

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA



CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS À BASE DE
RESÍDUOS VEGETAIS E ARGAMASSA DE CIMENTO
MODIFICADA PELA ADIÇÃO DE POLÍMEROS PARA A
FABRICAÇÃO DE BLOCOS VAZADOS

AUGUSTO CESARE STANCATO

CAMPINAS
JUNHO DE 2006

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS À BASE DE
RESÍDUOS VEGETAIS E ARGAMASSA DE CIMENTO
MODIFICADA PELA ADIÇÃO DE POLÍMEROS PARA A
FABRICAÇÃO DE BLOCOS VAZADOS

Tese submetida à banca examinadora para
obtenção do título de Doutor em Engenharia
Agrícola na área de concentração em
Construções Rurais e Ambiência

AUGUSTO CESARE STANCATO

Orientador: Prof. Dr. Antonio Ludovico Beraldo

CAMPINAS
JUNHO DE 2006

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

St24c Stancato, Augusto Cesare
Caracterização de compósitos à base de resíduos
vegetais e argamassa de cimento modificada pela adição
de polímeros para a fabricação de blocos vazados /
Augusto Cesare Stancato.--Campinas, SP: [s.n.], 2006.

Orientador: Antonio Ludovico Beraldo.
Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Compostos fibrosos 2. Resíduos vegetais. 3.
Cimento. 4. Polímeros. 5. Porosidade. 6. Testes não-
destrutivos. 7. Microscopia eletrônica de varredura. I.
Beraldo, Antonio Ludovico. II. Universidade Estadual
de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III.
Título.

Titulo em Inglês: Characterization of vegetable waste composite with polymer-
modified cement for the manufacture of hollow blocks.

Palavras-chave em Inglês: Composites, Vegetable wastes, Cement, Polymers,
Porosity, NDT, SEM

Área de concentração: Construções rurais e ambiência

Titulação: Doutor em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Normando Perazzo Barbosa, Romildo Dias Toledo Filho,
Holmer Savastano Junior, Armando Lopes Moreno Junior

Data da defesa: 02/06/2006

*À minha esposa Silvia, minha companheira, aos meus pais, por estarem sempre
ao meu lado em todos os momentos, aos meus irmãos e família.*

À minha filha Eduarda.

AGRADECIMENTOS

Ao **Prof. Dr. Antonio Ludovico Beraldo**, pela orientação, boa vontade, presteza, e contínuo interesse. Tive a oportunidade de aprender muito com suas valorosas orientações, entendendo que não há limites para o desenvolvimento intelectual e para o aprendizado.

Ao **Prof. Dr. Luiz Antonio Rossi**, pelo empréstimo de equipamentos e orientação.

Ao companheiro e pesquisador **Lóris Lodir Zucco**, pelo auxílio e contribuição técnica, e que apesar da sua teimosia e da sua famosa retórica, é sem dúvida um grande pesquisador.

Às técnicas **Flávia e Gisleiva** do Laboratório de Materiais e Estruturas, pela ajuda sempre prestativa e desinteressada, contribuindo efetivamente para este trabalho.

Aos técnicos do Laboratório de Solos e do LEMC da Unicamp, pela ajuda sempre bem humorada e tranqüila, agradeço pela atenção e pelo respeito.

Ao **Eng^o Luciano** e ao técnico **Rafael** pelo fornecimento do material e, também, pela possibilidade de utilização das instalações do laboratório de pesquisa da Rhodia do Brasil.

Ao Departamento de Engenharia de Petróleo da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP pela utilização das instalações do LMPT, em especial ao técnico **Pompeu**.

Ao Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, na pessoa do **Sidnei, Paulo e Jefferson**, pelo auxílio e orientação na preparação das amostras e na utilização dos equipamentos.

Ao **Prof. Dr. Saulo Güths**, novamente pela sua incomensurável ajuda, disposição, amizade e, principalmente, por me fazer acreditar que ainda existem pessoas solidárias.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xx
RESUMO	xxv
ABSTRACT	xxvi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Justificativa	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Fibras vegetais	4
2.1.1 Disponibilidade e potencial de utilização dos resíduos vegetais no Brasil ...	9
2.1.2 Panorama das fibras de Eucalipto, Sisal, Pinus e casca de arroz	11
2.2 Resíduos vegetais em compósitos cimentícios	12
2.3 Características da mistura do cimento Portland com os resíduos vegetais	14
2.4 Incompatibilidade química entre resíduos vegetais e cimento	16
2.5 Porosidade em compósitos à base de cimento	24
2.6 Matriz cimentícia modificada pela adição de polímeros	28
2.6.1 Princípios da modificação pela ação do polímero	33
2.6.2 Propriedades das argamassas e concretos no estado fresco	34
2.6.3 Propriedades das argamassas e concretos no estado endurecido	35
2.7 Utilização de ensaios não destrutivos (END) como metodologia complementar...	37

2.8 Estudo da microestrutura através da microscopia por varredura (MEV)	41
2.8.1 Aplicações da microscopia eletrônica de varredura aos compósitos cimentícios	42
2.8.2 Técnica de microscopia de varredura por elétrons retroespalhados (BSE) ...	43
2.9 Conceitos de calor e determinação da condutividade térmica em compósitos	45
2.10 Produção e confecção de blocos vazados à base de cimento	48
2.10.1 Dosagem para blocos de concreto	48
2.10.2 Mistura e confecção dos blocos vazados	50
2.10.3 Tratamento de cura para os blocos	51
3. MATERIAIS E MÉTODOS	53
3.1 Materiais utilizados na composição dos compósitos	53
3.1.1 Metodologia de caracterização relativa aos resíduos	55
3.1.1.1 Coleta e separação dos resíduos	55
3.1.1.2 Tratamento químico dos resíduos e secagem pelo método da estufa	56
3.1.1.3 Secagem pelo método da estufa	57
3.1.1.4 Composição granulométrica de acordo com a ABNT	57
3.1.1.5 Determinação da massa unitária dos resíduos	57
3.1.2 Índices para caracterização dos agregados minerais, cimentos e polímeros .	58
3.1.2.1 Composição granulométrica dos agregados minerais	58
3.1.2.2 Determinação da massa unitária dos agregados minerais	58
3.1.2.3. Tipos e características dos cimentos utilizados	58
3.1.2.4 Tipos e características dos polímeros utilizados	60
3.2 Processo de caracterização dos compósitos	61
3.2.1 Determinação do grau de compatibilidade entre o resíduo vegetal e o cimento através do monitoramento da temperatura do calor de hidratação do cimento	61
3.2.1.1 Determinação das curvas de calor de hidratação e preparação das amostras	64
3.2.2 Obtenção dos traços de trabalho para confecção dos blocos vazados	66
3.2.2.1 Procedimento para elaboração das misturas dos componentes, moldagem e cura dos compósitos	67

3.2.3	Caracterização física e mecânica dos compósitos	69
3.2.3.1	Determinação do índice de retenção de água dos compósitos	70
3.2.3.2	Monitoramento dos compósitos através do ultrassom durante o endurecimento	71
3.2.3.3	Determinação da resistência à compressão dos compósitos	73
3.2.3.4	Determinação da absorção de água por capilaridade	74
3.2.3.5	Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido	75
3.2.4	Metodologia específica para caracterização final dos compósitos	76
3.2.4.1	Determinação da permeabilidade e da porosidade	76
3.2.4.1.1	Preparação das amostras	76
3.2.4.1.2	Ensaio de Permeabilidade	77
3.2.4.1.3	Ensaio de Porosidade	78
3.2.4.2	Caracterização da Microestrutura através dos ensaios de microscopia eletrônica	79
3.2.4.2.1	Preparação das amostras	80
3.2.4.2.2	Ensaio de microscopia por varredura (MEV)	80
3.2.4.3	Determinação da condutividade térmica	83
3.3	Caracterização e procedimentos específicos para blocos vazados	86
3.3.1	Preparação e moldagens dos blocos vazados	86
3.3.2	Ensaio de caracterização dos blocos vazados	87
3.3.2.1	Ensaio de resistência à compressão	88
3.3.2.2	Ensaio de absorção de água, o teor de umidade e a área líquida	88
4.	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E COMENTÁRIOS GERAIS	91
4.1	Caracterização dos materiais	91
4.2	Curvas do calor de hidratação das misturas com resíduos e pastas de cimento	95
4.3	Análise do grau de compatibilidade química entre o cimento os resíduos vegetais	105
4.3.1	Metodologia baseada no valor da temperatura máxima	106
4.3.2	Índice inibitório baseado no monitoramento da curva do calor de hidratação	109
4.3.3	Fator “CA” - razão entre as áreas abaixo da curva do calor de hidratação ...	114
4.4	Caracterização física e mecânica dos compósitos	117
4.4.1	Índice de retenção de água	117

4.4.2 Velocidade do pulso ultra-sônico dos compósitos (VPU)	120
4.4.3 Resistência à compressão dos compósitos	124
4.4.4 Correlação entre resistência à compressão e VPU	127
4.4.5 Absorção de água por capilaridade	130
4.4.6 Densidade de massa aparente no estado endurecido	138
4.5 Caracterização específica dos compósitos	146
4.5.1 Análise da porosidade e da permeabilidade	146
4.5.2 Análise da condutividade térmica	150
4.5.3 Análise de imagens por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV)	153
4.6 Resultados dos ensaios dos blocos vazados com resíduos vegetais	163
4.6.1 Resistência à compressão e absorção de água dos blocos	163
4.6.2 Velocidade do pulso ultra-sônico (VPU) dos blocos	167
5. CONCLUSÕES	179
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	183
ANEXOS	190

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Esquema do experimento de filtragem de Darcy	27
Figura 2.2	Modelo representativo do mecanismo de ação do polímero no concreto ..	29
Figura 2.3	Teor de ar incorporado de argamassa preparada sem PVA (Argamassa W), com PVA adicionado juntamente com a água inicial (Argamassa P), com PVA e agente antiespumante adicionado com a água inicial (Argamassa PA), e amostra preparada com a técnica de pré-molhagem (Argamassa WP)	30
Figura 2.4	MEV da argamassa modificada pela adição de polímero	36
Figura 2.5	Ensaio não destrutivo (END) através da utilização da propagação de ondas ultra-sônicas em compósitos cimentícios à base de resíduos vegetais	39
Figura 2.6	Processos de interações possíveis durante a incidência de um feixe de elétrons em amostra sólida	41
Figura 2.7	Imagem típica BSE de uma argamassa de cimento Portland (200 dias de idade, A/C=0,4), com os constituintes microestruturais identificados	42
Figura 2.8	Imagem da etringita após fenômeno de retração por desidratação em pasta de cimento Portland	44
Figura 2.9	Esquemas possíveis de configurações do método fluximétrico (P1 e P2: placas quente e fria, F: condutivímetro fluximétrico e CP: corpo-de-prova)	47
Figura 3.1	Resíduos provenientes das espécies: (a) <i>Eucalyptus grandis</i> e (b) <i>Pinus caribaea</i>	53
Figura 3.2	Resíduos provenientes da: (a) casca de arroz e (b) espécie <i>Agave sisalana</i> (sisal)	54
Figura 3.3	Evolução da resistência à compressão com a idade do cimento CPV-ARI	60

Figura 3.4	Combinações da biomassa vegetal com granulometria #100: sem tratamento e os cimentos CII e CII-E; com tratamento e os cimentos CIII, CII-E e CPV-ARI sem adições e com adição de CaCl ₂ e SBR	63
Figura 3.5	Combinações da biomassa vegetal com granulometria normal: com tratamento e os cimentos CII, CII-E; CPV-ARI, sem adições, e com adição de CaCl ₂ e SBR	64
Figura 3.6	Esquema do dispositivo de aquisição da temperatura x tempo das misturas	64
Figura 3.7	Amostras utilizadas de acordo com a metodologia adotada e seus respectivos ensaios: (A) ensaios de porosidade e permeabilidade, (B) ensaios físicos e mecânicos e (C) ensaios de condutividade térmica	68
Figura 3.8	Amostras (A), (B) e (C) na etapa de cura em ambiente de laboratório (a) e (b)	69
Figura 3.9	Dispositivos do ensaio de retenção de água de acordo com a norma NBR-13277	70
Figura 3.10	Monitoramento com dispositivo de medição da velocidade do pulso ultra-sônico em amostras cilíndricas: (a) dispositivo de medição e apoio dos corpos-de-prova e (b) ensaio	72
Figura 3.11	Monitoramento da velocidade do pulso ultra-sônico em blocos vazados ..	72
Figura 3.12	Esforços de compressão axial simples em amostras cilíndricas (a) e (b) ..	73
Figura 3.13	Execução do ensaio de absorção de água por capilaridade dos compósitos.	74
Figura 3.14	Equipamento denominado permeabilímetro usado para medir a permeabilidade por intrusão do gás nitrogênio (N ₂)	77
Figura 3.15	Equipamento denominado porosímetro utilizado para medir a porosidade por intrusão do gás nitrogênio (N ₂)	79
Figura 3.16	Dispositivo para deposição de filme fino a vácuo (ouro ou carbono) sobre a amostra denominado <i>Sputtering</i> : (a) perspectiva geral (b) abertura da câmara (c) câmara vazia (d) câmara com o porta-amostra	80
Figura 3.17	Microscópio eletrônico de varredura LV-SEM (modelo JSM-5900LV) ...	81
Figura 3.18	Porta-amostra após banho em ouro (a) e dispositivo para introduzir o porta-amostra no interior da câmara de infravermelho do microscópio LV-SEM (b)	82

Figura 3.19	Informações características de aquisição através da microscopia de varredura	83
Figura 3.20	Princípio do método de medição da resistência térmica	83
Figura 3.21	Esquema simplificado do dispositivo de medição da condutividade térmica	84
Figura 4.1	Distribuição granulométrica dos resíduos com base em porcentagem passante	92
Figura 4.2	Distribuição granulométrica dos agregados minerais em porcentagem passante	93
Figura 4.3	Variação do calor de hidratação dos resíduos naturais (#100) com CII-E	95
Figura 4.4	Variação do calor de hidratação dos resíduos tratados (#100) com CII-E	95
Figura 4.5	Variação do calor de hidratação dos resíduos naturais (#100) com CIII .	96
Figura 4.6	Variação do calor de hidratação dos resíduos tratados (#100) com CIII .	96
Figura 4.7	Variação do calor de hidratação dos resíduos naturais (#100) com CPV-ARI	96
Figura 4.8	Variação do calor de hidratação dos resíduos tratados (#100) com CPV-ARI	97
Figura 4.9	Variação do calor de hidratação do <i>Eucalyptus grandis</i> tratado (#100) com CPV-ARI (sem adição, com adição de CaCl ₂ e SBR)	98
Figura 4.10	Variação do calor de hidratação do <i>Pinus caribaea</i> tratado (#100) com CPV-ARI (sem adição, com adição de CaCl ₂ e SBR)	98
Figura 4.11	Variação do calor de hidratação da casca de arroz tratada (#100) com CPV-ARI (sem adição, com adição de CaCl ₂ e SBR)	98
Figura 4.12	Variação do calor de hidratação do sisal tratado (#100) com CPV-ARI (sem adição, com adição de CaCl ₂ e SBR)	99
Figura 4.13	Variação do calor de hidratação dos resíduos tratados de <i>Eucalyptus grandis</i> traço 1:0,40:0,75 com o cimento CII-E. (sem adição, com adição de CaCl ₂ e SBR)	100
Figura 4.14	Variação do calor de hidratação dos resíduos tratados de <i>Pinus caribaea</i> traço 1:0,40:0,55 com o cimento CII-E (sem adições, com adição de CaCl ₂ e SBR)	100

Figura 4.15	Varição do calor de hidratação dos resíduos tratados de casca de arroz traço 1:0,36:0,50 com o cimento CPII-E (sem adições, com adição de CaCl ₂ e SBR)	100
Figura 4.16	Varição do calor de hidratação dos resíduos tratados de <i>Agave sisalana</i> traço 1:0,15:0,55 com o cimento CPII-E (sem adições, com adição de CaCl ₂ e SBR)	101
Figura 4.17	Varição do calor de hidratação dos resíduos tratados de <i>Eucalyptus grandis</i> traço 1:0,40:0,75 com o cimento CPIII (sem adições, com adição de CaCl ₂ e SBR)	101
Figura 4.18	Varição do calor de hidratação dos resíduos tratados de <i>Pinus caribaea</i> traço 1:0,40:0,55 com o cimento CPIII (sem adições, com adição de CaCl ₂ e SBR)	102
Figura 4.19	Varição do calor de hidratação dos resíduos tratados de casca de arroz traço 1:0,36:0,50 com o cimento CPIII (sem adições, com adição de CaCl ₂ e SBR)	102
Figura 4.20	Varição do calor de hidratação dos resíduos tratados de casca de arroz traço 1:0,15:0,55 com o cimento CPIII (sem adições, com adição de CaCl ₂ e SBR)	102
Figura 4.21	Varição do calor de hidratação dos resíduos tratados de <i>Eucalyptus grandis</i> traço 1:0,40:0,75 com o cimento CPV-ARI (sem adições, com adição de CaCl ₂ e SBR)	103
Figura 4.22	Varição do calor de hidratação dos resíduos tratados de <i>Pinus caribaea</i> traço 1:0,40:0,55 com o cimento CPV-ARI (sem adições, com adição de CaCl ₂ e SBR)	103
Figura 4.23	Varição do calor de hidratação dos resíduos tratados de <i>Pinus caribaea</i> traço 1:0,40:0,75 com o cimento CPV-ARI (sem adições, com adição de CaCl ₂ e SBR)	104
Figura 4.24	Varição do calor de hidratação dos resíduos tratados de casca de arroz traço 1:0,36:0,50 com o cimento CPV-ARI (sem adições, com adição de CaCl ₂ e SBR)	104
Figura 4.25	Varição do calor de hidratação dos resíduos tratados de <i>Agave sisalana</i> traço 1:0,15,0,55 com o cimento CPV-ARI (sem adições, com adição de CaCl ₂ e SBR)	104
Figura 4.26	Varição do calor de hidratação dos resíduos tratados de <i>Agave sisalana</i> traço 1:0,108:0,48 com o cimento CPV-ARI (sem adições, com adição de CaCl ₂ e SBR)	105

Figura 4.27	Grau de compatibilidade química pelo índice de inibição das misturas (CPII-E)	106
Figura 4.28	Grau de compatibilidade química pelo índice de inibição das misturas (CPIII)	112
Figura 4.29	Grau de compatibilidade química pelo índice de inibição das misturas (CPV-ARI)	114
Figura 4.30	Retenção de água do compósito de <i>Eucalyptus grandis</i> : (a) (SBR) e (b) PAV22	118
Figura 4.31	Retenção de água do compósito de <i>Pinus caribaea</i> : (a) SBR e (b) PAV22	118
Figura 4.32	Retenção de água do compósito de casca de arroz: (a) SBR e (b) PAV22	119
Figura 4.33	Retenção de água do compósito de <i>Agave sisalana</i> : (a) SBR e (b) PAV22	119
Figura 4.34	VPU no compósito de <i>Eucalyptus grandis</i> (SBR)	120
Figura 4.35	VPU no compósito de <i>Eucalyptus grandis</i> (PAV22)	121
Figura 4.36	VPU no compósito de <i>Pinus caribaea</i> (SBR)	121
Figura 4.37	VPU no compósito de <i>Pinus caribaea</i> (PAV22)	122
Figura 4.38	VPU no compósito de Casca de arroz (SBR)	122
Figura 4.39	VPU no compósito de Casca de arroz (PAV22)	123
Figura 4.40	VPU no compósito de <i>Agave sisalana</i> “sisal” (SBR)	123
Figura 4.41	VPU no compósito de <i>Agave sisalana</i> (PAV22)	124
Figura 4.42	Resistência à compressão (7 dias) do compósito de <i>Eucalyptus grandis</i> ...	125
Figura 4.43	Resistência à compressão (7 dias) do compósito de <i>Pinus caribaea</i>	125
Figura 4.44	Resistência à compressão (7 dias) do compósito de Casca de arroz	126
Figura 4.45	Resistência à compressão (7 dias) do compósito de <i>Agave sisalana</i> (sisal)	126
Figura 4.46	Correlação entre resistência à compressão (7 dias) e a VPU (7 dias) dos compósitos de <i>Eucalyptus grandis</i> com adição de SBR	127
Figura 4.47	Correlação entre resistência à compressão (7 dias) e a VPU (7 dias) dos compósitos de <i>Eucalyptus grandis</i> com adição de PAV22	128

Figura 4.48	Correlação entre resistência à compressão (7 dias) e a VPU (7 dias) dos compósitos de <i>Pinus caribaea</i> com adição de SBR	128
Figura 4.49	Correlação entre resistência à compressão (7 dias) e a VPU (7 dias) dos compósitos de <i>Pinus caribaea</i> com adição de PAV22	128
Figura 4.50	Correlação entre resistência à compressão (7 dias) e a VPU (7 dias) dos compósitos de Casca de arroz com adição de SBR	129
Figura 4.51	Correlação entre resistência à compressão (7 dias) e a VPU (7 dias) dos compósitos de Casca de arroz com adição de PAV22	129
Figura 4.52	Correlação entre resistência à compressão (7 dias) e a VPU (7 dias) dos compósitos de <i>Agave sisalana</i> com adição de SBR	129
Figura 4.53	Correlação entre resistência à compressão (7 dias) e a VPU (7 dias) dos compósitos de <i>Agave sisalana</i> com adição de PAV22	130
Figura 4.54	Absorção de água por capilaridade do <i>Eucalyptus grandis</i> (SBR)	131
Figura 4.55	Altura de penetração de água no compósito de <i>Eucalyptus grandis</i> (SBR)	131
Figura 4.56	Absorção de água por capilaridade do <i>Eucalyptus grandis</i> (PAV22)	132
Figura 4.57	Altura de penetração de água no compósito de <i>Eucalyptus grandis</i> (PAV22)	132
Figura 4.58	Absorção de água por capilaridade do <i>Pinus caribaea</i> (SBR)	133
Figura 4.59	Altura de penetração de água no compósito de <i>Pinus caribaea</i> (SBR)	133
Figura 4.60	Absorção de água por capilaridade do <i>Pinus caribaea</i> (PAV22)	134
Figura 4.61	Altura de penetração de água no compósito <i>Pinus caribaea</i> (PAV22)	134
Figura 4.62	Absorção de água por capilaridade do compósito de Casca de arroz (SBR)	135
Figura 4.63	Altura de penetração de água no compósito de Casca de arroz (SBR)	135
Figura 4.64	Absorção de água por capilaridade do compósito de Casca de arroz (PAV22)	136
Figura 4.65	Altura de penetração de água no compósito de Casca de arroz (PAV22) ..	136
Figura 4.66	Absorção de água por capilaridade do compósito <i>Agave sisalana</i> (SBR) .	137
Figura 4.67	Altura de penetração de água no compósito de <i>Agave sisalana</i> (SBR)	137

