
M	60,8	106,6	149,3
DP	5,3	5,2	10,7

Tabela 117- Dureza normal às fibras dos CPs de PC - (si) e (i-M), à P = 0,22 MPa e 0,44 MPa.

CP	f_{H90} /si (MPa)	f_{H90} / i-M (MPa) – P=0,22 MPa	f_{H90} / i-M (MPa) – P=0,44 MPa
Mb	36,1	80,3	111,1
Nb	37,4	75,7	129,0
Ob	35,6	73,1	108,5
Pb	36,0	76,3	105,8
Qb	37,8	73,5	115,1
Rb	39,0	76,7	104,8
M	37,0	75,9	112,4
DP	1,3	2,6	8,9

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM – D 143-52: *Standard methods of testing small clear specimens of timber*, Part 22, p.59-116, Philadelphia, PA., 1981.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM – G 26: *Standard practice for operating light-exposure apparatus (xenon-arc type) with and without water for exposure of nonmetallic materials*. p.1-10, Philadelphia, PA., 1985.
- ASKELAND, D.R. *The science and engineering of materials*. 3.ed. Boston, PWS Publishing Company, 1994. 812p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190 - *Projeto de estruturas de madeira*. Anexo B, p.47-67, Rio de Janeiro, 1997.
- AVILOV, A.; DERUYGA, V.; POPOV, G.; RUDYCHEV, V.; ZALYUBOVSKY, I. Non-waste and resource-saving radiation process of polymer modified wood production. In: 1999 PARTICLE ACCELERATOR CONFERENCE, New York City, 1999. *Proceedings*. v.4, p.2549-2551, 1999.
- BLASS, A. *Processamento de polímeros*. Florianópolis, Editora da Universidade Federal de Santa Catarina, 1985. 254p.
- BODIG, J.; JAYNE, B.A. *Mechanics of wood and wood composites*. New York, Van Nostrand Reinhold, 1992. 712p.
- BURGER, L.M.; RICHTER, H.G. *Anatomia da madeira*. São Paulo, Nobel, 1991. 154p.
- BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G. *Química de madeira*. 3.ed. Piracicaba, Calq, 1985. 126p.
- BROWNING, B.L. *The chemistry of wood*. New York, Interscience Publishers, 1963. 689p.
- CALIL JR, C.; ROCCO LAHR, F.A.; DIAS, A.A. *Dimensionamento de elementos estruturais de madeira*. 1.ed. Barueri/SP, Manole, 2003. 152p.

- CALLISTER JR, W.D. *Materials science and engineering: an introduction*. 3.ed. New York, John Wiley, 1994. 811p.
- CAVALCANTE, M. S. Histórico da preservação de madeiras. In: LEPAGE, E.S. (Coord.), *Manual de preservação de madeiras*. v.1. São Paulo, IPT, 1986. p.9-39.
- CHAWLA, K.K. *Composite materials: science and engineering*. 2.ed. New York, Springer Verlag, 1998. 483p.
- CIESLA, W.M. Forest Health Management International. - Página da internet: www.forestryimages.org (6 jul.), 2005.
- D'ALMEIDA, M.L.O. Composição química dos materiais lignocelulósicos. In: D'ALMEIDA, M.L.O. (Coord.), *Celulose e papel*. v. 1. Tecnologia de fabricação da pasta celulósica. 2.ed. São Paulo, SENAI, IPT, 1988. p.45-106.
- DIAS, F.M.; ROCCO LAHR, F.A. Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente. *Scientia Forestalis*, n.65, p.102-113, jun., 2004.
- DEVI, R.R.; ALI, I.; MAJI, T.K. Chemical modification of rubber wood with styrene in combination with a crosslinker: effect on dimensional stability and strength property. *Bioresource Technology*, v.88, n.3, p.185-188, July, 2003.
- ELIAS, H.G. *An introduction to plastics*. 1.ed. Weinheim; New York, VCH, 1993. 349p.
- ERICKSON, H.D.; BALATINECZ, J.J. Liquid flow paths wood using polymerization techniques- Douglas-Fir and styrene. *Forest Products Journal*, p.293-299, July, 1964.
- ESAU, K. *Anatomia das plantas com sementes*. Trad. de Berta Lange de Morretes. São Paulo, Edgard Blücher, 1974. 293p.
- FENGEL, D.; WEGENER, G. *Wood: chemistry, ultrastructure, reactions*. New York, Walter de Gruyter, 1989. 613p.
- FERREIRA, O.P. (Coord.). *Madeira: uso sustentável na construção civil*. São Paulo, IPT, SVMA, SindusCon, SP. Publicação IPT, 2003. 59p.
- GALVÃO, A.P.M.; JANKOWSKY, I.P. *Secagem racional da madeira*. São Paulo, Nobel, 1985. 111p.