Figura 4.68	Absorção de água por capilaridade do compósito <i>Agave sisalana</i> (PAV22)	138
Figura 4.69	Altura de penetração de água no compósito <i>Agave sisalana</i> (PAV22)	138
Figura 4.70	Densidade de massa aparente do compósito de <i>Eucalyptus grandis</i> (SBR)	140
Figura 4.71	Densidade de massa aparente do compósito <i>Eucalyptus grandis</i> (PAV22)	140
Figura 4.72	Densidade de massa aparente do compósito de <i>Pinus caribaea</i> (SBR)	141
Figura 4.73	Densidade de massa aparente do compósito de <i>Pinus caribaea</i> (PAV22)	141
Figura 4.74	Densidade de massa aparente do compósito de Casca de arroz (SBR)	143
Figura 4.75	Densidade de massa aparente do compósito de Casca de arroz (PAV22)	143
Figura 4.76	Densidade de massa aparente do compósito de <i>Agave sisalana</i> “sisal” (SBR)	145
Figura 4.77	Densidade de massa aparente do compósito de <i>Agave sisalana</i> “sisal” (PAV22)	145
Figura 4.78	Porosidade e permeabilidade do compósito de <i>Eucalyptus grandis</i> : (a) variação da porosidade; (b) variação da permeabilidade	146
Figura 4.79	Porosidade e permeabilidade do compósito de <i>Pinus caribaea</i> : (a) variação da porosidade; (b) variação da permeabilidade	147
Figura 4.80	Porosidade e permeabilidade do compósito de Casca de arroz: (a) variação da porosidade; (b) variação da permeabilidade	148
Figura 4.81	Porosidade e permeabilidade do compósito de <i>Agave sisalana</i> : (a) variação da porosidade; (b) variação da permeabilidade	149
Figura 4.82	Condutividade térmica do compósito de <i>Eucalyptus grandis</i>	151
Figura 4.83	Condutividade térmica do compósito de <i>Pinus caribaea</i>	151
Figura 4.84	Condutividade térmica do compósito de Casca de arroz	152
Figura 4.85	Condutividade térmica do compósito de <i>Agave sisalana</i>	152
Figura 4.86	Micrografia da pasta de cimento (PC), idade de 28 dias: (a) ampliação 700 x; (b) produtos da hidratação (C-S-H, C-H, agulhas de etringita) ampliação 2000 x	153

Figura 4.87	Micrografia da pasta de cimento com areia lavada (PCA), idade de 28 dias: (a) ampliação 200 x; (b) produtos da hidratação ampliação 2500 x .	154
Figura 4.88	Micrografia da pasta de cimento com 5% de SBR (PCS), idade de 28 dias: (a) ampliação 250 x; (b) ampliação 2500 x mostra produtos da hidratação impregnados	154
Figura 4.89	Micrografia da pasta de cimento com 5% de PAV22 (PCP), idade de 28 dias: (a) ampliação 500 x; (b) ampliação 2000 x mostra produtos da hidratação impregnados	155
Figura 4.90	Micrografia (MEV) com ampliação de 500 x das partículas de <i>Eucalyptus grandis</i> : (a) partículas sem adição de polímero e (b) partículas com adição de SBR	155
Figura 4.91	Micrografia (MEV) com ampliação de 500 x das partículas de <i>Pinus caribaea</i> : (a) partículas sem adição de polímero e (b) partículas com adição de SBR	156
Figura 4.92	Micrografia (MEV) com ampliação de 500 x das partículas de Casca de arroz: (a) partículas sem adição de polímero e (b) partículas com adição de SBR	156
Figura 4.93	Micrografia (MEV) com ampliação de 220 x das partículas de <i>Agave sisalana</i> : (a) partículas sem adição de polímero e (b) partículas com adição de SBR	157
Figura 4.94	Micrografia (MEV) do compósito de <i>Eucalyptus grandis</i> sem adição de polímeros na idade de 133 dias: (a) ampliação de 200 x e (b) ampliação de 1200 x	157
Figura 4.95	Micrografia (MEV) do compósito de <i>Eucalyptus grandis</i> com adição de SBR na idade de 133 dias: (a) ampliação de 220 x e (b) ampliação de 2500 x	158
Figura 4.96	Micrografia (MEV) do compósito de <i>Eucalyptus grandis</i> com adição de PAV22 na idade de 138 dias: (a) ampliação de 220 x e (b) ampliação de 2500 x	158
Figura 4.97	Micrografia (MEV) do compósito de <i>Pinus caribaea</i> sem adição de polímeros na idade de 56 dias: (a) ampliação de 220 x e (b) ampliação de 2000 x	158
Figura 4.98	Micrografia (MEV) do compósito de <i>Pinus caribaea</i> com adição de SBR, na idade de 56 dias: (a) ampliação de 220 x;(b) ampliação de 500 x	158

Figura 4.99	Micrografia (MEV) do compósito de <i>Pinus caribaea</i> com adição de PAV22, na idade de 56 dias: (a) ampliação de 220 x e (b) ampliação de 500 x	160
Figura 4.100	Micrografia (MEV) do compósito de Casca de arroz sem adições, na idade de 60 dias: (a) ampliação de 200 x e (b) ampliação de 1000 x	160
Figura 4.101	Micrografia (MEV) do compósito de Casca de arroz com adição de SBR, na idade de 60 dias: (a) ampliação de 200 x e (b) ampliação de 1000 x ...	161
Figura 4.102	Micrografia (MEV) do compósito de Casca de arroz com adição de PAV22, na idade de 60 dias: (a) ampliação de 150 x e (b) ampliação de 200 x	161
Figura 4.103	Micrografia (MEV) do compósito de <i>Agave sisalana</i> (sisal) sem adições, na idade de 70 dias: (a) ampliação de 250 x e (b) ampliação de 2500 x ...	162
Figura 4.104	Micrografia (MEV) do compósito de <i>Agave sisalana</i> (sisal) com adição de SBR, na idade de 70 dias: (a) ampliação de 250 x e (b) ampliação de 2000 x	162
Figura 4.105	Micrografia (MEV) do compósito de <i>Agave sisalana</i> (sisal) com adição de PAV22, na idade de 70 dias: (a) ampliação de 200 x e (b) ampliação de 2000 x	163
Figura 4.106	Esquema de medição da VPU na direção longitudinal do bloco	168
Figura 4.107	VPU longitudinal do bloco de <i>Eucalyptus grandis</i>	168
Figura 4.108	VPU longitudinal do bloco de <i>Pinus caribaea</i>	169
Figura 4.109	VPU longitudinal do bloco de casca de arroz	169
Figura 4.110	VPU longitudinal do bloco de <i>Agave sisalana</i>	170
Figura 4.111	Medição da VPU na direção transversal do bloco	171
Figura 4.112	VPU transversal do bloco de <i>Eucalyptus grandis</i>	171
Figura 4.113	VPU transversal do bloco de <i>Pinus caribaea</i>	172
Figura 4.114	VPU transversal do bloco de casca de arroz	172
Figura 4.115	VPU transversal do bloco de <i>Agave sisalana</i>	173
Figura 4.116	Medição da VPU na direção perpendicular do bloco	174
Figura 4.117	VPU perpendicular do bloco de <i>Eucalyptus grandis</i>	174

Figura 4.118	VPU perpendicular do bloco de <i>Pinus caribaea</i>	175
Figura 4.119	VPU perpendicular do bloco de casca de arroz	175
Figura 4.120	VPU perpendicular do bloco de <i>Agave sisalana</i>	176
Figura 4.121	Blocos vazados com os resíduos de <i>Eucalyptus grandis</i> : (a) blocos com umidade na parte inferior e (b) blocos sem umidade	177
Figura 4.122	Blocos vazados com os resíduos de <i>Pinus caribaea</i> : (a) blocos com umidade na parte inferior e (b) blocos sem umidade	177
Figura 4.123	Blocos vazados com os resíduos de Casca de arroz (a) e de <i>Agave sisalana</i> (b)	178
Figura 4.124	Blocos vazados (9x19x39 cm) de casca de arroz, sisal, <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>Pinus caribaea</i>	178

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Classes de compatibilidade para as misturas de madeira-cimento	19
Tabela 2.2	Estrutura química dos principais látex de polímeros das misturas	32
Tabela 3.1	Composição dos tipos de cimento utilizados de acordo com a ABNT	59
Tabela 3.2	Características físicas do cimento utilizado (CPV-ARI)	59
Tabela 3.3	Propriedades do polímero SBR (estireno e butadieno)	60
Tabela 3.4	Propriedades do polímero PAV 22 (acetato e versatato de vinila)	61
Tabela 3.5	Modificação dos traços em massa (cimento: resíduo: água)	66
Tabela 3.6	Teores em massa dos componentes para cada compósito à base de resíduos	67
Tabela 4.1	Distribuição em tamanho de partículas dos resíduos vegetais	92
Tabela 4.2	Distribuição granulométrica dos agregados minerais	93
Tabela 4.3	Massa unitária no estado seco e solto dos resíduos vegetais (NBR-7251) ..	94
Tabela 4.4	Massa unitária no estado seco e solto dos agregados minerais (NBR-7251)	94
Tabela 4.5	Grau de compatibilidade das misturas baseado na temperatura máxima (CPII-E)	106
Tabela 4.6	Grau de compatibilidade das misturas baseado na temperatura máxima (CPIII)	107
Tabela 4.7	Grau de compatibilidade das misturas baseado na temperatura máxima (CPV-ARI)	108
Tabela 4.8	Intervalos dos limites máximos e mínimos de classificação do índice de inibição	109
Tabela 4.9	Grau de compatibilidade das misturas baseado no índice de inibição (CPII-E)	110
Tabela 4.10	Grau de compatibilidade das misturas baseado no índice de inibição (CPIII)	111
Tabela 4.11	Grau de compatibilidade das misturas baseado no índice de inibição (CPV-ARI)	113

Tabela 4.12	Fator CA (razão entre as áreas abaixo da curva do calor) com o CPII-E	115
Tabela 4.13	Fator CA (razão entre as áreas abaixo da curva do calor) com o cimento CPIII	115
Tabela 4.14	Fator CA (razão entre as áreas abaixo da curva do calor) com o CPV-ARI	116
Tabela 4.15	Retenção de água do compósito de <i>Eucalyptus grandis</i> (SBR e PAV22) ...	118
Tabela 4.16	Retenção de água do compósito de <i>Pinus caribaea</i> (SBR e PAV22)	118
Tabela 4.17	Retenção de água do compósito de casca de arroz (SBR e PAV22)	119
Tabela 4.18	Retenção de água do compósito de <i>Agave sisalana</i> “sisal” (SBR e PAV22)	119
Tabela 4.19	Velocidade do pulso ultra-sônico do <i>Eucalyptus grandis</i> (SBR)	120
Tabela 4.20	Velocidade do pulso ultra-sônico do <i>Eucalyptus grandis</i> (PAV22)	121
Tabela 4.21	Velocidade do pulso ultra-sônico do <i>Pinus caribaea</i> (SBR)	121
Tabela 4.22	Velocidade do pulso ultra-sônico do <i>Pinus caribaea</i> (PAV22)	122
Tabela 4.23	Velocidade do pulso ultra-sônico da Casca de arroz (SBR)	122
Tabela 4.24	Velocidade do pulso ultra-sônico da Casca de arroz (PAV22)	123
Tabela 4.25	Velocidade do pulso ultra-sônico do <i>Agave sisalana</i> “sisal” (SBR)	123
Tabela 4.26	Velocidade do pulso ultra-sônico do <i>Agave sisalana</i> (PAV22)	144
Tabela 4.27	Resistência à compressão (7 dias) do compósito de <i>Eucalyptus grandis</i>	125
Tabela 4.28	Resistência à compressão (7 dias) do compósito de <i>Pinus caribaea</i>	125
Tabela 4.29	Resistência à compressão (7 dias) do compósito de Casca de arroz	126
Tabela 4.30	Resistência à compressão (7 dias) do compósito de <i>Agave sisalana</i> (sisal)	126
Tabela 4.31	Absorção de água por capilaridade do <i>Eucalyptus grandis</i> (SBR)	130
Tabela 4.32	Absorção de água por capilaridade do compósito de <i>Eucalyptus grandis</i> (PAV22)	131
Tabela 4.33	Absorção de água por capilaridade do compósito de <i>Pinus caribaea</i> (SBR)	132

Tabela 4.34	Absorção de água por capilaridade do compósito de <i>Pinus caribaea</i> (PAV22)	133
Tabela 4.35	Absorção de água por capilaridade do compósito de Casca de arroz (SBR)	134
Tabela 4.36	Absorção de água por capilaridade do compósito de Casca de arroz (PAV22)	135
Tabela 4.37	Absorção de água por capilaridade do compósito de <i>Agave sisalana</i> (SBR)	136
Tabela 4.38	Absorção de água por capilaridade do compósito de <i>Agave sisalana</i> (PAV22)	137
Tabela 4.39	Densidade de massa aparente do compósito de <i>Eucalyptus grandis</i> (SBR)	139
Tabela 4.40	Densidade de massa aparente do compósito <i>Eucalyptus grandis</i> (PAV22)..	139
Tabela 4.41	Densidade de massa aparente do compósito de <i>Pinus caribaea</i> (SBR)	140
Tabela 4.42	Densidade de massa aparente do compósito de <i>Pinus caribaea</i> (PAV22) ..	141
Tabela 4.43	Densidade de massa aparente do compósito de Casca de arroz (SBR)	142
Tabela 4.44	Densidade de massa aparente do compósito de Casca de arroz (PAV22) ..	143
Tabela 4.45	Densidade de massa aparente do compósito de <i>Agave sisalana</i> (SBR)	144
Tabela 4.46	Densidade de massa aparente do compósito de <i>Agave sisalana</i> (PAV22) ..	144
Tabela 4.47	Porosidade e permeabilidade do compósito de <i>Eucalyptus grandis</i>	146
Tabela 4.48	Porosidade e permeabilidade do compósito de <i>Pinus caribaea</i>	147
Tabela 4.49	Porosidade e permeabilidade do compósito de Casca de arroz	148
Tabela 4.50	Porosidade e permeabilidade do compósito <i>Agave sisalana</i>	149
Tabela 4.51	Condutividade térmica do compósito de <i>Eucalyptus grandis</i>	151
Tabela 4.52	Condutividade térmica do compósito de <i>Pinus caribaea</i>	151
Tabela 4.53	Condutividade térmica do compósito de Casca de arroz	152
Tabela 4.54	Condutividade térmica do compósito de <i>Agave sisalana</i>	152
Tabela 4.55	Resistência à compressão aos 28 dias dos blocos de <i>Eucalyptus grandis</i> ...	164
Tabela 4.56	Resistência à compressão aos 28 dias dos blocos de <i>Pinus caribaea</i>	164

Tabela 4.57	Resistência à compressão aos 28 dias dos blocos de Casca de arroz.	164
Tabela 4.58	Resistência à compressão aos 28 dias dos blocos de <i>Agave sisalana</i> (sisal)	165
Tabela 4.59	Absorção de água, teor de umidade e área líquida - <i>Eucalyptus grandis</i>	166
Tabela 4.60	Absorção de água, teor de umidade e área líquida - <i>Pinus caribaea</i>	166
Tabela 4.61	Absorção de água, teor de umidade e área líquida - Casca de arroz	167
Tabela 4.62	Absorção de água, teor de umidade e área líquida - <i>Agave sisalana</i> (sisal)	167
Tabela 4.63	VPU longitudinal do compósito de <i>Eucalyptus grandis</i>	168
Tabela 4.64	VPU longitudinal do bloco de <i>Pinus caribaea</i>	169
Tabela 4.65	VPU longitudinal do bloco de casca de arroz	169
Tabela 4.66	VPU longitudinal do bloco de <i>Agave sisalana</i>	170
Tabela 4.67	VPU transversal do bloco de <i>Eucalyptus grandis</i>	171
Tabela 4.68	VPU transversal do bloco de <i>Pinus caribaea</i>	172
Tabela 4.69	VPU transversal do bloco de casca de arroz	172
Tabela 4.70	VPU transversal do bloco de <i>Agave sisalana</i>	173
Tabela 4.71	VPU perpendicular do bloco de <i>Eucalyptus grandis</i>	174
Tabela 4.72	VPU perpendicular do bloco de <i>Pinus caribaea</i>	175
Tabela 4.73	VPU perpendicular do bloco de casca de arroz	175
Tabela 4.74	VPU perpendicular do bloco de <i>Agave sisalana</i>	176
Tabela 4.75	Tipos e teores de polímeros recomendados para serem utilizados nos compósitos à base de resíduos vegetais	181
Tabela 4.76	Traços e teores dos resíduos recomendados para utilização em blocos vazados sem função estrutural	183

RESUMO

A crescente preocupação com as questões ambientais e sociais justifica a utilização de resíduos vegetais na produção de componentes construtivos. Neste trabalho foram caracterizados os compósitos à base de resíduos vegetais e argamassa cimentícia modificada pela adição de polímeros para confecção de blocos vazados. As misturas foram compostas pelos resíduos provenientes das espécies: *Eucalyptus grandis*, *Pinus caribaea*, *Oriza sativa* (casca de arroz) e *Agave sisalana* (sisal); cimentos Portland dos tipos II, III e V; agregado miúdo mineral (areia lavada), pó de pedra; aditivo acelerador de pega cloreto de cálcio (CaCl_2); os polímeros estireno-butadieno (SBR) e acetato versatato (PAV22) e teor de água adequado às misturas. A avaliação da compatibilidade da mistura entre os resíduos vegetais e o cimento foi monitorada através da evolução do calor de hidratação. A caracterização do compósito foi baseada nos ensaios de argamassas de acordo com as normas da ANBT para determinar seu comportamento mecânico, trabalhabilidade e absorção de água por capilaridade. Ensaios não destrutivos (END) foram utilizados para monitorar o endurecimento dos compósitos no período de 28 dias. Para a caracterização final dos compósitos determinou-se a porosidade e a permeabilidade através da intrusão por expansão do gás nitrogênio, a condutividade térmica pelo método fluximétrico e a análise da microestrutura com a execução dos ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV). A caracterização dos blocos vazados foi feita com a determinação da resistência à compressão, a absorção de água, o teor de umidade e a área líquida. Os resultados de resistência e absorção indicaram que a utilização dos resíduos vegetais pode ser adequada ao atendimento às normas específicas para os blocos vazados de vedação. Com a aquisição das micrografias verificou-se a ação de impregnação do polímero nos resíduos vegetais e nos produtos de hidratação, evidenciando a formação de uma película polimérica, contribuindo para a impermeabilização do compósito.

Palavras Chave: compósitos, resíduos vegetais, cimento, polímeros, porosidade, END, MEV.

ABSTRACT

A growing concern about environmental and social subject justified the use of the vegetables wastes in the manufacture constructive elements. This study investigated the vegetable waste composite with polymer-modified cement to manufacture hollow blocks. Several mixtures were composed of Portland cement types II, III and V, treated vegetable residue, from four species: *Eucalyptus grandis*, *Pinus caribaea*, *Oriza sativa* (rice husk) and *Agave sisalana* (sisal); small aggregate (washed sand), stone powder, latex type polymer styrene-butadiene rubber (SBR), acetate-vinyl versatato (PAV22), CaCl_2 additive and an adequate water ratio for the mixtures. The evaluation of compatibility between vegetable wastes and Portland cement was done by methodology of the evolution heat hydration. The composite was characterized based on mortar tests carried out according to ABNT standards to determine its mechanical behavior, workability and water absorption by capillarity. Non destructive tests (NDT) were utilized to evaluate the hardening of the composites during the first 28 aging days. The final characterization utilized a methodology to determinate porosity and permeability by nitrogen gas intrusion, thermal conductivity and scanning electron microscopy (SEM) to evaluate the composites microstructures. The characterization of the hollow blocks consisted in the determination of compressive strength, water absorption, humidity ratio and liquid area. The results of compressive strength and water absorption showed that the vegetables wastes can be adequate to manufacture hollow blocks, according to the normalization tests to blocks without structural function. The micrographics from SEM presented the impregnation polymer over the vegetable wastes and hydration products, with a polymeric film formed, contributing to the impermeability of the composites.

Keywords: composites, vegetable wastes, cement, polymers, porosity, NDT, SEM.

1. INTRODUÇÃO

As atividades agroindustriais implantadas em várias regiões do Brasil geram grandes quantidades de resíduos que, na maioria das vezes, não agregam nenhum valor comercial ao produto final e não possuem destino apropriado para seu descarte, sem que haja prejuízo ao meio ambiente. Esses resíduos podem converter-se em matéria-prima com possibilidades de aproveitamento na confecção de elementos direcionados à construção civil e a partir da utilização de tecnologias desenvolvidas pelas instituições de pesquisa. Os resíduos utilizados neste trabalho são provenientes da produção agrícola de determinadas regiões do Brasil. Estas regiões, de uma forma indireta, são responsáveis pela movimentação de mão-de-obra, investimentos, implantações de moradias e todo um complexo comercial constituindo-se em um pólo de desenvolvimento sócio-econômico. Potencialmente, podem transformar-se em grandes fabricantes de produtos à base de resíduos vegetais, com amplas possibilidades de aplicação em edificações residenciais, estabelecimentos comerciais, instalações industriais e rurais. Basta, para isso, somente que busquem parcerias com as instituições de pesquisa no país, que já contam, atualmente, com inúmeros projetos e trabalhos publicados relacionados ao tema em questão. Este trabalho de pesquisa buscou, sob a ótica científica, a aplicação prática de um material confeccionado com resíduos vegetais, com o propósito de fabricar elementos construtivos. Os resíduos foram caracterizados considerando-se sua incompatibilidade com o cimento Portland, com a análise da evolução do calor de hidratação, visto que o desempenho desses compósitos depende, principalmente, do endurecimento rápido da matriz cimentícia. Nesta etapa, utilizou-se também a adição de polímero com intuito de avaliar sua influência durante o período de endurecimento. Os compósitos foram monitorados também durante esse período através da técnica de medição da propagação da velocidade do pulso ultra-sônico (VPU). A caracterização desses compósitos se deu com a determinação dos ensaios mecânicos; absorção de água por capilaridade; porosidade, permeabilidade; condutividade térmica e análise da microestrutura pela microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os

elementos construtivos confeccionados após a caracterização inicial foram os blocos vazados, caracterizados através de ensaios específicos de acordo com as normas da ABNT para blocos vazados sem função estrutural.

1.1 OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho foi a caracterização de compósitos cimentícios à base de resíduos vegetais e a possibilidade da criação de uma estrutura técnica para a fabricação de materiais inovadores para a indústria da construção civil, com utilização da reciclagem de resíduos agroindustriais, proporcionando a obtenção de matérias-primas acessíveis e renováveis. Com a utilização dos polímeros modificando a matriz e com capacidade de impermeabilização da mistura, espera-se melhorar a permeabilidade desses compósitos, protegendo os resíduos contra a agressão através da penetração de umidade. A partir da metodologia proposta e dos resultados a serem obtidos, pretende-se obter elementos construtivos com possibilidades de utilização em construções populares. Ao mesmo tempo, propõe-se o aproveitamento dos resíduos em compósitos à base de cimento, adequando suas propriedades em função das condições de serviço propostas, de acordo com as normas da ABNT para a fabricação de blocos vazados sem função estrutural.

1.2 JUSTIFICATIVA

O território brasileiro situa-se em uma região tropical, com altas taxas de luminosidade e temperaturas médias anuais. Associada à disponibilidade hídrica e à regularidade de chuvas, torna-se o país com maior potencial para produção de matéria-prima renovável. O Brasil possui a maior área de plantação de eucalipto do mundo, de acordo o Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais, representando milhões de hectares e produzindo 40 m³/ha/ano de madeira. De acordo com informações da Assessoria Geral de Comunicação Social do Governo do Estado da Bahia, o Brasil foi o maior produtor mundial de sisal em 2005, com uma fatia de 40% do mercado. As possibilidades de substituir o amianto, na construção civil, é uma alternativa que desperta o interesse dos empresários internacionais. Segundo informações da Embrapa, a demanda atual de madeira de Pinus no Brasil que é de 40 milhões m³/ano, deverá

crescer para 78 milhões no ano 2020. Segundo o IBGE, em 2003 os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina a produção de arroz em casca situou-se acima de 700 mil t/ano. Com isso posto, esse grande potencial de produção agrícola existente em nosso país propicia, também, a formação de grandes quantidades de resíduos que ainda não são reaproveitados de modo adequado. Usualmente são utilizados como matéria-prima combustível, sobretudo para a secagem de grão.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fibras vegetais

De acordo com Guimarães (1990), a primeira experiência no Brasil com utilização de compósitos cimentícios à base de fibras vegetais foi realizada no CEPED (Bahia), a partir de 1980. O objetivo do projeto era encontrar um material barato, para produção de componentes destinados à construção de moradias, obtido através de um processo simples e que pudesse ser facilmente assimilado pelos usuários. Isto implicou na escolha de materiais naturais abundantes, como é o caso das fibras vegetais disponíveis em larga escala no nordeste do Brasil. As fibras naturais escolhidas foram aquelas provenientes do bambu (*Bambusa vulgaris*), sisal (*Agave sisalana*), coco (*Cocos nucifera L.*), piaçaba (*Attalea funifera*), bagaço da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum L.*), sendo as mesmas caracterizadas por meio da determinação das seguintes propriedades: resistência à tração, módulo de elasticidade, ruptura por alongamento, densidade de massa e absorção de água. Segundo afirmou Swamy (1990), o uso de fibras naturais em matriz cimentícia representa um especial desafio à ciência e à tecnologia. Sua utilização possibilita a conservação da energia, dos recursos existentes e do meio ambiente, minimizando os problemas de resíduos e fortalecendo a infra-estrutura de um país. As deficiências inerentes às fibras, tais como, o baixo módulo de elasticidade, a falta de aderência adequada na interface, além de sua limitada estabilidade em longo prazo, podem ser superadas através de estudos microestruturais e micromecânicos, porém, é o seu desempenho em longo prazo que necessita ser assegurado. Os compósitos cimentícios à base de fibras naturais podem contribuir, significativamente, para a melhoria da qualidade da vida da população. Embora as fibras naturais existam em abundância e estejam prontamente disponíveis a baixo custo, existem algumas desvantagens tais como sua elevada absorção de água, a suscetibilidade ao ataque de fungos e insetos, a baixa durabilidade em ambiente alcalino e a grande variação das propriedades entre fibras de mesma espécie. Conseqüentemente, não é surpresa alguma que as fibras naturais não representem sempre a

primeira escolha dentre as várias opções para serem utilizadas como reforço em matrizes cimentícias, apesar do interesse difundido, dos numerosos esforços de pesquisa e de muitas aplicações experimentais. As fibras podem ser provenientes da folha, dos ramos ou da própria madeira, sendo o diâmetro e o comprimento da fibra dependentes da idade da planta. O tamanho do lúmen central muda com a idade e o lúmen pode algumas vezes colapsar, alterando a área de seção transversal para um dado tipo de fibra. Os efeitos destrutivos da solução alcalina nos poros das fibras orgânicas também são bem conhecidos. O efeito dos processos de degradação química é equivalente ao tempo pelos quais as fibras deixam de contribuir como reforço no compósito cimentício. Em curto prazo as fibras conferem coesão e trabalhabilidade à matriz cimentícia, auxiliando na retração plástica do compósito e na diminuição das fissuras iniciais de retração por secagem. Em longo prazo, a capacidade de reforço entre a matriz e a fibra somente pode ser assegurada através de meticulosos procedimentos de projeto calculados para propiciar o aumento da estabilidade da fibra na matriz cimentícia. Muitas fibras contêm hemicelulose, amido, açúcares, taninos, determinados fenóis e lignina, e todos são conhecidos como inibidores da pega do cimento e do desenvolvimento das propriedades de resistência da matriz cimentícia. Além do aumento do tempo de manipulação, os extrativos solúveis em água impedem, também, que o compósito alcance suas características teóricas de resistência e durabilidade. A decomposição da fibra é muito mais rápida em meio alcalino do que na água; a taxa e o grau de decomposição dependem da natureza da fibra. O grau de polimerização, a posição ou a acessibilidade da hemicelulose e da lignina, ambas, influenciam negativamente no tempo de pega e no desenvolvimento da resistência, e estes fatores precisam ser controlados. Na prática, tanto o tempo de pega como as perdas de resistência podem ser controladas por meio da baixa relação água/cimento (A/C), sendo que um aditivo acelerador de pega pode auxiliar no aumento da resistência. Por outro lado, existe também uma evidência de que as fibras naturais permanecem, praticamente, intactas em concreto carbonatado. Atualmente, diversos métodos estão disponíveis para fornecer impermeabilização e para aumentar a resistência à deterioração. Entretanto, a proteção por impregnação das fibras por meio de tratamentos químicos preventivos foi incapaz de impedir a completa decomposição química dos componentes da fibra, resultando em um empobrecimento das propriedades do compósito devido à diminuição da resistência à tração da fibra e dos efeitos sobre as propriedades das ligações interfaciais entre a fibra e a matriz cimentícia. Provavelmente, quando surgirem

pesquisas adicionais que desenvolvam outros métodos de proteção que sejam simples, eficazes e econômicos, é muito improvável que tais métodos resultem em tecnologias disponíveis, e a um custo aceitável, para os países em desenvolvimento. Em razão do enfraquecimento da fibra ser causado, inicialmente, pela elevada alcalinidade do cimento, a solução para se evitar a deterioração da fibra natural se encontra na própria matriz cimentícia. Existem várias técnicas simples, prontamente disponíveis, para se reduzir a alcalinidade da matriz cimentícia. As adições do cimento, tais como a cinza volante, as escórias granuladas de alto forno e a sílica ativa, representam as melhores opções para se reduzir a alcalinidade do cimento, em níveis suficientemente baixos, possibilitando que as fibras contribuam por muito mais tempo para a resistência do compósito. A sílica ativa é uma pozolana altamente reativa, podendo ser muito eficaz quando comparada à cinza volante e à escória, embora possa ser relativamente mais cara. As adições minerais possibilitam a produção de compósitos cimentícios estáveis e duráveis fornecendo quatro princípios básicos: baixa relação água/cimento, utilização de superplastificantes, vários períodos de cura e desenvolvimento da resistência nas primeiras idades.

Savastano et al. (1997) reportaram a realização de visitas técnicas, no período de janeiro a agosto de 1997, para análise do processo de cultivo, extração, beneficiamento e industrialização de fibras vegetais, tendo em vista a respectiva identificação dos resíduos gerados. Algumas fibras se destacaram neste panorama em potencial, a citar:

- **Sisal:** a estimativa da produção brasileira, para 1996, foi de 169 mil toneladas (FAO, 1996). Os resíduos mais abundantes acontecem no desfibramento, pois de cada tonelada de fibra verde a ser comercializada, originam-se três toneladas de bucha, assim chamada a fibra de menor comprimento, que se concentra na base da folha do sisal. Esse resíduo, praticamente sem uso nas regiões visitadas, encontrava-se disperso nas pequenas unidades de produção, a maior parte delas culturas correspondendo às áreas entre 30 ha e 100 ha. Além disso, na obtenção da fibra requer-se a separação do bagaço (mucilagem), este último rico em substâncias aquosas, que consiste em opção viável para alimentação animal nos períodos de estiagem. A produção de tapetes, um nicho de mercado promissor para o sisal brasileiro, também é fonte de resíduos sem qualquer valor comercial e com grande potencialidade de aproveitamento (APAEB).

- **Piaçava:** alguns dados da região agrícola de Valença em 1996, indicaram produção mormente extrativa de 3,3 mil toneladas, com 140 unidades produtivas, apresentando produtividade média de 480 kg de fibra bruta/(ha.ano). Na fase de limpeza e penteamento da fibra, cerca de 30% de refugo, atualmente queimado ao ar livre, pode ser aproveitado, desde que separado da palha. Outro resíduo de fácil aproveitamento advém das fábricas de vassouras, onde se descarta grande parte das fibras com menos de 50 cm de comprimento.
- **Coco:** a agroindústria brasileira dessa fibra, com produção de artigos têxteis superior a 5,4 mil toneladas em 1995, pode originar fibras de 1 cm a 3 cm (comprimento ideal para distribuição homogênea em matrizes cimentícias) sendo atualmente pouco direcionadas a outras aplicações. É notória a ociosidade da capacidade instalada para produção de fibras, com fábricas sem funcionamento ou trabalhando com menos da metade de seu potencial produtivo. Além disso, características microestruturais justificam a superioridade da fibra de coco, no que se refere à durabilidade em meios alcalinos.
- **Algodão e polpa de celulose de eucalipto:** as fibras residuais são bastante curtas (comprimento inferior a 5 mm), o que as direciona para reforço de pastas. Além disso, são disponíveis a preços relativamente baixos e produzidas de forma concentrada geograficamente, junto aos centros geradores.
- **Rami:** os resíduos de amaciamento, apesar de não apresentarem valor comercial, são utilizados como adubo orgânico nas próprias lavouras de produção. Assim, o aproveitamento dessa fibra deverá ser acompanhado de reformulação das práticas de cultivo. Por outro lado, a agroindústria do *rami* carece de utilizações alternativas para seus produtos e subprodutos, haja vista a grande concorrência de fibras naturais importadas e sintéticas.
- **Banana:** conforme reportado por Nolasco (1997), o potencial produtivo de fibras de excelente qualidade é muito alto e as regiões geradoras estão relativamente próximas de grandes centros populacionais, no sul e sudeste do país. No entanto, atualmente a fibra ainda é extraída do pseudocaule, em escala comercial, o que indica que sua utilização, para reforço de componentes construtivos, sendo viável apenas em médio prazo.
- **Malva:** a produção brasileira, segundo estimativa de técnicos do Instituto de Fomento à Produção de Fibras Vegetais da Amazônia (Ifibram), varia atualmente entre 6000 t/ano e 8000 t/ano, sendo quase exclusivamente oriunda dos estados do Pará e Amazonas. Diversos

subprodutos apresentam potencialidade de emprego na construção civil, em decorrência de dificuldades sofridas pelas indústrias têxteis do setor, frente aos produtos sintéticos.

Em conformidade com Savastano e Agopyan (1998), as características macroscópicas de maior interesse, no estudo das fibras, são aquelas inter-relacionadas com o comportamento dos compósitos resultantes. Assim, costumam ser de interesse as seguintes propriedades físicas e mecânicas das fibras vegetais de acordo com Sosa Griffin (citado por SAVASTANO e AGOPYAN, 1988):

- **Dimensões:** a relação entre comprimento e diâmetro das fibras é fator determinante na transferência de esforços para a matriz. Outro ponto interessante é a seção transversal irregular das fibras vegetais, bem como seu aspecto fibrilado (estrias na direção longitudinal), que exercem influência positiva na ancoragem dessas fibras, junto a matrizes frágeis.
- **Volume de vazios e absorção de água:** em razão da grande porcentagem volumétrica de vazios permeáveis, a absorção é muito alta já nos primeiros instantes de imersão em água. Como consequência direta, advém interferência negativa na relação água/aglomerante da matriz, prejudicada pelo intumescimento e posterior retração da fibra. Por outro lado, o elevado volume de vazios contribui para tornar o compósito mais leve, propiciando maior absorção acústica e menor condutibilidade térmica dos componentes obtidos.
- **Resistência à tração:** semelhante em média à das fibras de polipropileno.
- **Módulo de elasticidade:** as fibras vegetais classificam-se como sendo de baixo módulo de elasticidade, se comparadas às matrizes cimentícias (módulo entre 20 GPa e 30 GPa), fator determinante para seu emprego em componentes construtivos que trabalhem no estágio pós-fissurado, devido à elevada absorção de energia, além da resistência a esforços dinâmicos.

Algumas fibras podem ser mais adequadas considerando-se suas propriedades físicas e mecânicas, suas possibilidades de cultivo no Brasil, seu custo e sua durabilidade no ambiente natural. Por se tratar de produto natural, as características das fibras apresentam grande variabilidade, com coeficientes de variação freqüentemente superiores a 50%.

Amico et al. (2001) afirmaram que no Brasil algumas iniciativas pioneiras têm incentivado a utilização de fibras vegetais, principalmente na indústria automobilística e na de utilidades

domésticas, embora, a construção civil seja um setor com enorme potencial para a difusão desses compósitos. O sisal, que é uma fibra extraída de folhas, apresenta estabilidade térmica limitada já que as fibras vegetais são suscetíveis ao desenvolvimento de reações de degradação se expostas a altas temperaturas, embora sejam menos danificadas do que as fibras de carbono ou de vidro durante os processos de mistura. Além disso, já que o teor de lignina e de celulose varia com a idade da planta, entre outros fatores, as fibras podem apresentar diferentes propriedades, além de diâmetro variável até em um mesmo lote. Dependendo do tipo de extração (mecânica ou química), o sisal pode apresentar diferentes características, além de ser suscetível ao ataque microbiológico se não for protegido por aditivos.

2.1.1 Disponibilidade e potencial de utilização dos resíduos vegetais no Brasil

De acordo com parecer do Ministério do Meio Ambiente, o Brasil é conhecido por suas proporções continentais, uma enorme variedade climática, um gigantesco patrimônio ambiental e a maior diversidade biológica do planeta. À medida que se consolidam demandas direcionadas ao resgate da enorme dívida social existente em nosso país, cresce proporcionalmente a pressão sobre a utilização dos recursos naturais disponíveis, implicando na expansão da fronteira agrícola. Desse modo, deve-se garantir que a utilização dos recursos naturais seja feita em conformidade com um desenvolvimento sustentável.

Baseado nas afirmações dos técnicos Marcio Augusto Rabelo Nahuz e Rubens Dias Humphreys, do Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, as riquezas e a diversidade das florestas, em particular a tropical, ainda estão por ser descobertas. Com base no estado da arte, porém, há quem afirme que os recursos disponíveis nas florestas permitem a confecção de quase três mil produtos, boa parte deles têm a madeira como sua matéria-prima predominante. A supressão de grandes proporções da cobertura vegetal no Brasil, ocorrida principalmente no século passado, acabou comprometendo as funções essenciais que a floresta desempenha no meio ambiente. Agora a sociedade passa a exigir de forma crescente a certificação da origem da matéria-prima nos produtos consumidos, assim como a preservação de parcelas que assegurem as condições para a existência da vida.

O aproveitamento dos recursos vegetais existentes pode representar uma fonte promissora de exploração industrial, principalmente, no que se relaciona à utilização dos seus resíduos. De acordo com Quirino (2002), os resíduos se constituem de sobra de um processo de produção ou exploração, de transformação ou de utilização. Os resíduos ligno-celulósicos são assim chamados porque contêm na sua constituição lignina e celulose sendo, em sua maior parte, de origem vegetal. Como exemplo podem ser citados todos os rejeitos oriundos da madeira ou das indústrias madeireiras, até mesmo móveis velhos, restos em madeira de demolições, resíduos de culturas agrícolas ou de beneficiamento de produtos agrícolas, postes, estacas, dormentes e embalagens em fim de vida etc. A exploração florestal é uma grande fonte de resíduos ligno-celulósicos, até mesmo no lixo urbano pode ser encontrada uma porcentagem significativa de resíduos ligno-celulósicos proveniente de utensílios e de embalagens em madeira. Um resíduo ligno-celulósico pode ser reciclado, e reutilizado como matéria prima em um processo diferente daquele de origem. Como exemplo, pode ser transformado em partículas, constituindo-se em matéria-prima para a produção de painéis à base de madeira. Pode ser também utilizado energeticamente na produção de calor, de vapor ou de eletricidade em grupos geradores ou termelétricos. Outro aproveitamento desse resíduo é sob a forma de combustível sólido, como o carvão vegetal.

Um resíduo não pode ser eliminado por incineração, neutralizado quimicamente, descartado ou estocado subterraneamente, sem que sua reciclagem ou valorização possa ser feita a um custo economicamente aceitável, constituindo-se tal diretiva em uma norma da Comunidade Européia a ser adotada por outros países. Um resíduo deve ser descartado ou estocado subterraneamente quando as outras demais formas de aproveitamento não possam ser empregadas. A melhor alternativa para uma gestão adequada dos resíduos é se trabalhar na sua origem, utilizando-se tecnologias limpas, buscando sua valorização e lutando contra o desperdício e só utilizando a estocagem como última opção. Desse modo, ter o conceito de resíduo final é extremamente importante, ou seja, resíduo final é aquele para o qual não se dispõe de mais nenhuma opção técnica e economicamente viável para seu aproveitamento. A gestão dos resíduos envolve fases ou etapas diferentes e ao mesmo tempo básicas, iniciando-se pelo estudo e pela caracterização precisa da definição da sua origem e do fluxo dos produtos.

2.1.2 Panorama das fibras de Eucalipto, Sisal, Pinus e casca de arroz.

- ***Eucalipto***

Segundo informações do Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, atualmente as plantações de eucalipto no Brasil estão entre os ecossistemas mais produtivos no mundo, cobrindo milhões de hectares e produzindo usualmente mais de 40 m³/ha/ano de madeira. Segundo informações de Ferreira (2004), o eucalipto pertence ao gênero de arbustos ou árvores de grande porte, da família das Mirtáceas, de folhas coriáceas, lanceoladas, resinosas, flores pequenas e geralmente grupadas em umbelas. O fruto é uma cápsula com muitas sementes de tegumento externo escuro, lisa e fina. Fornecem madeira de alburno delgado, claro, de cerne cuja cor vai do amarelo ao pardo, pardo-avermelhado, de variada densidade, e com depósitos de goma, e as folhas têm propriedades medicinais. Encerra cerca de 450 espécies, entre elas a espécie *Eucalyptus grandis*, que tem sido predominante nos reflorestamentos.

- ***Agave sisalana perrine*** (Sisal)

O sisal (*Agave sisalana*) é uma monocotiledônea originária do México, com folhas estreitas e compridas, medindo de 10 cm a 15 cm de largura e 120 cm a 160 cm de comprimento, de cor verde lustrosa e terminando por um espinho cinzento e escuro. De acordo com as informações da Assessoria Geral de Comunicação Social do Governo do Estado da Bahia, o sisal produz fibras resistentes, usadas para a confecção de barbantes, cordas, tapetes, artesanatos etc. É cultivado em regiões semi-áridas de países subdesenvolvidos e países em desenvolvimento que apresentam grande desigualdade social, como é o caso do Brasil. Devido a sua adaptação a regiões muito secas, com solos rasos, pedregosos e chuvas escassas, apresenta grande ocorrência nos sertões do nordeste brasileiro. O beneficiamento do sisal se processa em três etapas: desfibramento, lavagem/secagem e a limpeza da fibra. Em algumas regiões do estado da Paraíba, devido à falta de água, a fibra não é submetida ao processo de lavagem/secagem e limpeza, perdendo seu valor no momento da comercialização. O Brasil é o maior produtor mundial de sisal, exportando a maior parte da sua produção para a Europa e Estados Unidos. A partir dos anos 1960, com o início da produção das fibras sintéticas e à falta de crédito para a recuperação dos campos de sisal, o mercado entrou em declínio, aumentando a pobreza nas regiões produtoras.

- ***Pinus***

Segundo afirmou Pinto et al. (1979), o *Pinus*, compreendendo às variedades *hondurensis*, *bahamensis* e *caribaea*, dentre outros pinheiros tropicais, representa atualmente a espécie mais importante para a produção de madeira de coníferas em regiões tropicais. Desde a sua introdução em diversas regiões do Brasil, datada de 1958, revelou um bom comportamento florestal, e a partir disso, vem adquirindo crescente importância dentro dos programas de florestamento/reflorestamento devido ao seu rápido crescimento e à qualidade da madeira produzida, quando estabelecida em regiões ecologicamente apropriadas.

- ***Casca de arroz*** (proveniente da espécie *Oriza sativa*)

Segundo afirmou Souza (1993), no processamento industrial do arroz, as cascas correspondem a aproximadamente 20% da massa dos resíduos. Essas cascas, quando não são queimadas visando o aproveitamento energético, são deixadas no meio ambiente, criando problemas de estética, que se agravam quando são levadas pelo vento para outras áreas. As cascas de arroz têm baixa densidade, além de lenta biodegradação, permanecendo em sua forma original por longos períodos de tempo. Apresentam um alto poder energético, já que contêm quase 80% de sua massa em carbono. Suas cinzas são compostas basicamente de sílica e, portanto, bastante alcalinas. Tanto nas cascas de arroz como em suas cinzas, não existem compostos tóxicos. Entretanto, durante o processo de combustão e gaseificação, formam-se partículas de cinzas que contêm carbono: a fuligem.

2.2 Resíduos vegetais em compósitos cimentícios

De acordo com Krenchel (citado por HANNANT, 1978), as fibras de celulose podem ser utilizadas em compósitos à base de cimento em volumes na faixa de 15% a 20%, conferindo-lhes propriedades de resistência adequadas. Infelizmente, as fibras possuem a desvantagem de serem higroscópicas; suas dimensões variam de acordo com o teor de umidade, e as fibras deterioram quando são submetidas à umidade por longos períodos, além de não suportarem temperaturas acima de 100 °C a 120 °C.