- GOMES, O.F. *Estudo das ligações cavilhadas impregnadas com resinas estirênicas empregadas em estruturas de madeiras*. São Carlos, 1996. 241p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- HELLMEISTER, J.C. Madeiras e suas características. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 1., São Carlos, 1983. *Anais*. São Paulo, USP-EESC. v.1, p.1-32, 1983.
- HILL, C.A.S.; CETIN, N.S.; QUINNEY, R.F.; DERBYSHIRE, H.; EWEN, R.J. An investigation of potential for chemical modification and subsequent polymeric grafting as a means of protecting wood against photodegradation. *Polymer Degradation and Stability*, v.72, p.133-139, 2001.
- HORATH, L. *Fundamentals of materials science for technologists: properties, testing, and laboratory exercises*. Englewood Cliffs, N.J.. Prentice Hall, 1995. 550p.
- INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS - IPEF. Página da Internet - endereço: <http://www.ipef.br/estatisticas> (28 abr.), 2005.
- INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS - IQSC. Página da Internet - endereço: <http://www.iqsc.usp.br/iqsc/instituto/infra/caqi/l5.php> (6 jul.), 2005.
- JANKOWSKY, I.P. Fundamentos de secagem de madeiras. *Documentos Florestais*, Cap.10, p.1-13, jun., 1990.
- KENAGA, D.L.; FENNESSEY, J.P.; STANNETT, V.T. Radiation grafting of vinyl monomers to wood. *Forest Products Journal*, p.161-168, Abr., 1962.
- KOLLMANN, F.F.P.; CÔTÉ JR, W.A. *Principles of wood science and technology*. v.1. Solid wood. Berlin; Heidelberg, Springer Verlag, 1968. 592p.
- LANGWIG, J.E.; MEYER, J.A; DAVIDSON, R.W. Influence of polymer impregnation on mechanical properties of basswood. *Forest Products Journal*, v.18, n.7, p.33-36, July, 1968.
- LEPAGE, E.S. Compostos madeira-plástico: estudo de algumas propriedades mecânicas de madeira *Pinus elliottii* impregnada com monômero metacrilato de metila. *Pesquisa & Desenvolvimento*, Instituto de Pesquisas Tecnológicas de Estado de São Paulo (IPT), v.10, 1982.
- LEPAGE, E.S. Química da madeira. In: LEPAGE, E.S. (Coord.), *Manual de preservação de madeiras*. v.1. São Paulo, IPT, 1986. p.69-97.

MANO, E.B. *Polímeros como materiais de engenharia*. São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda, 1991. 197p.

MANO, E.B.; MENDES, L.C. *Introdução a polímeros*. 2.ed. São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda, 1999. 191p.

MANRICH, S. *O emprego de madeiras brasileiras na obtenção de compósitos polímero-madeira*. São Carlos, 1984. 184p. Dissertação (Mestrado) - Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos.

MEYER, J.A. Treatment of wood-polymer systems using catalyst-heat techniques. *Forest Products Journal*, v.15, n.9, p.362-364, Sept., 1965.

MEYER, J.A. Wood-polymer materials: state of the art. *Wood Science*, v.14, n.2, p.49-54, Oct., 1981.

MEYER, J.A. Industrial use of wood-polymer materials: state of the art. *Forest Products Journal*, v.32, n.1, p.24-29, Jan., 1982.

MEYER, L.P. *Probabilidade: aplicações à estatística*. Rio de Janeiro, Ao Livro Técnico S. A, 1972. 391p.