O compósito obtido a partir de produtos à base de cimento e partículas de madeira tornou-se de interesse comercial nos anos 1930, com a fabricação de painéis leves cujo aglomerante era o cimento magnésiano (BERALDO, 1994).

Conforme afirmaram Beraldo e Arzolla (1999), são cada vez mais escassas as fontes naturais de agregados minerais utilizados na construção civil, sendo relativamente altos os custos finais envolvendo sua extração, produção e transporte. No caso da areia, além de ser um recurso não renovável, sua extração representa risco permanente ao meio ambiente, alterando o equilíbrio dos ecossistemas existentes. A substituição das fibras de asbesto e o reaproveitamento de resíduos vegetais utilizados na forma do Compósito Biomassa Vegetal-Cimento (CBVC), possibilitam sua utilização como material para a construção civil em função das suas diversas propriedades, tais como, a baixa massa específica, implicando em menores custos de estrutura e fundação; alta tenacidade, capacidade de suportar grandes deformações pós-fissuração, isolante termo-acústico e também baixo coeficiente de dilatação térmica.

O aproveitamento dos resíduos vegetais em compósitos cimentícios pode ser feito através da utilização da polpa das fibras, de acordo com o trabalho de Savastano et al. (2000). Resíduos das fibras de sisal e banana coletados nos campos de agricultura do Brasil possuem potencial para a produção de polpas químicas apropriadas para reforço em materiais à base de cimento. Comparado com materiais similares reforçados com pedaços de fibras vegetais retorcidas, o cimento reforçado com polpa vegetal apresentou um desempenho mecânico superior. A incorporação de 12% em massa de polpa de resíduos vegetais de espécies brasileiras na produção de compósitos cimentícios, proporciona a obtenção de valores de resistência à compressão referente aos 28 dias (MOR) de, aproximadamente, 20 Mpa, e energia de deformação na faixa de 1,0 kJ.m⁻² a 1,5 kJ.m⁻². As propriedades físicas estão de acordo com estudos similares produzidas com outras fibras naturais. Embora, as propriedades de resistência e tenacidade dos compósitos estudados tenham sido inferiores aos compósitos incorporados com as fibras de *Pinus radiata*, eles podem ser utilizados como materiais de construção para residências de baixo custo. Espera-se que essas propriedades de reforço possam ser alcançadas através da otimização do processamento e refinamento das fibras. Finalmente, algumas características favoráveis dos resíduos de *Eucalytus grandis* podem ser resumidas:

- Resíduos de fibras não comerciais avaliados em grandes quantidades próximas das maiores áreas urbanas do Brasil;
- Para as fibras, na forma de polpa, necessita-se de baixos requisitos de consumo de energia (somente para a desintegração em água quente);
- Matrizes cimentícias são facilmente dispersas, mesmo para teores de fibras relativamente altos;
- Desempenho aceitável como reforço de compósitos à base de cimento para aplicação em construções residenciais de baixo custo.

Segundo afirmaram Ramakrishna e Sundararajan (2005), atualmente existe um interesse sustentável na utilização das fibras naturais em compósitos cimentícios e em seus produtos manufaturados, com vistas a obter materiais alternativos para uso em edificações que sejam economicamente viáveis e energeticamente eficientes. Se a função das fibras naturais é a de conferir tenacidade e ductilidade ao compósito, considerando-se que a matriz cimentícia seja relativamente frágil e represente um meio altamente alcalino, deve-se, então, providenciar que seja garantida a durabilidade dessas fibras. Para que seja assegurada a durabilidade das fibras naturais, em matriz cimentícia, é necessário estudar as características das eventuais agressões às quais esses compósitos possam estar submetidos, a fim de compreender seu comportamento e avaliar seu desempenho frente a vários usos potenciais.

2.3 Características da mistura do cimento Portland com os resíduos vegetais

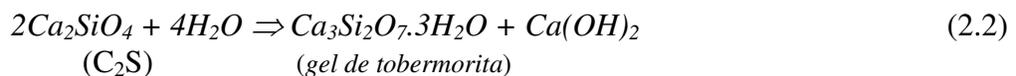
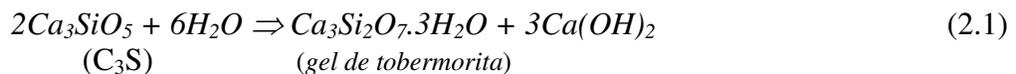
Na fase de mistura entre o cimento e os resíduos vegetais, correspondentes ao estado fresco do compósito, a situação é a mais crítica possível. Neste período ocorre o processo de hidratação do cimento e, por conseqüência, a formação dos produtos oriundos da sua reação que irão proporcionar ganho de resistência ao novo material. Em meio ao processo de formação do compósito os resíduos vegetais não se comportam apenas como matéria-prima inerte, mas influenciam diretamente no processo de hidratação, geralmente de forma negativa. Os extrativos presentes nos resíduos, em especial aqueles solúveis em água, retardam a pega e dificultam o endurecimento da mistura (MOSLEMI et al., 1983). Após o período de

endurecimento, esses compósitos estarão submetidos às solicitações de serviço e às condições ambientais, inerentes a cada aplicação proposta e, portanto, ficarão passíveis a eventuais deteriorações. Portanto, considerando-se o grande interesse no reaproveitamento dessas partículas naturais, é imprescindível que se avalie a questão da durabilidade desses compósitos, de forma criteriosa e ininterrupta. Desse modo, as características da mistura entre os resíduos vegetais e o cimento Portland dependem de alguns fatores a serem considerados, tais como, as propriedades inerentes dos próprios materiais, ou seja, do cimento e da madeira, a incompatibilidade química entre a madeira e o cimento, a composição química e o comportamento físico de cada um de seus componentes, etc.

Simatupang (1986) estudou a degradação da glicose, celobiose e da madeira sob a influência de uma pasta de cimento, através da metodologia de exame das amostras por cromatografia de camada fina e de troca de íons. Os produtos derivados da celobiose em meio à pasta de cimento indicam que a degradação se deve à uma reação denominada *peeling off*, ou seja, degradação dos cátions na presença de ar. Durante essa reação, a glicose se separa do ácido *D-glicose-sacarose*, sendo essa molécula constituída, sobretudo, de ácido láctico.

Segundo afirmaram Hachmi e Campbell (1988), a adição de outros materiais na mistura água-cimento, tais como partículas de madeira e aditivos químicos, afeta a reação de hidratação, o tempo para atingir as diferentes etapas e a resistência da pasta de cimento. As interações físico-químicas entre a madeira e o cimento ainda não são bem compreendidas. A mistura madeira-cimento é composta de constituintes orgânicos e inorgânicos, que sofrem mudanças dinâmicas ao longo do tempo, logo que a matriz hidrata e endurece. As espécies de madeira afetam de maneira crítica a hidratação do cimento e a resistência final. A madeira é constituída de *celulose*, *hemicelulose*, *lignina* e *extrativos variáveis*. As hemiceluloses são polissacarídeos complexos que variam de forma significativa dentre as espécies; nas folhosas representam 34% e nas resinosas 28%. A lignina se constitui em polímeros naturais amorfos, solúveis em água alcalina, por essa razão, elas incham, solubilizam e se degradam facilmente. Os extrativos são igualmente misturas complexas de compostos que contém resinas e ácidos graxos, terpenos e terpenóides, fenóis, taninos, açúcares simples e sais. Esses compostos variam consideravelmente em termos de solubilidade e do teor dos constituintes, dependendo

consideravelmente da espécie de madeira. Os compósitos cimentícios à base de resíduos vegetais são materiais de construção que possuem grande resistência ao fogo, à podridão e aos insetos. Porém, é importante considerar que as características do compósito dependem da espécie de madeira e da hidratação rápida inicial do cimento (início de pega). Na primeira etapa de hidratação do cimento, o C_2S e o C_3A são hidratados para formar um gel de *tobermorita* e de hidróxido de cálcio (Equações 2.1 e 2.2).



Cerca de 25% da massa de cimento é transformada em hidróxido de cálcio (cal), que, por sua vez, aumenta o pH da pasta de cimento para 12,5, produzindo uma pasta altamente alcalina que incha, dissolve e degrada os constituintes da madeira.

2.4 Incompatibilidade química entre resíduos vegetais e cimento

Supõe-se que o retardamento no processo de hidratação do cimento pelos constituintes da madeira, segundo afirmaram Sandermann et al. (1960), seja causado pela formação de uma membrana que envolve os grãos de cimento, impedindo a formação dos produtos provenientes das reações do cimento Portland.

Conforme afirmaram Weatherwax e Tarkow (1964), as madeiras folhosas (*Angiospermas*) são mais inibitórias à pega do cimento do que as coníferas (*Gymnospermas*). A hemicelulose presente nas folhosas, têm um efeito inibitório pronunciado na pega do cimento, devido à presença de amidos, taninos, açúcares e certos fenóis. A curva de hidratação (temperatura ao longo do tempo) da mistura entre os resíduos vegetais e o cimento é um método prático para quantificar o efeito inibitório da biomassa vegetal na hidratação do cimento. A madeira atacada por fungos pode ser altamente inibitória, portanto, cuidados devem ser tomados para se evitar o

ataque de fungos na madeira antes ou após sua transformação na forma de resíduos. O alburno cortado na primavera também pode ser inibitório à hidratação do cimento, devido ao seu alto teor de amido.

Conforme afirmaram Biblis e Lo (1968), de acordo com fabricantes de painéis de madeira-cimento, certos lotes não apresentaram pega ou possuíam um tempo de pega elevado, embora houvesse sido utilizado o mesmo processo de fabricação, a mesma matéria-prima vegetal e as mesmas proporções em massa de madeira, cimento e água. A questão era saber quais eram os fatores que causaram um retardamento ou o próprio impedimento da pega, e como os mesmos poderiam ser eliminados ou minimizados. Com o objetivo de identificar esses fatores, os autores utilizaram uma metodologia para determinação do tempo de pega em misturas entre a madeira da espécie *Southern-pine* com o cimento Portland. A ação do fungo manchador azul (*Ceratocystis pilífera*) sobre madeira durante um período de 4 meses provocou a diminuição no tempo de pega da mistura com o cimento. A conclusão dos autores resumiu que a concentração dos açúcares redutores na madeira apresenta um efeito definitivo sobre a pega do cimento, que aumenta a inibição à medida que o teor de açúcares aumenta. Além disso mistura do cerne da madeira com o cimento requereu maior tempo de pega em relação à mistura similar, utilizando o alburno da madeira, pelo fato de que o teor de açúcares redutores no cerne é mais elevado do que no alburno. A extração em água quente reduziu o tempo de pega da mistura, sendo esse efeito mais pronunciado para o cerne, provavelmente causado pela extração dos açúcares da madeira e de alguns outros inibidores solúveis em água quente. Soluções de $CaCl_2$ reduziram o tempo de pega da mistura; além disso, as soluções com 1% desse sal minimizaram significativamente as diferenças entre os tempos de pega para os vários grupos de partículas de *Southern-pine*.

Hofstrand et al. (1984), a partir de dados de temperatura, desenvolveram uma equação (Equação 2.3) que define uma metodologia para o cálculo de um índice inibitório (I) na pega do cimento em compósitos cimentícios à base de resíduos vegetais. Esse procedimento consiste em um método quantitativo do efeito inibitório dos resíduos vegetais. O índice de inibição (I) das espécies pode ser calculado a partir dos valores da temperatura máxima de hidratação (T_2), da inclinação máxima da curva exotérmica ($S_{máx}$), e do tempo necessário para se alcançar a

temperatura máxima de hidratação (t_2-t_0). Estes valores (T_2 , $S_{máx}$ e t_2-t_0) são relativos à mistura do cimento com os resíduos que o inibem, devendo ser comparados com os valores (T'_2 , $S'_{máx}$ e t'_2-t_0) correspondentes da pasta de cimento e água.

$$I = 100 \cdot \underbrace{\left(\frac{t_2 - t'_2}{t'_2} \right)}_{\text{TEMPO}} \cdot \underbrace{\left(\frac{T'_2 - T_2}{T'_2} \right)}_{\text{TEMPERATURA}} \cdot \underbrace{\left(\frac{S'_2 - S_2}{S'_2} \right)}_{\text{INCLINAÇÃO DA CURVA}} \quad (2.3)$$

A equação difere substancialmente daquelas utilizadas por outros pesquisadores. A relação como foi apresentada por Wheaterwax e Tarkow (1964) tem a desvantagem de não ser aplicável para estabelecer diferenças entre as espécies que tenham o mesmo tempo de endurecimento, porém que apresentem diferentes temperaturas máximas de hidratação. Espécies com o mesmo tempo de hidratação e temperaturas similares podem apresentar diferentes taxas ($^{\circ}\text{C}/\text{h}$). Portanto, para descrever o valor do índice de inibição (I) com mais precisão torna-se necessário introduzir na equação a temperatura e a inclinação da curva. Sandermann e Kholer (citados por HOFSTRAND et al.,1984) sugeriram que espécies altamente compatíveis, quando misturadas com o cimento, apresentem uma temperatura superior a 60°C , enquanto que espécies incompatíveis não excedam a temperatura de 50°C . A compatibilidade das misturas madeira-cimento propostas foi expressa por um índice de inibição, derivado da temperatura e/ou do tempo de hidratação. Entretanto, de acordo com Lee e Hong (1986), algumas vezes este índice não reflete a compatibilidade real. Por esta razão, os autores apresentaram um indicador de compatibilidade por meio de ensaios de compressão axial simples de amostras cilíndricas feitas com a fôrma padrão ASTM. As amostras foram confeccionadas utilizando cimento Portland tipo I e os resíduos de madeira das seguintes espécies: *Southern-pine*, *White-oak*, *Yellow-poplar*, *Sweet-gum* e *Hickory*. Os resultados indicaram que a resistência à compressão foi diretamente proporcional à temperatura máxima de hidratação. Sem a influência do CaCl_2 (aditivo cloreto de cálcio), a compatibilidade de diferentes espécies com o cimento pôde ser indicada pela resistência à compressão ou pela

temperatura máxima de hidratação. Os resultados também indicaram que o uso do CaCl_2 e a razão elevada de cimento (proporção de 13/1, cimento e resíduo, respectivamente), aumentam a dificuldade em distinguir a compatibilidade entre as várias espécies estudadas.

Após estudos realizados, Lee et al. (1987) concluíram que os resultados obtidos com misturas com alta relação cimento/madeira, utilizadas tradicionalmente em laboratórios de pesquisa, podem não refletir verdadeiramente a compatibilidade entre esses componentes, quando se utilizam razões próximas daquelas empregadas na produção comercial de chapas (2/1).

Hachmi et al. (citados por HACHMI e MOSLEMI, 1989) afirmaram que os extrativos da madeira afetam negativamente as características da hidratação exotérmica do cimento, assim como a compatibilidade madeira-cimento. Diferentes madeiras podem conter o mesmo teor de extrativos, porém, possuindo diferentes compatibilidades com o cimento. Isso confirma que a composição química dos extrativos também desempenha um importante papel na compatibilidade madeira-cimento. Com base no conteúdo dos extrativos e nos resultados de previsão da compatibilidade desenvolvida através de estudos realizados, os autores definiram o fator *CA* como sendo a razão entre a área formada abaixo da curva de hidratação entre o resíduo e o cimento, em relação à área da pasta pura, com intervalo de integração correspondente ao período de 24 h. A variação desse fator determina o grau de compatibilidade do resíduo, podendo ser propostas três classes de compatibilidade (Tabela 2.1):

Tabela 2.1 - Classes de compatibilidade para as misturas de madeira-cimento.

Fonte: Hachmi e Moslemi (1989).

VARIAÇÃO DO FATOR CA	CLASSES DE COMPATIBILIDADE
<i>Fator CA superior a 68%</i>	<i>material compatível</i>
<i>Fator Ca entre 28% e 68%</i>	<i>material moderadamente compatível</i>
<i>Fator CA inferior a 28%</i>	<i>material incompatível</i>

De acordo com Yasin e Qureshi (1989), a principal dificuldade observada na confecção dos compósitos cimentícios à base de resíduos vegetais é o comportamento inconsistente das várias espécies de resíduos, no que tange ao desenvolvimento da resistência dos mesmos. Muito

embora os efeitos da influência individual das espécies na pega do cimento Portland sejam substanciais, algumas delas produzem excelentes painéis, enquanto outras não. Alguns pesquisadores atribuem tais inconsistências, principalmente, à quantidade dos extrativos solúveis presentes na madeira que, mesmo em pequenas quantidades, tendem a inibir a hidratação do cimento. Como conseqüência, retardam sua pega, obstruindo, dessa maneira, a formação da estrutura cristalina que é essencial ao desenvolvimento da resistência do compósito cimentício. Os extrativos solúveis dissolvidos em água fria representam menor quantidade em comparação aos extrativos dissolvidos em água quente. Essa diferença indica que os extrativos solúveis em água quente incluem alguns materiais além daqueles dissolvidos em água fria. Em conformidade com Tappi (citado por YASIN e QURESHI, 1989), os extrativos solúveis em água fria correspondem aos taninos, as resinas, os açúcares, enquanto que na água quente estão presentes, também, os amidos provenientes da hidrólise dos polissacarídeos, aumentando desse modo seu grau de solubilidade. De acordo Biblis e Lo (1968), a resistência dos compósitos cimentícios à base de resíduos vegetais varia com o inverso da quantidade dos extrativos solúveis que estão presentes nos resíduos vegetais.

Conforme afirmaram Miller e Moslemi (1991) torna-se difícil constatar as causas exatas da inibição do cimento pelos componentes da madeira, em vista da ocorrência de uma grande quantidade de reações químicas complexas e de processos físicos simultâneos. O mecanismo de inibição da hidratação e da cristalização do cimento, pelos componentes da madeira, é conhecido apenas superficialmente. Açúcares podem migrar para a superfície durante a secagem da mesma e considerando-se que esses açúcares contêm grupos funcionais (ácidos hidroxil e carboxílico), existe a possibilidade que estes possam se combinar com o cálcio, alumínio e íons de ferro contribuindo para o retardamento da hidratação do cimento. Essas reações inibidoras podem se desenvolver na interface entre a madeira e o cimento ou nas vizinhanças da matriz cimentícia, reduzindo as ligações mecânicas e químicas, ali existentes. Os componentes da madeira podem também ser solubilizados e/ou degradados pelo Ca(OH)_2 (hidróxido de cálcio), que é formado durante a hidratação do cimento. O hidróxido de cálcio é produzido durante a hidratação inicial do cimento, fornecendo uma pasta de cimento alcalina (pH=12,5). Tendo em vista que as hemiceluloses não são cristalinas e solúveis em meio alcalino, elas podem ser dissolvidas na pasta de cimento e afetar a sua cristalização. Através de

estudos específicos, os autores constataram que as características não polares e a falta de grupos funcionais interativos no ácido oléico e no beta-sitosterol, provavelmente, minimizaram suas interações com o cimento. O que indica que madeiras, tais como o *southern pine*, que apresentem grandes quantidades de ácidos graxos e esteróis, podem ser aceitáveis como matéria-prima para a fabricação de compósitos cimentícios.

Para se determinar a influência de cada componente na compatibilidade entre a madeira e o cimento, Moslemi et al. (1983) utilizaram uma série de tratamentos que incluíram a extração em água quente dos componentes solúveis em água e/ou aditivos químicos. Através de um estudo preliminar, a partir da observação da curva de temperatura de hidratação de compósitos, foram obtidos alguns resultados a respeito de duas matérias-primas vegetais utilizadas. O objetivo foi de executar o tratamento sobre as espécies de grande inibição (*Larch*) e de pequena inibição (*Lodgepole-pine*). Em investigações preliminares, realizadas por outros pesquisadores, havia sido concluído que as diferenças no comportamento das espécies com o cimento deviam-se, principalmente, às substâncias solúveis em água, presentes nas paredes celulares da madeira. A partir dessas informações foram iniciados uma série de ensaios visando remover, ao menos, uma parte dos extrativos e açúcares solúveis em água quente e, também, em solução diluída de cloreto de cálcio. Nos compósitos à base de *Lodgepole-pine* não foi verificada uma diferença significativa no valor do tempo de obtenção da temperatura máxima com relação à mistura cimento-água, porém, houve redução do valor da temperatura máxima. Os compósitos à base de *Larch* sem tratamento inibiram a ação do cimento durante o monitoramento de 24 h após a mistura. Entretanto, quando essa madeira foi tratada ocorreu o endurecimento da mistura, produzindo-se uma forte reação exotérmica, após um período relativamente curto. Aparentemente, o tratamento com água quente conferiu melhor resultado, em vista da redução do tempo de obtenção da temperatura máxima na curva de hidratação. Com o objetivo de reduzir o tempo de pega do cimento, tem-se pesquisado a inclusão de aditivos químicos, tal como o cloreto de sódio, na mistura madeira-cimento-água. Este composto adicionado à mistura aumenta a formação da estrutura cristalina no cimento, promovendo um maior contato entre as ligações existentes no cimento e na madeira.

Moslemi e Lim (1984) utilizando a metodologia para determinação da curva de hidratação do cimento, constataram que após extração de componentes da madeira através de água quente, algumas espécies de madeiras folhosas apresentaram uma diminuição no tempo requerido para alcançar a temperatura máxima de hidratação. O tratamento com água quente é importante para a redução no teor de substâncias que prolongam o período de dormência, ou seja, período que correspondente à estabilização da temperatura, representado por um patamar na curva de calor de hidratação e que antecede o tempo que caracteriza o início de pega.

Simatupang et al. (1988) afirmaram que a pega do cimento não é inibida apenas pelos carboidratos solúveis e pelos compostos fenólicos, mas também pelos compostos alcalis-solúveis presente nas paredes celulares da madeira. As propriedades dos compósitos madeira-cimento são influenciadas pela composição química da madeira e do cimento, também pelos parâmetros de fabricação, uso de aceleradores e relação água/cimento (A/C). Na interação entre a pasta de cimento e a madeira, uma parte da hemicelulose começa a se solubilizar e retarda o endurecimento do cimento. Geralmente, a amostra de madeira imatura é mais inibidora do que aquela proveniente de madeira madura, em vista da presença da seiva na primeira.

Simatupang et al. (1988) propuseram alguns métodos para melhorar a compatibilidade madeira-cimento:

1. Maturação da madeira ou das partículas: durante essa maturação, a concentração de açúcares livres diminui. No entanto, o mesmo não ocorre com os compostos fenólicos;
2. Extração em água;
3. Envolvimento das partículas: uso de substâncias que impeçam a difusão dos compostos da madeira em direção ao cimento;
4. Secagem das partículas em forno;
5. Adição de sílica ativa ou de cinza volante;
6. Utilização de cimento de alta resistência inicial.