MORALES, E.A.M. *Determinação do módulo de elasticidade da madeira: proposta para simplificação de procedimentos metodológicos*. São Carlos, 2002. 86p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

NASCIMENTO, M.F. CPH - Chapas de Partículas Homogêneas - Madeiras do Nordeste do Brasil. São Carlos, 2003. 143p. Tese (Doutorado) – Interunidades / Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURES ASSOCIATION. NEMA - LD 3-2000: *High-pressure decorative laminates*, Section 3 - Annex D, p. 42-45, p. D1-D2, Rosslyn, Virginia, 2001.

NOGUEIRA, J.S.; LAHR, F.A.R.; PRIANTE FILHO, N.; NOGUEIRA, M.C.J.A. Impregnação com resina natural na Figueira Branca como forma alternativa de impermeabilização. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.6, n.2, p.321-324, maio/ago., 2002.

OMIDVAR, A.; RUDDICK, J. The influence of low styrene content on the decay resistance of an aspen wood polymer composite. *Forest Products Journal*, v.54, n.10, p.57-58, Oct., 2004.

- ROCCO LAHR, F.A. *Sobre a determinação de propriedades de elasticidade da madeira*. São Carlos, 1983. 210p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SANTOS, G.R.V.; JANKOWSKY, I.P.; ANDRADE, A. Curva característica de secagem para madeira de *Eucalyptus grandis*. *Scientia Forestalis*, n.63, p.214-220, jun., 2003.
- SCHNEIDER, M.H.; OMIDVAR, A. Effect of MC and penetration direction on the distribution of styrene in Red Maple. *Forest Products Journal*, v.47, n.(11/12), p.97-101, Nov., 1997.
- SCHNEIDER, M.H.; WITT, A.E. History of wood polymer composite commercialization. *Forest Products Journal*, v.54, n.4, p.19-24, Apr., 2004.
- SEVERO, E.T.D. *Uma nova técnica para secagem da madeira de Eucalyptus grandis*. Botucatu, 2004. 83p. Tese (Livre Docência) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.
- SHACKELFORD, J.F. *Introduction to materials science for engineers*. 4.ed. Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall, 1996. 670p.
- SIQUEIRA, M.L. *Projeto e construção de máquina para determinação da tenacidade de madeira*. São Carlos, 1986. 103p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SJÖSTRÖM, E. *Wood chemistry: fundamentals and applications*. London, Academic Press, 1981. 223p.
- SMITH, W.F. *Princípios de ciência e engenharia de materiais*. 3.ed. Lisboa, McGraw-Hill, 1998. 892p.
- SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA - SBS. Página da Internet - endereço: <http://www.sbs.org.br/estatisticas.htm> (22 jan.), 2005.
- SOLPAN, D.; GÜVEN, O. Preservation of beech and spruce wood by allyl alcohol-based copolymers. *Radiation Physics and Chemistry*, v.54, p.583-591, 1999.
- STOLF, D.O. *Tenacidade da madeira*. São Carlos, 2000. 101p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos / Instituto de Química de São Carlos / Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo.

TIMMONS, T.K.; MEYER, J.A.; CÔTÉ JR, W.A. Polymer location in the wood-polymer composite. *Wood Science*, v.4, n.1, p.13-24, July, 1971.

VAN VLACK, L.H. *Princípios de ciência e tecnologia dos materiais*. 4.ed. Rio de Janeiro, Editora Campus Ltda., 1984. 567p.

VAN VLACK, L.H. *Elements of materials science and engineering*. 6.ed. Addison, Wesley Company, 1989. 598p.

VOLLMERT, B. Thermal decomposition of initiators. In: *Polymer Chemistry*. 1.ed. 1973. p.50-54.

YALINKILIC, M.K.; TSUNODA, K.; TAKAHASHI, M.; GEZER, E.D.; DWIANTO, W.; NEMOTO, H.. Enhancement of biological and physical properties of wood by boric acid-vinyl monomer combination treatment. *Holzforschung*, v.52, n.6, p.667-672, 1998.

YALINKILIC, M.K.; IMAMURA, Y.; TAKAHASHI, M.; YALINKILIC, A.C. In situ polymerization of vinyl monomers during compressive deformation of wood treated with boric acid to delay boron leaching. *Forest Products Journal*, v.49, n.2, p.43-51, Feb., 1999.

Página da Internet

- http://fai.unne.edu.ar/biologia/plantas/maderas.htm#comparativo_del_leño (8 jul.), 2005.