Segundo afirmaram Furuno et al. (1991), a mineralização dos resíduos vegetais é um processo que utiliza um tratamento químico por intermédio de substâncias que, quando solubilizadas, são capazes de aderir às partículas de madeira, envolvendo-as, preenchendo seus poros e

minimizando a influência de seus extrativos durante a hidratação do cimento. Para confeccionar um compósito proveniente de madeira e um mineral (silicato) foram produzidas substâncias inorgânicas através da impregnação de silicato de sódio na madeira, seguida pela precipitação com uma solução de sulfato de alumínio ou de cloreto de cálcio. Com apenas uma pequena concentração de 5% de silicato de sódio os ganhos em massa, em porcentagem, foram suficientes, havendo pouca diferença entre impregnação a vácuo ou pelo processo de difusão.

Através de um trabalho de caracterização de compósitos cimentícios à base de casca de arroz, Zucco (1999) verificou que o melhor desempenho mecânico foi obtido com o tratamento da casca lavada em solução de cal. O procedimento utilizado consistiu na sua imersão durante um período de 24 h. A composição do traço recomendada correspondeu a uma proporção de 1:0,36:0,50 (cimento:casca:água). De acordo com Serrano e Castro (citados por ZUCCO, 1999), a quantidade de cal empregada foi de 5% em relação à massa da casca de arroz e a proporção em volume entre a solução de cal e a casca de arroz de 10:1, correspondendo a uma concentração da solução de cal em 0,5%.

Beraldo et al. (2002) realizaram avaliação técnica de adequação de diversas matérias-primas de origem vegetal em compósitos cimentícios. As partículas vegetais foram submetidas a diversos tratamentos: natural, lavado em água quente, em soluções diluídas (5%) de cal e soda cáustica, com uso de aceleradores (cloreto de cálcio e sulfato de alumínio) e com a mineralização (silicato de sódio a 5% e sulfato de alumínio a 20%), além da combinação de alguns desses tratamentos. O desempenho dos compósitos foi avaliado pela determinação da resistência à compressão simples. Os compósitos à base de resíduos de *Eucalyptus grandis* e de *Pinus caribaea* apresentaram tensão de ruptura média em torno de 8,0 MPa, quando imersos em solução de cal, no traço em massa de 1:0,375:0,75 (cimento:resíduo:água) e com uso do aditivo acelerador de pega (CaCl_2), 3% em relação à massa de cimento.

Beraldo e Freitas (2003) analisaram o efeito de três teores de adições de fibras de sisal (1,8%, 3,6% e 10,8%) em argamassa de cimento e areia. As fibras de comprimento inferior a 1,5 cm, foram submetidas a diversos tratamentos visando melhorar sua compatibilidade química com o cimento Portland (CPII-E-32). Além do ensaio de compressão simples, avaliou-se a velocidade

do pulso ultra-sônico através de corpos-de-prova cilíndricos. As fibras de sisal se mostraram inibitórias à pega do cimento apenas quando foram empregadas na dosagem mais elevada (10,8%). O tratamento mais adequado para as fibras de sisal (*Agave sisalana*) consistiu na lavagem do resíduo em água fria através da imersão durante um período de 24 h, tendo sido observado que boa parte dos extrativos presentes no resíduo ficaram diluídos na água.

2.5 Porosidade em compósitos à base de cimento

Para controlar o mecanismo de absorção de água pelos poros, nos diversos materiais à base de cimento, torna-se necessário conhecer sua estrutura e distribuição, fatores que influenciam particularmente a velocidade de transporte, possibilitando o ingresso de substâncias agressivas e a degradação física do material. Para o concreto a existência dos poros na pasta de cimento pode ser devido a vários fatores, tais como, o processo de adensamento, ar incorporado, capilares e ao gel proveniente da reação de hidratação, podendo ser classificado como macroporos, poros capilares e microporos. A porosidade, medida pela absorção da água, corresponde à região dos poros capilares cujo raio médio encontra-se, aproximadamente, entre 0,01 μm e 100 μm . Essa região compreende também uma parte dos vazios devido ao ar incorporado no momento da mistura (CEB, 1989).

De acordo com Diamond (1999), estima-se que uma parcela significativa de poros de maior dimensão encontrados no concreto, considerando-se a mínima quantidade destes em relação aos poros existentes, seja proveniente do mecanismo de hidratação. Estes poros, portanto, não representam restos do espaço original existente entre os grãos de cimento, conceito aceito a respeito da origem dos poros capilares. Em geral, é de comum acordo que a estrutura dos poros do concreto é uma das suas características mais importantes e influencia fortemente seu comportamento mecânico e suas propriedades de transporte. As propriedades de transporte estão intimamente relacionadas com a durabilidade do concreto. Infelizmente, uma série de aspectos em relação às características geométricas e microestruturais fundamentais das estruturas dos poros do concreto não são perfeitamente compreendidas e, comparativamente, poucos pesquisadores têm se preocupado com isso.

A caracterização da distribuição dos poros através do porosímetro por intrusão de mercúrio tem sido uma técnica muito utilizada por pesquisadores. Num porosímetro, para medir o volume do poro preenchido, através da aplicação de uma pressão, torna-se necessário colocar a amostra dentro de um bulbo de alta pressão onde o mercúrio é forçado a penetrar nos poros do compósito. O volume preenchido no poro capilar é determinado ao medir-se a mudança na capacidade da coluna de mercúrio através de um tubo exterior cilíndrico. A obtenção numérica da porosidade é feita através da derivada da relação entre a pressão aplicada “ p ” e o tamanho do poro preenchido. Em um poro circular de diâmetro “ D ”, a tensão superficial do líquido dentro do capilar, aplicada ao longo da linha do contato com a borda, age para forçar o líquido de volta. A força de tensão superficial tende expulsar o líquido para fora do capilar e o valor desta força é dado por “ pDg ”, onde “ g ” é a força de tensão superficial por unidade de área, e na direção axial do poro capilar pelo componente “ $pDg \cos q$ ”, onde “ q ” é o ângulo de contato. No equilíbrio, esta força é compensada pela pressão que induz o líquido no interior do poro “ $pDgp/4$ ”; portanto, igualando estas forças tem-se a Equação 2.4 (WASHBURN, 1921):

$$D = -4g \cos q / p \quad (2.4)$$

Contudo, alguma imprecisão permanece com relação à conectividade existente entre vários tamanhos de poros (REINHARDT, 1990). Para alcançar poros de um dado tamanho característico, torna-se necessário cruzar as aberturas com tamanhos menores, e o volume da cavidade que se leva em conta corresponderá, então, à soma daqueles poros cujo tamanho característico seja igual aquele do poro de entrada (METZ e KNÖFEL, 1992). O porosímetro com intrusão por mercúrio conduz a uma superestimação do volume e da área superficial dos poros mais finos, em detrimento daqueles mais largos, sem que seja possível avaliar suas proporções relativas. Além disso, o aprisionamento do mercúrio em determinados poros, durante ciclos repetidos, dá origem a uma histerese cujas superfícies e formas dependem das características da estrutura dos poros (GIESCHE, 1996).

De acordo com Diamond (2000), as medidas determinadas através da técnica de intrusão por mercúrio em compósitos cimentícios são, em princípio, extremamente simples, embora haja necessidade de se considerar uma série de complicações experimentais. Inicialmente, no

procedimento usual para sua determinação, uma pequena amostra é submetida à secagem com o objetivo de se retirar todo o líquido existente no interior dos poros. Em seguida, a amostra é pesada e colocada em uma câmara onde deverá ser submetida ao vácuo, e a partir daí o mercúrio poderá ser introduzido nos poros da amostra. Este, a menos que seja aplicada uma pressão mínima, não é capaz de penetrar espontaneamente nos poros vazios. Desse modo, incrementos progressivos de pressão são aplicados ao mercúrio, sendo monitorada cada uma dessas etapas de intrusão. Os conjuntos das etapas e dos volumes determinados fornecem os dados para o cálculo da distribuição dos tamanhos dos poros, contudo, esses mesmos dados não fornecem informações suficientes a respeito da real distribuição dos poros da amostra.

A análise da porosidade obtida através do ensaio do porosímetro com intrusão do gás nitrogênio é utilizada para indicar o volume e a distribuição aproximada dos poros no interior de um material poroso (RILEM, 1984). A metodologia está baseada no estudo do escoamento de fluidos em meios porosos, sendo necessário inicialmente especificar os conceitos dos materiais envolvidos no problema: *fluidos e meios porosos*. Pode-se definir um meio poroso como sendo um meio sólido que contém poros. Poros são espaços "vazios", que podem ser distribuídos de diversas maneiras no meio. Vazios são caracterizados pelo fato de que as paredes têm um efeito insignificante sobre o fenômeno hidrodinâmico em seu interior. Em meios capilarizados, as paredes exercem alguma influência sobre o escoamento, mas os efeitos decorrentes da estrutura molecular do fluido são desprezíveis. Já nos espaços forçados, a estrutura molecular do fluido influi consideravelmente no escoamento. Além disso, os meios porosos podem ser classificados como tendo seus poros interconectados ou não. No caso de poros interconectados, a parte sólida do meio poroso representa a fase dispersa. Por exemplo, meios porosos granulares e fibrosos apresentam poros interconectados. Os regimes de escoamentos viscosos são classificados em laminar ou turbulento, tendo por base a sua estrutura. No regime laminar, a estrutura do escoamento é caracterizada pelo movimento suave em camadas. A estrutura do escoamento no regime turbulento é caracterizada por movimentos aleatórios, tridimensionais e transientes, de partículas fluidas, adicionais ao movimento principal. Outra propriedade do fluido é a sua massa específica " ρ ", ou seja, a massa por unidade de volume do fluido. Os escoamentos em que as variações da massa específica são desprezíveis são denominados incompressíveis. O exemplo mais comum de escoamento

compressível diz respeito aos gases em altas velocidades. Por outro lado, os escoamentos de líquidos podem ser frequentemente tratados como incompressíveis. A teoria do escoamento laminar e lento através de um meio poroso homogêneo é baseada num experimento clássico originalmente desenvolvido por Darcy em 1856 (Figura 2.1).

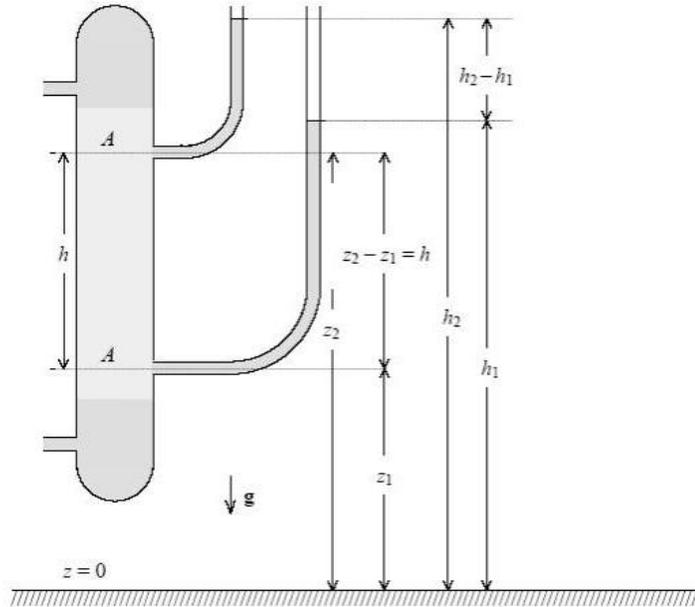


Figura 2.1 - Esquema do experimento de filtragem de Darcy.

Um filtro homogêneo de altura “ h ” é limitado por seções planas de mesma área superficial “ A ”. O filtro é preenchido com um líquido incompressível. Manômetros abertos são colocados para se medir a pressão nos pontos inferior e superior do filtro, fornecendo as alturas “ h_1 ” e “ h_2 ”, respectivamente. Pela variação das várias quantidades envolvidas, Darcy deduziu a seguinte Equação 2.5:

$$Q = -KA \frac{(h_2 - h_1)}{h} \quad (2.5)$$

, onde “ Q ” é o volume total de fluido que atravessa o filtro por unidade de tempo “[L^3T^{-1}]” e “[LT^{-1}]” é uma constante que depende das propriedades do fluido e do meio poroso. O sinal negativo na expressão para “ Q ” indica que o escoamento é na direção oposta de pressão crescente.

2.6 Matriz cimentícia modificada pela adição de polímeros

Conforme afirmou Storte (1992), a introdução de polímeros nas argamassas de cimento Portland pode ser feita através da impregnação de uma argamassa normal de cimento Portland endurecido por monômero, seguido de polimerização, obtendo-se a argamassa impregnada de polímero. Também, pode-se considerar a mistura de monômero com agregado, seguido de polimerização após moldagem e adensamento, obtendo-se a argamassa de resina. E, pela introdução direta de um monômero ou polímero na argamassa, no período de amassamento, seguido de cura e polimerização após a aplicação, obtendo-se a argamassa polimérica. Portanto, a argamassa polimérica é o produto da associação de um composto inorgânico (cimento) e um composto orgânico (látex polímero) e apresenta uma estrutura definida que consiste no gel de cimento e as microfibras do polímero. Conseqüentemente, as propriedades do cimento e do polímero são notadamente incrementadas quando se utiliza, como comparação, a argamassa convencional.

De acordo com Sakai e Sujita (1995), o mecanismo de ação do polímero no concreto pode ser representado através do modelo apresentado na Figura 2.2. Através do modelo observa-se a matriz representada pela pasta de cimento hidratado, a formação de uma microestrutura com distribuição das partículas de polímero, e uma camada interfacial com uma microestrutura diferenciada nas superfícies dos grãos de cimento e agregados, em relação às misturas testemunhos. Na interface entre o agregado e pasta, observou-se uma densa camada formada com polímero e o dobro da quantidade de polímero no entorno dos compostos hidratados, geralmente observado na matriz da pasta de cimento hidratado. Devido ao efeito de dispersão das partículas do polímero distribuídas ao longo da matriz e da melhora da propriedade adesiva na interface em torno dos grãos de cimento e agregado, ocorreu um aumento na resistência à flexão e ao fissuramento da argamassa modificada com adição de polímeros (PMC). Provavelmente, a propriedade adesiva da argamassa modificada pode ser melhorada em vista do desenvolvimento da propriedade de interligação da película polimérica formada na superfície da argamassa e na interface com outros materiais.

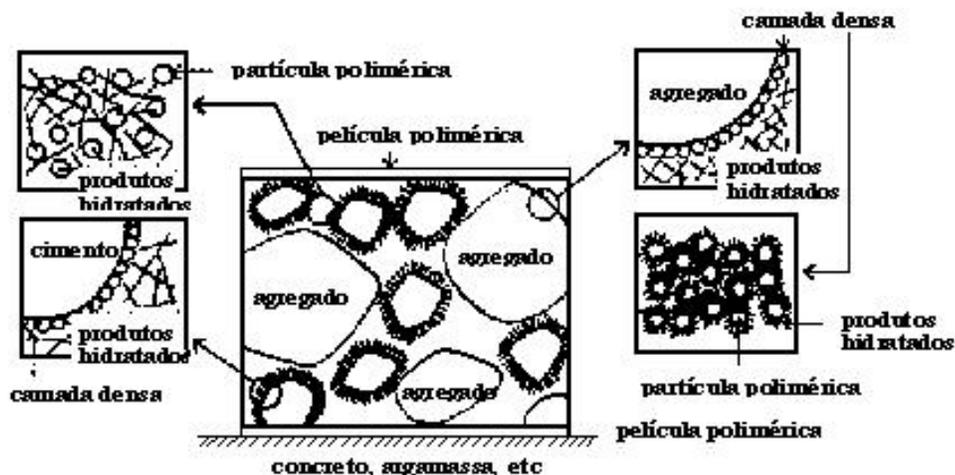


Figura 2.2 - Modelo representativo do mecanismo de ação do polímero no concreto.
Fonte: Sakai e Sujita (1995).

Em conformidade com Kim e Robertson (1997), os vazios incorporados, que se formam quando se mistura cimento e agregados com uma solução aquosa de polímero (emulsão polimérica), não são facilmente removidos porque tendem a serem estabilizados pelo próprio polímero. Agentes antiespumantes podem ser utilizados para evitar a formação desses vazios (ar incorporado), mas geralmente causam problemas de empobrecimento da adesão. Uma alternativa para se reduzir a formação do ar incorporado na argamassa modificada com polímero foi sugerida através da pré-molhagem do cimento e da areia, com a adição posterior de uma solução concentrada de polímero. O índice de ar incorporado da argamassa modificada preparada com a técnica de pré-molhagem apresentou menor valor em comparação ao obtido misturando-se a solução de PVA com o agente antiespumante. O ar incorporado na argamassa pode se formar através de dois diferentes modos, inicialmente pela trajetória não uniforme do líquido através do cimento e da areia, ou pelos vazios formados durante a molhagem. Os vazios são aprisionados pelo avanço não uniforme da trajetória do líquido, causado por agrupamentos irregulares de partículas de areia que se encontram mais próximas, ocasionalmente prendendo o ar e criando espaços vazios. Ao longo dessa trajetória eles são geralmente pequenos. A segunda maneira pela qual os vazios são formados é pelo transporte do ar que se encontra na superfície para o interior da mistura, durante o processo de agitação mecânica. Teores de ar incorporado para diferentes tipos de argamassas podem ser observados através da Figura 2.3. A argamassa referência sem adição de PVA (Argamassa W), confeccionada através da padronização de mistura ASTM, apresentou 1,4% do índice de ar incorporado. No processo de

mistura lenta a argamassa apresentou, aproximadamente, um teor de 0,2%. Em todas as argamassas com adição de PVA houve aumento do teor de ar em comparação às argamassas sem PVA. A argamassa com uma solução de 2% de PVA, padrão de mistura ASTM C305, forneceu um índice de 32% após a vibração; já a mistura mais lenta forneceu um índice de 15%. O uso de um agente antiespumante na solução de PVA reduziu, consideravelmente, o índice do ar incorporado. Entretanto, o índice do ar remanescente ainda foi de 13% quando a amostra foi preparada pelo padrão de mistura ASTM C305 e de 7% quando preparada pela mistura mais lenta. Através do uso da técnica de pré-molhagem utilizando-se argamassa, mistura ASTM C305, 30 rpm e 3 min, e uma solução concentrada de PVA, onde o cimento e a areia foram primeiramente misturados com água, obteve-se um índice de apenas 6%.

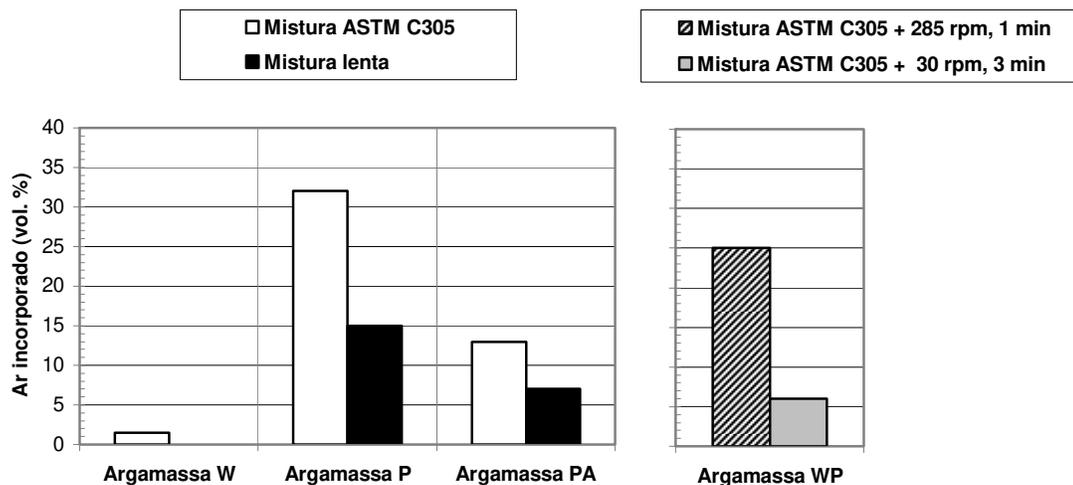


Figura 2.3 - Teor de ar incorporado de argamassa preparada sem PVA (Argamassa W), com PVA adicionado juntamente com a água inicial (Argamassa P), com PVA e agente antiespumante adicionado com a água inicial (Argamassa PA), e amostra preparada com a técnica de pré-molhagem (Argamassa WP).

Fonte: Kim & Robertson (1997).

Shaker et al. (1997) concluíram que o concreto com matriz modificada pela adição de polímero é caracterizado por apresentar uma microestrutura densa quando comparada ao concreto convencional. No concreto com polímero observou-se a formação de uma película polimérica que se encontra dispersa na matriz cimentícia formando uma malha densa interligada à mesma. Também, observou-se uma redução significativa das dimensões dos cristais de portlandita, presentes na matriz, com poros menores e sem ocorrência de microfissuras em relação ao concreto convencional. Pelo fato de a maioria dos poros na matriz estarem completamente

preenchidos pelo polímero, deduz-se que este contribuiu para a redução da permeabilidade e para um melhor desempenho relacionado à durabilidade do concreto. As observações da zona de transição indicaram menor formação de cristais de portlandita na interface entre o agregado e a pasta, constituindo-se em uma zona menos porosa e, portanto, mais resistente que a interface existente no concreto convencional. A película formada pelo polímero parece formar uma fase de conexão entre o agregado e a matriz cimentícia, o que pode ser observado pelo aumento da resistência à tração do concreto modificado em relação ao concreto convencional.

Segundo Ohama (1998), uma mistura à base de polímero, também chamado de cimento modificado, consiste em um composto polimérico, como ingrediente principal, o que é eficaz em modificar as propriedades das argamassas e dos concretos, tais como, a resistência mecânica, deformabilidade, adesão, impermeabilização e durabilidade. A argamassa e concreto confeccionados pela mistura com polímero são chamados, respectivamente, de argamassa modificada por polímeros (PMM) e concreto modificado por polímeros (PMC). Em geral, as propriedades desses materiais dependem do teor de polímero ou da razão entre o polímero e o cimento (definido como razão entre a massa do teor de sólidos do polímero em relação à massa de cimento presente na argamassa ou no concreto), sendo mais significativo do que a própria relação água/cimento da mistura (A/C). As misturas à base de polímeros são, em geral, classificadas em quatro tipos: látex de polímeros, polímero em pó redispersável, polímero solúvel em água e emulsão polimérica. Os látex de polímero (ou dispersões) que consistem nas partículas muito pequenas do polímero (0,05 μm - 5 μm de diâmetro) dispersas em água, são produzidos geralmente pela polimerização da emulsão. Contudo, o látex da borracha natural e o látex epóxi não são produzidos por tal polimerização. O látex da borracha natural é retirado da seringueira (*Hevea brasiliensis*), e, em seguida, concentrado sob a forma de sólidos. O látex epóxi é produzido pela emulsificação em água de uma resina epóxi através da utilização de surfactantes. A formação de um filme molecular, ordenado nas interfaces, reduz as tensões interfaciais e superficiais, sendo responsável pelas propriedades únicas dos surfactantes.

Na Tabela 2.2 estão apresentadas as denominações dos principais tipos de látex de polímeros, abreviatura de suas siglas e suas respectivas estruturas químicas:

Tabela 2.2 - Estrutura química dos principais látex de polímeros das misturas.

Fonte: Ohama (1998).

<i>Tipos de látex polímeros</i>	<i>Abreviação</i>	<i>Estrutura Química</i>
Látex de borracha natural	NR	$\left[\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \diagup \\ \text{C} - \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH} - \text{CH}_2 \\ \diagdown \\ \text{CH}_3 \end{array} \right]_n$
Látex de borracha cloroprene	CR	$\left[-\text{CH}_2 - \overset{\text{Cl}}{\underset{ }{\text{C}}} - \text{CH} - \text{CH}_2 - \right]_n$
Látex de borracha estireno-butadieno	SBR	$\left[-\text{CH}_2 - \text{CH} - \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \underset{\text{C}_6\text{H}_5}{\text{CH}} - \right]_n$
Látex ester poliacrílico	PAE	$\left[-\text{CH}_2 - \underset{\text{O}-\text{C}-\text{OR}}{\text{CH}} - \right]_n \text{ R: Grupo Alcoóla}$
Látex estireno-acrílico	SAE	$\left[-\text{CH}_2 - \underset{\text{O}-\text{C}-\text{OR}}{\text{CH}} - \text{CH}_2 - \underset{\text{C}_6\text{H}_5}{\text{CH}} - \right]_n \text{ R: Grupo Alcoóla}$
Látex etileno acetato de vinila	EVA ou VAE	$\left[-\text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \underset{\text{OCOCH}_3}{\text{CH}} - \right]_n$

De acordo com Ohama (1998), os requisitos gerais para os látex poliméricos como as misturas à base de polímeros estão descritos a seguir:

- Estabilidade química muito elevada com relação aos cátions extremamente ativos tais como os íons do cálcio (Ca^{2+}) e os de alumínio (Al^{3+}) liberados durante a hidratação do cimento;
- Estabilidade mecânica muito alta sob condições severas, especialmente em misturas com alta agitação em argamassas ou concreto, transporte com bombas, etc;
- Baixa atividade de incorporação de ar devido à utilização de agentes antiespumantes durante a mistura de argamassas ou concretos;
- Não apresenta nenhuma influência adversa na hidratação do cimento;
- Formação de películas contínuas do polímero na argamassa ou no concreto devido a uma temperatura de formação da película mínima mais baixa do que a temperatura de aplicação, e alta adesão da película de polímero aos produtos de hidratação do cimento e agregados (a temperatura de formação da película mínima é definida como sendo a mais baixa temperatura

na qual as partículas do látex de polímero tenham mobilidade e flexibilidade suficientes para o processo de fusão da película contínua de polímero);

- Excelente resistência à água, resistência aos álcalis e trabalhabilidade das películas do polímero formado nas argamassas ou concreto;
- Estabilidade térmica para grandes variações na temperatura durante o transporte e o armazenamento.

2.6.1 Princípios da modificação de argamassa pela ação do polímero

Embora as misturas à base de polímeros em todas suas formas, tais como, os látex de polímero, polímero solúvel em água e emulsão polimérica, sejam utilizados em compósitos cimentícios como argamassas e concretos, é muito importante que a hidratação do cimento e a formação do filme polimérico possam alcançar juntos uma fase monolítica da matriz. A modificação das argamassas e concretos é governada pelo processo de hidratação do cimento e pela formação da película polimérica do cimento na fase de mistura (co-matriz). O processo de hidratação, geralmente, precede o da formação da película do polímero através da fusão das partículas do polímero em látex de polímero. Algumas reações químicas podem ocorrer entre as superfícies da partícula de polímeros reativos, tais como, os ésteres poliacrílicos (PAE) e os íons do cálcio (Ca^{2+}), superfícies sólidas de portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), ou superfícies de silicato sobre os agregados. Espera-se que tais reações possam melhorar a ligação entre os produtos de hidratação do cimento e os agregados, e também as propriedades da argamassa e do concreto modificados, no estado endurecido. É provável que as microfissuras das argamassas e dos concretos modificados, sob tensão, sejam interligadas pela membrana de polímero formada impedindo a propagação da fissura e, simultaneamente, uma forte ligação seja desenvolvida com os produtos de hidratação do cimento e agregados. Tais efeitos aumentam com um aumento do teor de polímero e, também, a resistência à tração e à ruptura. Entretanto, o ar incorporado e a inclusão do polímero causam descontinuidades da estrutura monolítica, em forma de rede, cuja resistência é reduzida, embora algumas reações químicas se realizem eficazmente. O efeito de vedação devido às películas ou às membranas do polímero confere, também, um aumento considerável da impermeabilidade, da resistência à penetração de

umidade, da durabilidade e da resistência química. Isto prossegue, proporcionalmente, com o aumento do teor de polímero em relação ao cimento, até determinados limites.

2.6.2 Propriedades das argamassas e concretos no estado fresco

Geralmente, a argamassa e o concreto modificados possuem melhor trabalhabilidade do que as argamassas e os concretos convencionais. Isto pode ser interpretado, principalmente, em termos de melhora da consistência, devido à ação de "rolamento de esferas" das partículas do polímero, do ar incorporado e do efeito dispersante dos surfactantes nos látex. A relação água/cimento da argamassa e do concreto modificado, em uma dada consistência, se reduz com um aumento da razão polímero/cimento. Este efeito de redução da água verificado auxilia no desenvolvimento da resistência mecânica e na redução da retração por secagem. A maioria das argamassas e dos concretos modificados possui uma grande quantidade de ar incorporado em comparação com as argamassas e concretos convencionais por causa da ação dos surfactantes contidos como emulsificantes e estabilizadores do látex do polímero. Uma quantidade excessiva de ar incorporado causa diminuição da resistência, e pode ser controlada utilizando-se agentes antiespumantes apropriados. Os atuais látex comerciais de polímero contêm geralmente agentes antiespumantes apropriados, diminuindo consideravelmente o teor de ar incorporado. Conseqüentemente, o teor de ar da maioria de argamassas modificadas se encontra na faixa de 5%-20%, e da maioria dos concretos modificados com menos de 2%, muito superior em relação ao concreto sem a adição de polímeros. O índice do ar incorporado depende também do tamanho do agregado. As argamassas e os concretos modificados possuem maior capacidade de retenção da água em relação às argamassas e concretos convencionais. A retenção da água depende da relação do teor de polímero presente na mistura em relação ao cimento (P/C). Provavelmente, as razões para isto podem ser explicadas em vista das propriedades hidrofílicas e coloidais inerentes ao látex, além da inibição da evaporação da água devido aos efeitos de preenchimento e de vedação da película impermeável do polímero que é formada. Desse modo, uma quantidade suficiente de água necessária para a hidratação do cimento é contida na mistura, e para a maioria das matrizes modificadas, é preferível o procedimento de cura seca ao invés da cura úmida ou na presença de água. A excelente capacidade de retenção da água da argamassa e do concreto modificados contribui para o

aumento da resistência mecânica em longo prazo quando curados ao ar. Em geral, argamassas e dos concretos modificados têm seu tempo de pega retardados em comparação aos concretos e argamassas convencionais. Esta tendência depende do tipo e do teor de polímero presente na mistura.

2.6.3 Propriedades das argamassas e concretos no estado endurecido

Em geral as argamassas e concretos modificados apresentam um aumento significativo da resistência à tração e à flexão em comparação às argamassas e concretos convencionais. As propriedades de resistência são influenciadas por vários fatores que tendem a interagir uns com os outros, tais como, a natureza dos materiais usados, tais como, látex dos polímeros, cimentos e agregados; fatores de controle para as proporções de mistura (proporção em massa do teor de polímero em relação ao cimento, relação água/cimento, proporção da pasta em relação à quantidade de vazios, índice de ar incorporado, etc.) e métodos de cura. Baseado na teoria de Talbot sobre argamassas e concretos convencionais, Ohama (1972) definiu uma relação entre a pasta e os vazios (α) e uma relação entre os vazios e a pasta (β), e propôs empiricamente as equações utilizando α e β para estimar a resistência à compressão das argamassas e dos concretos modificados com látex:

Para argamassas modificadas por látex (Equação 2.6):

$$\log \sigma_c = (A/B^\beta) + C \quad \text{ou} \quad \sigma_c = (A/B^\beta) + C \quad (2.6)$$

Para concretos modificados por látex (Equação 2.7):

$$\sigma_c = a\alpha + b \quad (2.7)$$

onde σ_c é a resistência à compressão das argamassas e dos concretos modificados por látex, $\beta = 1/\alpha = (V_a + V_w)/(V_c + V_p)$, onde V_c , V_p , V_a e V_w são os volumes do cimento, polímero, ar e água por unidade de volume de argamassas e concretos respectivamente, e A, B, C, a e b são constantes empíricas.

Ollitrault-Fichet et al. (1998) afirmaram que os polímeros podem ser utilizados para melhorar as propriedades mecânicas, a resistência à fissuração por retração, a aderência ao substrato, ou a impermeabilidade do cimento e da argamassa. Entretanto, verificaram um efeito retardador proveniente da ação do polímero, que pode ser atribuído a uma membrana polimérica que envolve os grãos de cimento. As análises térmicas do concreto modificado mostraram que na temperatura de 390 °C ocorre a pirólise do polímero acrílico, mas não ocorre a decomposição dos cristais de hidróxido de cálcio (portlandita). Nessa condição, o polímero é decomposto, o que resulta em um aumento na porosidade do compósito de aproximadamente 10%. As observações feitas através da microscopia por varredura (MEV), em matriz cimentícia modificada pela adição de polímeros, mostraram que as partículas do polímero estão distribuídas entre os produtos hidratados e a superfície dos grãos de cimento amorfos. A análise térmica diferencial, a análise termogravimétrica e os ensaios de porosidade mostraram o efeito retardador do polímero e forneceram informações a respeito das alterações na porosidade. A Figura 2.4 mostra que uma fração do polímero está presa no interior de produtos de hidratação e o restante está segregado na superfície de grãos de cimento ainda amorfos.

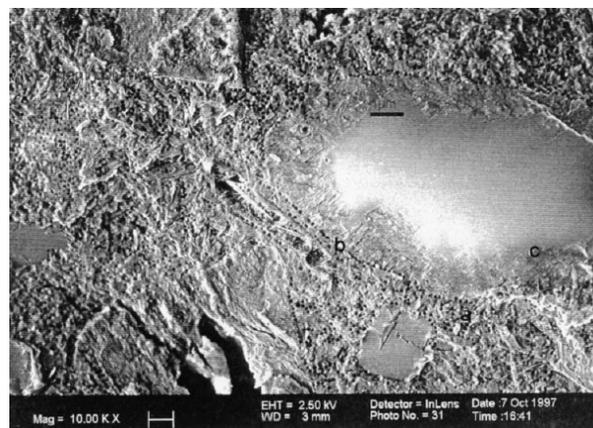


Figura 2.4 - MEV da argamassa modificada pela adição de polímero.

Fonte: Ollitrault-Fichet et al. (1998).

Isto implica que o polímero possui três efeitos: o de obstrução parcial da rede de poros finos entre os produtos hidratados; o de preenchimento dos poros grandes e para formar as membranas que envolvem os grãos de cimento. Tais efeitos se combinam para diminuir a taxa de permeabilidade e a hidratação da mistura.

Segundo Fowler (1999), os concretos modificados por polímeros (PMC) consistem no concreto com cimento Portland modificado com polímeros, tais como, o estireno acrílico, estireno butadieno (SBR), polivinil acetato (PVA) e o acetato de vinil etileno. Do ponto de vista da construção, o PMC tem um atributo desejável por ser muito similar à tecnologia do concreto convencional de cimento Portland. A proporção de utilização do polímero situa-se geralmente na faixa entre 10% a 20% em relação à pasta do cimento Portland. Somente alguns polímeros são apropriados para se adicionar ao concreto; a maioria dos polímeros não confere boa qualidade ao PMC. O estireno butadieno (SBR), por exemplo, fornece excelentes propriedades ao concreto, tais como, o aumento da coesão, aumento da sua resistência à flexão e diminuição da permeabilidade.

Stancato et al. (2005) realizaram ensaios com compósitos cimentícios à base de resíduos vegetais, com base nas normas para argamassa da ABNT, através da determinação das propriedades físicas-mecânicas, absorção de água por capilaridade e de trabalhabilidade. Algumas dessas propriedades foram, significativamente, alteradas com a adição dos polímeros em comparação à argamassa referência (sem a adição de polímero). O efeito da redução dos poros capilares foi resultado da ação do polímero na pasta cimentícia, o que contribuiu para a diminuição da permeabilidade dos compósitos. Esta propriedade pode auxiliar para o aumento da vida útil do compósito, impedindo eventuais penetrações de agentes agressivos, através da ocorrência dos fenômenos de transporte (ação da água). Os compósitos modificados apresentaram melhor comportamento físico e mecânico, com o aumento do teor de polímero resultando em um aumento da retenção de água da mistura no estado fresco, e redução da sua porosidade no estado endurecido. A adição do polímero conferiu uma melhora nas propriedades do compósito com resíduos, em comparação às propriedades do compósito referência, sendo eficiente a partir da adição de 3% até a adição de 5% de SBR, em massa, valor este correspondente ao melhor desempenho. A emulsão polimérica constituiu um fator determinante para a redução da porosidade e da permeabilidade do compósito.

2.7 Utilização de ensaios não destrutivos (END) como metodologia complementar

De acordo com Komlos et al. (1996), a maioria dos países padronizou procedimentos específicos para o desempenho deste ensaio, através da criação de normas técnicas. A

metodologia baseada na determinação da velocidade longitudinal da onda ultra-sônica é trivial para ensaios não destrutivos em concreto por causa da sua simplicidade e de seu custo eficaz. O ensaio não destrutivo (END) é freqüentemente utilizado para estimar a resistência do concreto, mas poder, também, ser utilizado para outras finalidades. Entretanto, a confiabilidade dos resultados destes ensaios pode ser duvidosa. Sempre que estes métodos são descritos ou mencionados em muitas normas, eles são criteriosamente revistos e comparados. A determinação da velocidade da onda específica para todas essas normas é baseada no mesmo princípio. Pulsos longitudinais, ondas de solicitações elásticas, são gerados por um transdutor eletroacústico que é fixo diretamente na superfície do concreto submetido ao ensaio. Após atravessar o concreto, os pulsos são recebidos e convertidos em energia elétrica por um segundo transdutor.

Beraldo (1999) relatou diferentes formas de avaliar a compatibilidade química entre a biomassa vegetal e o cimento Portland. Dentre elas pode-se citar: o teste da curva de hidratação e o comportamento do compósito quando submetido a ensaios destrutivos ou não destrutivos (END). Nesse último caso pode-se avaliar a evolução da velocidade de propagação de onda ultra-sônica através do material; em determinadas situações, por não haver o surgimento de uma estrutura mínima de ligação entre os constituintes, simplesmente não se observa o sinal acústico. Utilizando-se a metodologia de medição por meio de equipamento ultra-sônico com o objetivo de verificar a influência de diversos tratamentos de cura em compósitos cimentícios, definiu-se um modelo matemático para estimativa da resistência à compressão axial. Com determinação das curvas de velocidade em função do tempo buscou-se subdividi-las adotando-se, empiricamente, a posição em que o ponto de inflexão ocorresse após o período correspondente a 36 h da confecção dos compósitos, obtendo assim a Equação 2.8:

$$v = A + B \ln(t) \quad (2.8)$$

onde A e B são coeficientes que dependem do intervalo de tempo considerado. Por meio de análise estatística em relação aos valores de resistência à compressão propôs-se, então, o seguinte modelo matemático (Equação 2.9):

$$\sigma_c = 0,78 \exp(1,135v) \quad (2.9)$$

onde:

v : velocidade teórica de propagação da onda através do corpo-de-prova (km/s);

σ_c : resistência à compressão do compósito aos 28 dias (MPa).

De acordo com Beraldo e Vieira (2003), as modificações nas características de diversos materiais à base de cimento são passíveis de serem obtidas por meio de ensaios não destrutivos. Dentre eles destaca-se a utilização da velocidade do pulso ultra-sônico (VPU), a partir da qual se pode efetuar o acompanhamento temporal do estágio de endurecimento do material. A análise da evolução da velocidade de propagação ao longo do tempo permite detectar efeitos deletérios causados pela presença de matéria-prima incompatível com o cimento, ou de adições que modifiquem acentuadamente a pega e o endurecimento do aglomerante. Na maioria dos casos, a VPU apresenta boa correlação com a resistência mecânica do material. A magnitude da VPU para materiais à base de cimento depende de uma série de fatores, a saber: tipo de cimento, razão entre os constituintes, idade do material, forma de compactação, umidade, geometria do corpo-de-prova, além de características relacionadas ao equipamento de medição e à sua interface com o material a ser medido. Com o objetivo de avaliar o efeito causado pela adição de cinza da casca de arroz e de fibras de sisal em substituição parcial do cimento em compósitos cimentícios à base de resíduos vegetais, foram realizados ensaios com a utilização da técnica de medição de propagação da velocidade do pulso ultra-sônico. O aparelho utilizado foi o Ultrasonic Tester, modelo BP7 da *STEINKAMP*, com transdutores de seção exponencial de 45 kHz de frequência de ressonância, conforme Figura 2.5.



Figura 2.5 - Ensaio não destrutivo (END) através da utilização da propagação de ondas ultra-sônicas em compósitos cimentícios à base de resíduos vegetais.

Fonte: Beraldo e Vieira (2003).

Com os resultados obtidos foram elaboradas curvas matemáticas com estimativa da velocidade do pulso ultra-sônico em função da idade do material. Através desses dados foram estabelecidas correlações entre a velocidade final e a resistência à compressão axial dos compósitos. Foram obtidos dois gráficos para cada tipo de tratamento efetuado, um deles sendo o gráfico auxiliar (necessário para a obtenção da curva do comportamento teórico da propagação do sinal) e o outro comparando as curvas obtidas experimentalmente com o modelo teórico (BERALDO, 1999). O gráfico auxiliar foi obtido por meio da Equação 2.10:

$$v = v_{\max} [1 - \exp(A + Bt)] \quad (2.10)$$

onde:

v : VPU teórica através do corpo-de-prova na idade "t" (km/s);

v_{\max} : velocidade máxima de propagação obtida experimentalmente (km/s);

Os coeficientes A e B , determinados por regressão, permitiram obter a equação que rege o comportamento da VPU através dos corpos-de-prova originários dos diferentes tratamentos realizados. O coeficiente A pode ser considerado como um valor de "retardo" podendo, em alguns casos, assumir um valor nulo. O coeficiente B , por sua vez, pode ser associado a um tipo de "aceleração de endurecimento" da mistura, ou seja, em misturas mais adequadas sob o ponto de vista da compatibilidade química, a velocidade máxima geralmente é obtida em um menor intervalo de tempo após a fabricação.

Adotou-se a idade de 7 dias como intervalo limite.

fazendo a Equação 2.11,

$$\left(\frac{v - v_{\max}}{v_{\max}}\right) = -\exp(A + Bt) \quad (2.11)$$

tem-se a Equação 2.12,

$$\ln\left(\frac{v_{\max} - v}{v_{\max}}\right) = A + Bt \quad (2.12)$$

2.8 Estudo da microestrutura através da microscopia por varredura (MEV)

Muitas são as aplicações da microscopia de varredura (MEV), e a aplicação dessa técnica poderá se tornar mais eficiente quanto maior for o número de acessórios disponíveis no microscópio. Estes acessórios são responsáveis pelas diferentes aplicações na área da pesquisa, dependendo do tipo de detector pode-se fazer microanálises qualitativa e quantitativa. Baseado nas afirmações de Goldstein et al. (1992), o princípio básico de funcionamento do microscópio eletrônico de varredura consiste na captação, por intermédio de detectores específicos, de partículas provenientes da colisão de um feixe de elétrons de alta energia sobre um ponto específico de uma dada amostra. Tais partículas, denominadas fótons e elétrons reduzidos, são emitidas com grande espalhamento de energia, constituindo em sinais que após serem transcodificados são transformados em sinais elétricos. Estes sinais são utilizados para modular a intensidade de um feixe de elétrons num tubo de raios catódicos (TRC). O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um equipamento capaz de produzir imagens de alta ampliação (até 300.000 x) e resolução. As imagens fornecidas pelo MEV possuem um caráter virtual, pois o que é visualizado no monitor do aparelho é a transcodificação da energia emitida pelos elétrons, ao contrário da radiação de luz habitual (Figura 2.6).

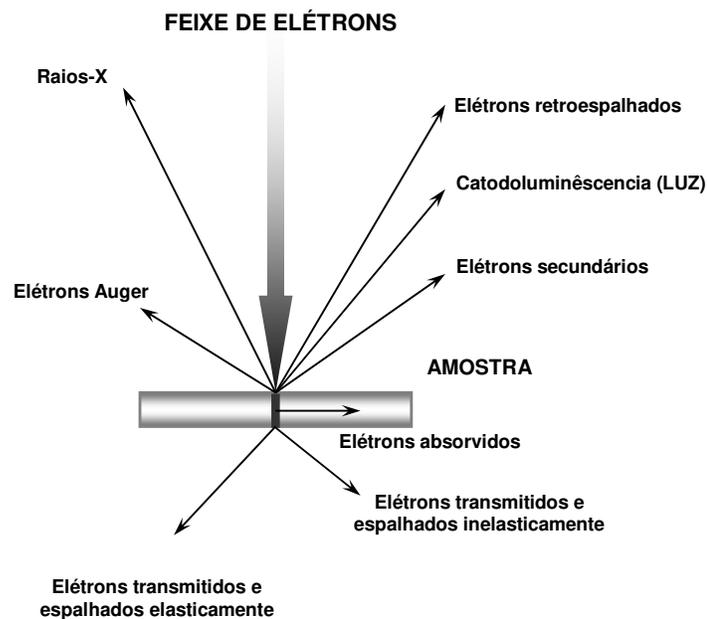


Figura 2.6 - Processos de interações possíveis durante a incidência de um feixe de elétrons em amostra sólida.

Fonte: Goldstein et al. (1992).

2.8.1 Aplicações da microscopia eletrônica de varredura aos compósitos cimentícios

Durante os últimos 20 anos, a visualização de imagens em superfícies polidas por meio da técnica de microscopia eletrônica se tornou um método muito adequado para o estudo da microestrutura do cimento e do concreto, conforme afirmou Scrivener (2004). A técnica oferece muitas vantagens, incluindo a visualização de uma seção de corte representativa através de uma grande faixa de ampliações e reproduções de contraste dependente do número atômico. Não obstante, deve-se ter em mente as limitações existentes de se observar uma seção bidimensional de uma estrutura que, na realidade, é tridimensional. A microestrutura dos materiais cimentícios se desenvolve pela hidratação. Na reação de hidratação, os grãos anidros do cimento reagem com água para produzir os produtos de hidratação, e no processo ocorre o aumento do volume sólido do sistema. Este sólido adicional interliga os espaços entre os grãos, conduzindo à formação de uma massa sólida. Na pasta do cimento Portland, a reação de hidratação é dominada pela reação do silicato tricálcico (C_3S), que produz o hidróxido de cálcio (CH) e o silicato de cálcio hidratado (C-S-H). A deposição destas fases na microestrutura é totalmente distinta, o hidróxido de cálcio precipita-se nos poros preenchidos com água, enquanto o C-S-H se deposita principalmente em torno dos grãos do cimento. Este vasto esquema da formação microestrutural habilita essas características essenciais para imagens de BSE, tais como estão apresentadas na Figura 2.7.

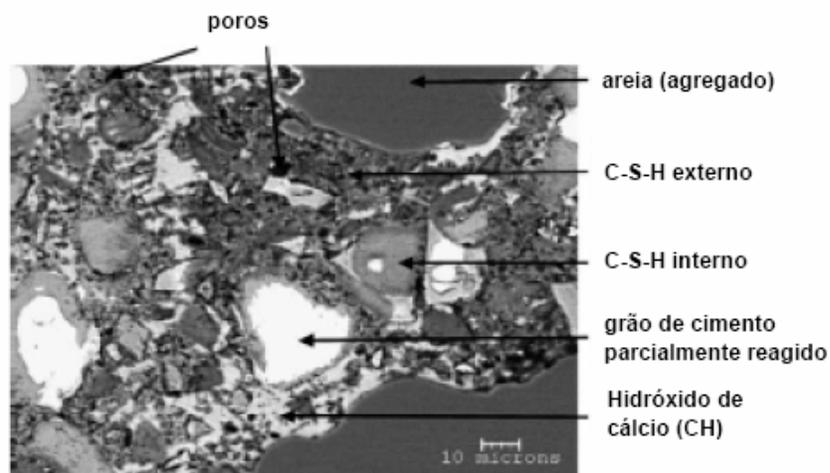


Figura 2.7 - Imagem típica BSE de uma argamassa de cimento Portland (200 dias de idade, $A/C=0,4$), com os constituintes microestruturais identificados.

Fonte: Scrivener (2004).

2.8.2 Técnica de microscopia de varredura por elétrons retroespalhados (BSE)

De acordo com Diamond (2004), a modalidade de microscopia eletrônica de varredura por elétrons retroespalhados (BSE) representa uma das inúmeras técnicas existentes em microscopia. Todas elas possuem uma característica em comum, ou seja, a de focar um feixe eletrônico em alta velocidade sobre uma superfície extremamente fina de uma amostra, e então fazer com que o feixe focalizado execute um rastreamento típico sobre uma área delimitada na superfície da amostra. As várias interações do feixe eletrônico ocorrem com os átomos que compõem a área rastreada, possibilitando um número de modalidades diferentes de aquisição de imagem. Nas primeiras investigações, quase todas as imagens dos materiais cimentícios foram feitas em amostras com superfícies fraturadas utilizando-se detetor de BSE. As imagens são mais aproveitáveis se todas as características topográficas forem removidas, ou seja, se a amostra apresentar uma superfície plana e altamente polida para a incidência do feixe de elétrons. A preparação das amostras se assemelha à preparação em seções finas ou superfícies polidas utilizadas nos microscópios ópticos convencionais. Entretanto, o processo físico de formação de imagem de BSE (varredura por elétrons retroespalhados) é muito diferente do processo de formação de imagem óptica, e os detalhes que podem ser adquiridos no BSE excedem, consideravelmente, o que é possível mesmo utilizando o instrumento óptico mais sofisticado. O mais importante é que quase todos os instrumentos de microscopia de BSE são equipados, também, com sistemas de energia dispersiva de espectroscopia por raios-X (EDS), os quais podem instantaneamente fornecer informações da composição química específica em qualquer ponto desejado ou da imagem da área que está sendo observada. Esta característica auxilia a tornar a microscopia de BSE uma técnica extremamente poderosa e informativa para pesquisa em concreto. No momento da impressão os tamanhos das imagens são, em geral modificados, e desse modo quase todos os equipamentos de BSE fornecem uma barra de escalas como parte da imagem. A barra de escala facilita a rápida verificação das dimensões das características que estão sendo observadas, constituindo-se em uma ferramenta apropriada para captar detalhes morfológicos. Infelizmente, a barra de escala gerada pelos equipamentos de MEV, muitas vezes é mal reproduzida, sendo que para maior clareza os autores fornecem, geralmente, uma barra de escala colocada na própria imagem. Mais recentemente, uma ampliação utilizada em um MEV convencional para pesquisa de materiais cimentícios quase nunca excedia 4000 x, mesmo com a utilização de equipamento de mais alta qualidade. Isto

permite a reprodução de detalhes com dimensões menores que $1\ \mu\text{m}$, mas detalhes estruturais em nano escala não são acessíveis. Não obstante, muitas ou a maioria das características dos produtos hidratados do cimento se situam dentro de uma faixa acessível de ampliação para a modalidade de varredura por elétrons retroespalhados. Certamente, a maioria dos ensaios com materiais cimentícios são realizados com ampliações entre $200\times$ e $2000\times$, com barras de escala da ordem de $10\ \mu\text{m}$ ou maior, mostradas geralmente na própria imagem. Contudo, uma significativa resolução na modalidade de varredura por elétrons retroespalhados pode ser obtida utilizando um campo de emissão de última geração, possibilitando a visualização de detalhes menores que $0,1\ \mu\text{m}$. A varredura por elétrons retroespalhados fornece uma vantagem especial para visualizar a microestrutura, pois começa com uma ampliação relativamente elevada e apropriada para estudar detalhes das características individuais, e continua a visualizar a característica e a área delimitada em ampliações progressivamente mais baixas. Um fenômeno comumente observado é a retração característica de massas de etringita na desidratação, que produz uma forma denominada "lista de tigre" como pode ser vista através da Figura 2.8. Este fenômeno é extremamente útil em demarcar a etringita quando ocorre nas massas, preferivelmente, em cristais isolados.

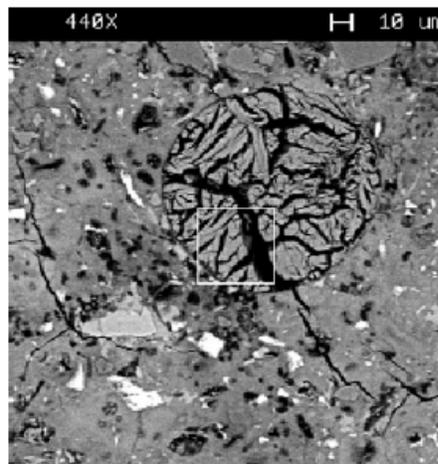


Figura 2.8 - Imagem da etringita após fenômeno de retração por desidratação em pasta de cimento Portland.

Fonte: Diamond (2004).

2.9 Conceitos de calor e determinação da condutividade térmica em compósitos

De acordo com Akatsu e Sato (1988), a condutividade térmica dos materiais está na razão inversa em relação à quantidade de ar presente no material e na razão direta em relação à massa específica aparente. A condutividade aumenta em função do teor de umidade contida nos materiais, uma vez que a água tem capacidade de isolamento inferior ao do ar e substitui parte do volume gasoso contido nos poros. Os valores de condutividade são delimitados pela microestrutura do agregado. Os agregados de estrutura cristalina, agregados quartzosos, com poros interconectados, conduzem mais calor do que os agregados de estrutura vítrea, com poros em distribuição discreta. No caso dos compósitos cimentícios com fibras vegetais, as fibras contidas nos compósitos contribuem para a redução da condutividade térmica em comparação aos compósitos à base de cimento, considerando-se que a madeira em geral tem uma capacidade de isolamento térmico maior em relação ao agregado quartzoso. Os compósitos cimentícios são, em geral, materiais de textura porosa, sendo que a composição, a quantidade de matéria sólida, a distribuição, a geometria e dimensões dos poros e o teor de umidade, exercem grande influência na determinação do índice de condutividade térmica desses materiais. Na condição de serviço, ou seja, durante sua vida útil, podem ocorrer modificações sensíveis em relação à estrutura, principalmente no que diz respeito à porosidade do material. Com relação à matriz cimentícia dos compósitos, sabe-se que o cimento Portland desenvolve, após sua moldagem, um processo contínuo de hidratação, bem como, a formação de produtos provenientes da reação do cimento com a água. Os produtos de hidratação do cimento, provenientes desta reação, têm influência direta na formação da microestrutura dos compósitos cimentícios, sejam concretos ou argamassas, assim como nas propriedades físicas ao longo do tempo.

Em conformidade com Taylor e Kelsic (1986), os compósitos reforçados com fibras vegetais oferecem uma melhoria nas propriedades térmicas e mecânicas em relação à maioria dos materiais convencionais. Estes materiais possuem maiores resistências em relação à sua massa específica, melhor resistência à corrosão e ao desgaste, e melhor fadiga em relação a metais de liga leve e de alta resistência. Com o exame das limitações na aplicação dos conceitos de difusividade térmica desses compósitos, através da utilização da técnica de raio laser para

medição da difusividade aparente, os efeitos da fração de fibra, a relação da condutividade térmica entre a fibra e a matriz, de acordo com a orientação da fibra e o comprimento das amostras, conclui-se que a condutividade térmica é o principal fator que governa seu comportamento térmico. Outro parâmetro de controle é a fração de fibra, onde o comprimento da amostra e orientação da fibra podem modificar o comportamento térmico dos compósitos.

Atualmente os métodos de medição de condutividade são basicamente divididos em dois grupos: os métodos estacionários (medição feita com fluxo de calor constante) e os métodos dinâmicos (medição de condutividade feita com fluxo de calor variável). Os materiais de construção podem ser considerados como sendo materiais de múltiplas fases, ou seja, matéria no estado sólido, líquido (água) e gasoso (ar ou gases no interior dos poros). A transferência de calor através desses materiais envolve três conceitos distintos: a condução através do sólido, da água e do ar; a convecção através dos movimentos dos gases e a radiação entre as superfícies sólidas. A determinação da condutividade térmica é a soma dos efeitos combinados destes fenômenos. O método Fluximétrico, segundo a norma técnica NBR 12094, é um método de utilização de técnicas fluximétricas para medir a condutividade térmica em regime permanente, através de amostras na forma de placas ou painéis planos, deduzindo-se, por cálculo, as propriedades de resistência e a transmitância térmica dessas amostras. Aplica-se aos materiais manufaturados e aos isolantes térmicos de edificação. A condutividade térmica depende das características geométricas das amostras, das propriedades térmicas dos materiais que constituem as amostras e de suas eventuais interações com o dispositivo de medição. O condutímetro fluximétrico compreende uma zona de medição cercada de uma zona periférica servindo de suporte, com características térmicas similares. A parte ativa do equipamento é constituída de um sensor que produz um sinal (força eletromotriz) proporcional à densidade do fluxo térmico que o atravessa. O princípio do método baseia-se na medição da resistência térmica em regime estacionário, primeiramente com a aplicação de uma densidade de fluxo de calor simultaneamente constante e unidirecional, a partir de duas superfícies isotérmicas mantidas a temperaturas constantes e diferentes uma da outra, através da zona central de medição de um condutímetro fluximétrico e da zona central de uma amostra em forma de placa. A calibração do equipamento deve ser efetuada no próprio dispositivo com o auxílio de amostra de referência, e num domínio no mínimo igual à faixa de temperaturas de

funcionamento e à faixa de fluxo de calor previsto. Esta calibração fornece a lei de proporcionalidade entre o sinal elétrico produzido (f.e.m) e a densidade de fluxo de calor (q). Os dispositivos de medição podem compreender uma placa aquecedora, um ou dois condutivímetros, uma ou duas amostras e uma placa de resfriamento. Segundo o número de condutivímetros, número de amostras e seus respectivos posicionamentos, podem ser concebidos três possíveis configurações de medição (Figura 2.9).

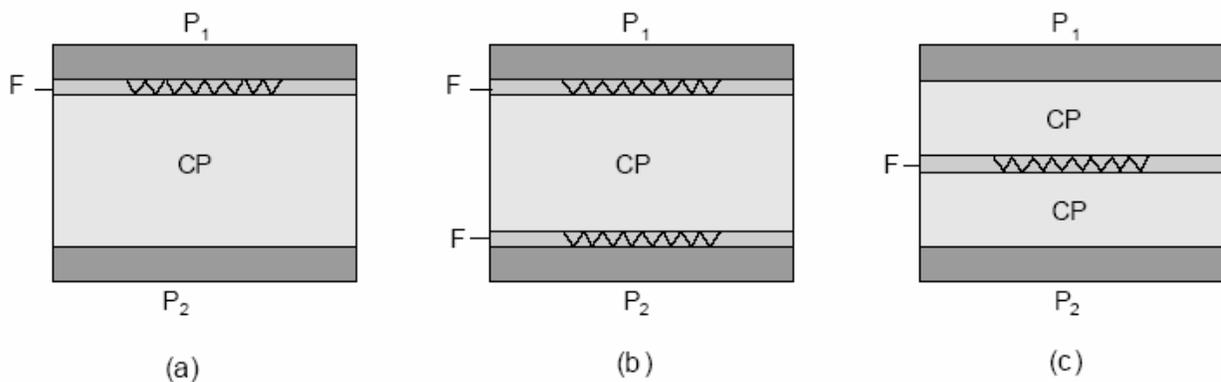


Figura 2.9 - Esquemas possíveis de configurações do método fluximétrico (P1 e P2: placas quente e fria, F: condutivímetro fluximétrico e CP: corpo-de-prova)

Fonte: Norma técnica NBR 12094.

onde:

- (a): configuração “assimétrica com um condutivímetro fluximétrico e um corpo-de-prova”, sendo que o condutivímetro fluximétrico pode ser posicionado contra uma ou outra placa;
- (b): Configuração “simétrica com dois condutivímetros fluximétricos e um corpo-de-prova”;
- (c): Configuração “simétrica com um condutivímetro fluximétrico e dois corpos-de-prova”.

A densidade de fluxo térmico (q) que atravessa a amostra é determinada a partir do sinal (f.e.m) fornecido pelo condutivímetro fluximétrico e de sua constante de calibração, sendo que o cálculo da resistência térmica (R) é dado pela Equação 2.13:

$$R = \frac{\Delta T}{q''} \quad (2.13)$$

onde,

R : Resistência térmica;	(m ² .K/W)
ΔT : Diferença de temperatura entre as faces da amostra;	(K)
q'' : Densidade de fluxo térmico.	(W/m ²)

Calcula-se a condutividade térmica através da Equação 2.14:

$$\lambda = \frac{e}{R} \quad (2.14)$$

onde,

λ : Condutividade térmica ;	(W/mK)
e : Espessura da amostra ensaiada ;	(m)
R : Resistência térmica.	(m ² .K/W)

2.10 Produção e confecção de blocos vazados à base de cimento

2.10.1 Dosagem para blocos de concreto

O estudo de dosagem para a confecção dos blocos de concreto representa um procedimento que estabelece o traço da mistura, ou seja, a especificação das quantidades de cimento, agregados, água, adições e eventualmente aditivos. Algumas precauções devem ser tomadas com relação à dosagem do concreto para fabricação de blocos estruturais, pois sua consistência é similar àquela determinada para solos. Neste caso, deve-se considerar a determinação da umidade ótima, ou seja, correspondente ao teor específico de água da mistura, para obtenção do valor máximo da densidade, em razão do processo de compactação. Para fabricação de blocos de concreto existe uma presença significativa de ar incorporado, contrariando o princípio consagrado para o concreto de estruturas, de que é preciso menor teor de água para aumentar a

resistência. A resistência à compressão é uma propriedade importante para os blocos estruturais, assim como a durabilidade, a absorção de água e a permeabilidade do material no estado endurecido.

Tango (1984) propôs um método racional de dosagem de concreto para blocos estruturais, de acordo com os procedimentos a seguir:

- a) Os agregados devem ser combinados de modo a se conseguir o máximo grau de compactação dos blocos durante a moldagem nas vibro-prensas. Recomenda-se utilizar agregados com dimensões máximas inferiores à metade da menor espessura da parede dos blocos;
- b) Estabelecimento da resistência média a ser obtida;
- c) Estimativa dos teores de agregado/cimento, definindo-se três traços de concreto: rico, médio e pobre. Nesta etapa espera-se que o traço médio seja uma estimativa inicial para a resistência requerida;
- d) Determinação da proporção de argamassa e da umidade ótima do traço médio, que no estado fresco deve apresentar bom aspecto superficial dos blocos, massa unitária elevada e boa trabalhabilidade;
- e) Confecção das misturas experimentais e ensaio dos blocos à compressão, correlacionando os resultados e empregando um diagrama de dosagem;
- f) Com este resultado pode-se determinar graficamente o valor da relação água/cimento (A/C) correspondente a qualquer resistência dentro do campo pesquisado.

De acordo com Souza (2001), os estudos referentes à avaliação da massa específica do concreto no estado fresco tiveram como objetivo investigar o comportamento dos materiais para diversos valores de umidade e de composições granulométricas. No geral, a massa específica traduz de forma tecnológica o grau de compactidade e empacotamento dos materiais. Estes estudos foram desenvolvidos com a utilização da mesa vibratória.

2.10.2 Mistura e confecção dos blocos vazados

Os equipamentos utilizados na produção dos blocos de concreto são denominados de vibro-prensas. Eles recebem esta denominação devido ao mecanismo de funcionamento empregado durante o processo de moldagem dos blocos: vibração associada à prensagem. A primeira função é responsável pelo preenchimento e adensamento da mistura nos moldes, e a segunda, influencia o adensamento e o controle da altura dos blocos. O mecanismo de vibração das vibro-prensas é responsável direto pelas características dos componentes moldados. Esta vibração é responsável, sobretudo, pelas operações de moldagem dos blocos.

De acordo com Medeiros (1993), a mistura dos materiais básicos para produção de blocos de concreto, mesmo sendo uma etapa fundamental, muitas vezes não tem merecido os cuidados adequados. A mesma é de grande importância para a uniformidade da produção. A seqüência de colocação dos materiais e o tempo adequado de mistura devem ser definidos em função do tipo de equipamento utilizado no processo, não sendo considerados válidos os procedimentos gerais recomendados. Durante a moldagem na vibro-prensa, o material destinado à moldagem dos blocos sofre compactação através de vibração e prensagem. Para garantir que os blocos de concreto obtenham o grau de compactação previsto e atendam às características de projeto, deve-se respeitar os tempos de alimentação e vibração do equipamento. A maioria das máquinas vibro-prensas, com exceção daquelas manuais de pequeno porte, possui sistemas de alimentação totalmente automatizados. Estes sistemas controlam desde o preenchimento da mistura nos moldes até o tempo necessário para adensar e liberar os blocos, como está apresentado na seqüência a seguir.

- preenchimento da gaveta alimentadora com a mistura destinada à moldagem dos blocos;
- preenchimento do molde metálico onde os blocos são moldados. Esta fase é acompanhada por vibração do molde;
- compactação dos blocos através dos extratores. Esta fase também é acompanhada de nova vibração do molde finalizando quando a altura desejada para os blocos é atingida;

- desforma dos blocos logo após o término da operação anterior. Nesta fase os extratores permanecem imóveis, enquanto o molde ascende, permitindo que os blocos permaneçam sobre o palet onde foram moldados;
- o palet com os blocos recém-moldados avança para a frente da máquina, enquanto um novo palet vazio ocupa seu lugar sob o molde;
- o molde metálico desce então para sua posição original, enquanto os extratores ascendem, preparando-se para um novo ciclo.

Em conformidade com Tango (1984) e Medeiros (1993), o concreto utilizado na produção dos blocos possui várias particularidades que o difere, em muito, do concreto plástico de uso consagrado na construção civil. Possivelmente essas diferenças de comportamento são responsáveis pelo empirismo que se vem observando no estabelecimento de traços de concreto para blocos, por parte de um número considerável de produtores de blocos. No Brasil, grande parte dos fabricantes de blocos não dispõe de um método racional para efetuar sua dosagem, sendo esta indústria caracterizada por utilizar-se de processos extremamente artesanais, baseados em grande parte na experiência dos funcionários e em uma série de erros e tentativas. Esta prática associada a meios inadequados de proporcionamento dos materiais, contribui para a adoção de elevados consumos de cimento gerando perdas desnecessárias de recursos e de produtividade.

2.10.3 Tratamento de cura para os blocos

Conforme afirmaram Medeiros e Tango (citados por SOUZA, 2001), o processo de cura corresponde a um conjunto de operações que visa proporcionar aos blocos, durante certo tempo, condições de umidade, temperatura e pressão, necessários a uma adequada reação de hidratação do cimento. Qualquer alteração nessas condições pode refletir diretamente nas características finais dos blocos de concreto. A escolha de um processo de cura adequado pode ter como resultado, dentre outros fatores, redução no consumo de cimento e no tempo necessário de cura, o que implica em um tempo menor de permanência dos blocos na fábrica. Basicamente existem dois tipos de cura, que geralmente são utilizadas na produção dos blocos de concreto: cura natural ou ao ar livre e cura em câmara a vapor. A cura natural é ainda

bastante utilizada, principalmente em situações onde as exigências de desempenho para os blocos sejam menos importantes e as condições climáticas favoreçam o rápido endurecimento do concreto. Neste tipo de cura, recomenda-se que os blocos permaneçam úmidos e protegidos do vento e da insolação direta, pelo menos durante os sete primeiros dias, para evitar a evaporação excessiva de água. A cura a vapor é o sistema de cura mais empregado na indústria de blocos de concreto. Este sistema é normalmente empregado pelos produtores de blocos que exigem de seus componentes um melhor desempenho nas primeiras idades. O ciclo de cura a vapor é variável podendo chegar a um período de tempo correspondente a 24 h.

3. MATERIAIS E METODOLOGIA

3.1 Materiais utilizados na composição dos compósitos

- Resíduos vegetais

Partículas de Eucalyptus grandis

Resíduos vegetais provenientes da espécie *Eucalyptus grandis* (Figura 3.1a), material proveniente do abate de uma árvore de 3 anos, da qual se utilizou apenas a região basal, constituindo-se em resíduos industriais fornecidos pela *International Paper*, Mogi Guaçu, SP.

Partículas de Pinus caribaea

Resíduos vegetais provenientes da espécie *Pinus caribaea* (Figura 3.1b), fornecidos pela Indústria Faber Castell. O material era proveniente de serraria situada em Prata - MG, sendo o resíduo proveniente de árvores com mais de 30 anos, destinadas à fabricação de lápis.



(a)

(b)

Figura 3.1 - Resíduos provenientes das espécies: (a) *Pinus caribaea* e (b) *Eucalyptus grandis*.

Casca de arroz

Resíduos vegetais provenientes da casca de arroz (Figura 3.2a), adquiridos na beneficiadora localizada em Salto de Itu, sendo proveniente de região de Santa Catarina.

Fibras de Sisal (Agave sisalana)

Resíduos vegetais provenientes da espécie *Agave sisalana* (Figura 3.2b), fornecidos pela fábrica de tapete localizada em Valente, Bahia (APAEB - Associação de Pequenos Agricultores da Bahia).



Figura 3.2 - Resíduos provenientes da: (a) casca de arroz e (b) espécie *Agave sisalana* (sisal).

- **Agregados minerais**

Areia fina lavada

Agregado mineral constituindo-se em areia fina lavada, proveniente da escavação do subsolo na região de Descalvado, SP.

Pó de pedra

Pó de pedra proveniente de uma pedreira da região de Paulínia.

- **Matriz composta pelo Cimento Portland**

CPH-E: cimento composto com escória de alto-forno (NBR-11578);

CPH: cimento de alto forno (NBR-5735);

CPV-ARI: cimento de alta resistência inicial (NBR-5733).

- **Polímeros derivados do petróleo, fornecidos pela Rhodia do Brasil**

Dispersão aquosa de copolímero estireno-butadieno (SBR);

Copolímero de acetato e versatato de vinila (PAV22).

- **Aditivos do tipo acelerador de pega**

Cloreto de cálcio anidro (CaCl₂).

- **Água fornecida pela rede pública**

3.1.1 Metodologia de caracterização relativa aos resíduos

Na falta da existência de um procedimento normatizado para caracterização dos resíduos de origem vegetal, buscou-se adaptar a normalização existente, ou seja, a norma NBR-7217 da ABNT, utilizada na caracterização dos agregados de origem mineral. Inicialmente, utilizou-se uma seqüência de procedimentos capaz de determinar as características que pudessem exprimir as propriedades mais expressivas e inerentes aos resíduos, no que concerne à formação dos agregados. Essas mesmas propriedades tiveram grande influência na elaboração e confecção dos compósitos, auxiliando no processo de desenvolvimento do trabalho.

Seqüência de procedimentos padronizados para a caracterização dos resíduos vegetais:

1. Coleta e separação dos resíduos;
2. Classificação granulométrica de acordo com a ABNT;
3. Tratamento químico adequado a cada um dos resíduos e secagem;
4. Determinação da massa unitária dos resíduos no estado seco e solto.

3.1.1.1 Coleta e separação dos resíduos

Os resíduos foram fornecidos ensacados pelas referidas indústrias após seus respectivos processos de produção. Desse modo, procedeu-se, inicialmente, sem nenhuma preocupação com cuidados ou metodologias especiais, simplesmente separá-los para a execução das etapas posteriores da caracterização.

3.1.1.2 Tratamento químico dos resíduos

Os resíduos vegetais que foram utilizados na formação dos compósitos necessitaram de um tratamento adequado e adaptado a cada espécie vegetal. A finalidade dos tratamentos consistiu em minimizar as incompatibilidades existentes entre o cimento e os resíduos vegetais, diminuindo a influência dos extrativos solúveis presentes nos resíduos durante o período de hidratação, a fim de conferir o melhor desempenho físico-mecânico aos compósitos.

O tratamento dos resíduos provenientes do *Eucalyptus grandis* e do *Pinus caribaea* foi feito de acordo com a metodologia recomendada por Beraldo et al. (2002), ou seja, imersão em solução de 5% de cal em relação à massa de resíduo. O procedimento consistiu na imersão dos resíduos em solução de cal, contidas em recipientes com capacidade de 100 litros, durante o período correspondente a 24 h. A mistura foi homogeneizada por meio de agitação manual até que ocorresse a dissolução total da cal em relação à água adicionada. Logo após esse período, a solução foi escorrida e, em seguida, o resíduo tratado foi separado e exposto ao sol para secagem por um período de aproximadamente três dias. Analogamente ao procedimento anterior, o tratamento da casca de arroz foi feito de acordo com a metodologia proposta por Zucco (1999), que consistiu na imersão da casca de arroz em solução de 5% de cal em relação à massa de resíduo e a proporção em volume entre a solução de cal e a casca de arroz de 10:1, correspondendo a uma concentração da solução de cal em 0,5%. No caso do tratamento da casca de arroz, observou-se que o tempo de imersão dos resíduos não pode ultrapassar o período de 24 h sob o risco de ocorrência de início de deterioração desses resíduos. Por essa razão, após decorrido o tempo correspondente a 24 h de imersão, os resíduos foram imediatamente separados da solução. O tratamento das fibras de sisal foi feito em concordância com a metodologia proposta por Beraldo e Freitas (2003), que consistiu na lavagem do resíduo em água na temperatura ambiente através da imersão durante um período de 24 h. Após decorrido o período de imersão observou-se que boa parte dos extrativos e do corante, presentes nas fibras, ficaram diluídos na água. Apesar das fibras serem provenientes do produto final do processo de fabricação de tapetes, envolvendo atividade industrial, considerou-se, por essa razão, que não houve influência química nas misturas, devido à lavagem das fibras em água.

3.1.1.3 Secagem pelo método da estufa

Após a secagem ao ar e, antes da sua utilização na composição das misturas, foram coletadas amostras para se determinar o teor de umidade, ainda restante, através do método da estufa, adotando-se temperatura em torno de 110 °C até verificar-se a constância em massa. O cálculo da umidade foi determinado com base na metodologia utilizada para determinação do teor de umidade em cavacos de madeira (NBR 14929), de acordo com a Equação 3.1.

$$Teor_{UMIDADE} = \frac{(Massa_{\acute{U}MIDA} - Massa_{SECA})}{Massa_{SECA}} \cdot 100(\%) \quad (3.1)$$

3.1.1.4 Composição granulométrica

A composição granulométrica dos resíduos foi feita de acordo com a norma NBR-7217 da ABNT, que define as frações granulométricas do agregado miúdo, visto que não existe normalização específica para os agregados de origem vegetal. Inicialmente, pesou-se 100 g de cada resíduo seco, submetendo-os ao processo de peneiramento utilizando-se um agitador mecânico de peneiras durante um período de aproximadamente 20 minutos, segundo a série normal de peneiras da ABNT, utilizando-se as malhas com as aberturas #4,76 mm, #2,38 mm, #1,19 mm, #0,59 mm, #0,297 mm, #0,149 mm e fundo. Após a execução do peneiramento pelo tempo adotado pesou-se a massa correspondente ao material retido em cada peneira. Tal procedimento foi realizado em 3 repetições, cuja média dos resultados estão apresentados no capítulo 4, sendo representados graficamente em escala logarítmica.

3.1.1.5 Determinação da massa unitária dos resíduos

A massa unitária no estado seco e solto foi determinada de acordo com a norma NBR-7251, através da utilização de um recipiente paralelepípedo de material metálico com volume de aproximadamente 20 dm³, considerando-se que o diâmetro máximo do agregado (no caso o diâmetro do resíduo) está entre 4,8 mm e 5,0 mm. O recipiente foi preenchido pela amostra de cada resíduo, lançado de uma altura de 10 cm a 12 cm do topo do recipiente, até completar seu

volume total. A superfície foi regularizada por meio de uma régua metálica e, em seguida, efetuou-se a pesagem da massa de resíduo contida nesse volume. Tal procedimento foi executado em 3 repetições, sendo o resultado da massa unitária no estado seco e solto a média dos resultados obtidos, cujos valores estão apresentados no capítulo 4.

3.1.2 Índices para caracterização dos agregados minerais, cimentos e polímeros

Composição granulométrica e massa unitária dos agregados minerais

Características físicas e mecânicas dos cimentos

Características físicas e mecânicas dos polímeros

3.1.2.1 Composição granulométrica dos agregados minerais

Analogamente à determinação da distribuição em tamanho das partículas dos resíduos, também se procedeu com relação aos agregados minerais, pó de pedra e areia fina lavada, com a determinação da distribuição granulométrica. Ou seja, foi determinado de acordo com a norma NBR-7217 da ABNT, que define as frações granulométricas do agregado miúdo, sendo a média dos resultados e os gráficos das curvas granulométricas apresentados no capítulo 4.

3.1.2.2 Determinação da massa unitária dos agregados minerais

Analogamente à determinação da massa unitária no estado seco e solto dos resíduos, foram determinadas as massas unitárias dos agregados minerais, pó de pedra e areia fina lavada. Ou seja, foi determinado de acordo com a norma NBR-7251 da ABNT que definem as frações granulométricas do agregado miúdo, sendo a média dos resultados apresentados no capítulo 4.

3.1.2.3 Tipos e características dos cimentos utilizados

Inicialmente, na escolha do tipo de cimento, optou-se pelos tipos disponíveis no mercado; desse modo, utilizou-se em uma primeira etapa da pesquisa o cimento composto com escória granulada de alto-forno (CPII-E) e o cimento de alto-forno (CPIII). Porém, em razão da necessidade de obtenção de determinadas propriedades e características para os compósitos, tais como, redução do tempo de pega da mistura, alta resistência mecânica nas primeiras

idades e a rápida desforma dos elementos, foi utilizado em todas as misturas o cimento de alta resistência inicial (CPV-ARI).

A Tabela 3.1 resume as composições em massa para os tipos de cimento utilizados, de acordo com as normas técnicas da ABNT.

Tabela 3.1 - Composição dos tipos de cimento utilizados de acordo com a ABNT.

Fonte: adaptado da tabela de classificação de cimento fornecida pela ABCP.

COMPOSIÇÃO (% em massa)					
Tipo de cimento	Sigla	Clínquer + gesso	Material carbonático	Escória granulada de alto-forno	Norma (ABNT)
Alto-forno	CPIII	65% a 25%	0% a 5%	35% a 70%	NBR 5735
Composto com escória	CPII-E	94% a 56%	0% a 10%	6% a 34%	NBR 11578
Alta resistência inicial	CPV-ARI	100% a 95%	0% a 5%	-	NBR 5733

Os cimentos do tipo CPII-E e CPIII foram utilizados para uma avaliação inicial com relação ao seu grau de inibição quando da mistura com os resíduos; como não foram utilizados nas misturas dos compósitos não foram coletadas suas características técnicas. O cimento de alta resistência inicial (CPV-ARI) foi adquirido através de um distribuidor local, onde todas as informações técnicas, pertinentes ao respectivo lote, foram fornecidas pelo próprio fabricante. Tais informações estão apresentadas de acordo com o relatório de análise de produto expedido (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 - Características físicas do cimento utilizado (CPV-ARI).

Fonte: Lafarge do Brasil - cimento CPV-ARI "Campeão".

CIMENTO DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL - CPV-ARI							Data da amostra 27/08/2004	Data da moldagem 30/08/2004	
COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)									
SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	SO₃	Na₂O	K₂O	CaO livre	CO₂
19,22	4,90	3,08	62,90	1,89	3,71	0,00	1,18	1,30	0,00
CARACTERÍSTICAS COMPLEMENTARES									
#200 (%)	Blaine (cm²/g)	Expansão a quente (mm)			Água (%)	Início de Pega (min)			
0,00	479,0	0,00			0,32	130,0			

A evolução da resistência determinada pela empresa fabricante, segundo solicitações feitas ao departamento técnico responsável, está apresentada na Figura 3.3. Através da figura pode-se observar um aumento significativo da resistência à compressão nos 7 primeiros dias de 45,8 MPa, correspondendo praticamente a 94% da resistência obtida aos 28 dias (48,8 MPa).

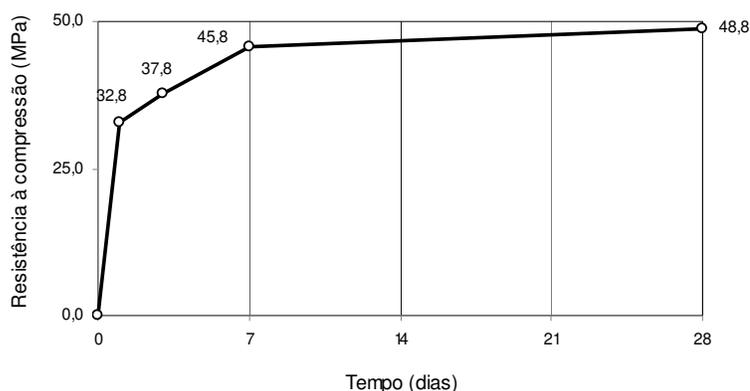


Figura 3.3 - Evolução da resistência à compressão com a idade do cimento CPV-ARI.

Fonte: Lafarge do Brasil - cimento CPV-ARI "Campeão".

3.1.2.4 Tipos e características dos polímeros utilizados

Ao contrário do cimento, os polímeros representam um aumento substancial nos custos do produto final e, por essa razão, devem ser utilizados somente em aplicações que justifiquem a obtenção de propriedades diferenciadas. Os polímeros utilizados para compor as misturas dos compósitos foram fornecidos pela empresa Rhodia do Brasil, sendo denominados, comercialmente, de *Rhoximat SB 112* e *Rhoximat PAV 22 B*. Esses materiais se constituem, respectivamente, em dispersão aquosa de copolímero estireno e butadieno (SBR) e copolímero de acetato e versatato de vinila (PAV 22). As principais informações técnicas de caracterização estão apresentadas nas Tabelas 3.3 e 3.4.

Tabela 3.3 - Propriedades do polímero SBR (estireno e butadieno).

Fonte: Rhodia do Brasil.

<i>Diâmetro da partícula</i> (μm)	<i>Viscosidade Brookfield</i> (fuso 2, 50rpm, 23 °C) mPa.s	<i>pH</i>	<i>Teor de sólidos</i> (m/m)	<i>Massa específica</i> (g/cm^3)
160	75 - 125	7,0 - 8,0	49% - 51%	1,02

Nota: temperatura de decomposição 320 °C (após evaporação da água).

Tabela 3.4 - Propriedades do polímero PAV 22 (acetato e versatato de vinila).

Fonte: Rhodia do Brasil.

<i>Diâmetro da partícula</i> (μm)	<i>Viscosidade Brookfield</i> RVT (mPa.s)	<i>pH</i>	<i>Teor de sólidos</i> (m/m)	<i>Massa específica</i> (g/cm^3)
400	200 - 400	4,5 - 6,5	98% - 100%	0,45 - 0,60

Nota: temperatura de decomposição 200 °C.

O polímero SBR (estireno e butadieno) é fornecido sob a forma de emulsão; ao contrário, o polímero PAV 22 (acetato e versatato de vinila), sob a forma de pó, sendo necessária sua dispersão na água de amassamento da mistura. As porcentagens utilizadas, em relação à massa de cimento, foram de 3%, 5%, 7% e 9% para ambos os polímeros.

3.2 Processo de caracterização dos compósitos

Em vista das incertezas relacionadas às inúmeras e eventuais combinações entre os vários tipos de cimentos e os resíduos vegetais adotados, optou-se pela utilização de uma metodologia de avaliação baseada na evolução do calor de hidratação do cimento. Esse procedimento, por si só, não garante a determinação do grau de compatibilidade entre esses materiais, podendo-se dizer que constitui em uma condição necessária, porém, não suficiente. Os resultados provenientes dos ensaios mecânicos, que podem ser determinados antes ou depois deste procedimento, complementam esta avaliação. Nesta etapa inicial do processo de caracterização este procedimento representou um papel importante na tomadas de decisão, quer seja pela escolha do tipo de cimento, e pela orientação em relação ao tratamento mais adequado dos resíduos, ou pela definição da proporção do resíduo em relação ao cimento.

3.2.1 Determinação do grau de compatibilidade entre o resíduo vegetal e o cimento através do monitoramento da temperatura do calor de hidratação do cimento

O grau de compatibilidade das misturas foi avaliado através da metodologia de determinação da curva de hidratação do cimento, que consistiu em determinar a elevação da temperatura resultante da reação de hidratação da pasta de cimento e da pasta de cimento com os resíduos, em função do tempo. Em adaptação à metodologia proposta utilizou-se na mistura o material

passante na peneira #100 (0,149 mm), de acordo com Zucco (1999), na condição seca, ou seja, permanecendo em estufa até a obtenção da constância de massa, correspondendo a um período de aproximadamente 24 h a 110 °C. Inicialmente a composição da pasta de cimento com resíduos foi preparada conforme procedimento recomendado por Moslemi et al. (1983), de acordo com a Equação 3.2:

$$Ma = Mc \cdot 0,25 + Mm \cdot K \quad (\text{g}) \quad (3.2)$$

onde:

Mc : massa de cimento (200 g);

Mm : massa do resíduo (15 g);

Ma : massa de água destilada;

K : coeficiente em função da malha (#) das partículas passantes.

como:

$K = 2,5$ para partículas passantes na #100

tem-se:

$$Ma = 200 \cdot 0,25 + 15 \cdot 2,5 = 87,5 \text{ g}$$

A pasta pura foi preparada na proporção correspondendo ao valor de $A/C=0,25$ (relação água/cimento), ou seja, a mínima quantidade de água para hidratação do cimento (NEVILLE, 1982). Considerando-se a distribuição em tamanho das partículas dos resíduos vegetais como o material passante na #100, o uso dos resíduos sem tratamento e com tratamento, a utilização de aditivo acelerador de pega CaCl_2 e do polímero emulsionável estireno-butadieno (SBR), as composições foram padronizadas de acordo com as combinações e quantidades descritas a seguir. Este procedimento visou a avaliação da compatibilidade da mistura entre os resíduos e os cimentos, levando-se em conta todas as possibilidades possíveis de combinações dos componentes envolvidos.

Composições propostas:

- 1º tipo:** pasta sem adição do resíduo (pasta pura)
Cimento (200 g) + Água (50 g)
- 2º tipo:** pasta com adição do resíduo (com e sem tratamento)
Cimento (200 g) + Resíduo (15 g) + Água (87,5 g)
- 3º tipo:** pasta com adição do resíduo tratado e acelerador de pega (CaCl_2)
Cimento (200 g) + Resíduo (15 g) + Água (87,5 g) + Acelerador de pega (6 g)
- 4º tipo:** pasta com adição do resíduo tratado e polímero (SBR)
Cimento (200 g) + Resíduo (15 g) + Água (87,5 g) + Polímero (10 g)

Tanto as informações pesquisadas sobre os tratamentos dos resíduos, como a definição do padrão de composições (pasta pura e pasta com adição de resíduos), possibilitaram o planejamento dos ensaios nos quais se determinaram as curvas da evolução do calor de hidratação das misturas ao longo do tempo. Esse planejamento incorporou as possíveis combinações que acabaram por envolver os tipos de cimento, aceleradores de pega, os polímeros e os resíduos vegetais nas diversas condições físicas. No caso dos resíduos, além do que recomenda a literatura, utilizou-se na mistura sua fração normal, ou seja, a distribuição em tamanho das partículas para simular as condições de serviço do compósito nos traços propostos. Os fluxogramas de acordo com as Figuras 3.4 e 3.5 apresentam um resumo dessas combinações.

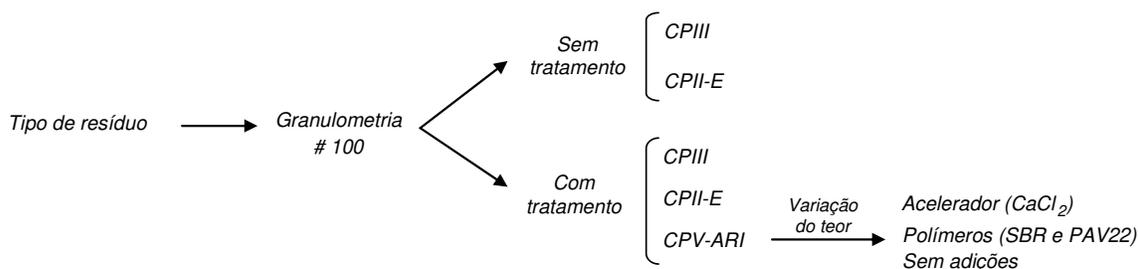


Figura 3.4 - Combinações da biomassa vegetal com granulometria #100: sem tratamento e os cimentos CII e CII-E; com tratamento e os cimentos CIII, CII-E e CPV-ARI sem adições e com adição de CaCl_2 e SBR.

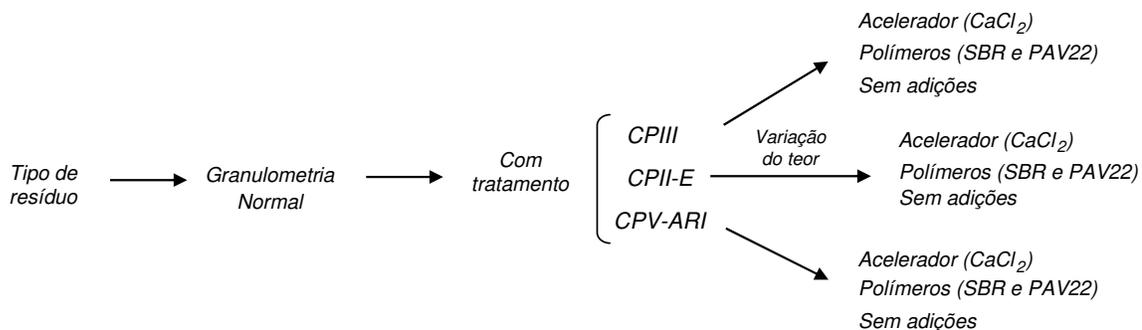


Figura 3.5 - Combinações da biomassa vegetal com granulometria normal: com tratamento e os cimentos CIII, CII-E; CPV-ARI, sem adições, e com adição de CaCl_2 e SBR.

3.2.1.1 Determinação das curvas de calor de hidratação e preparação das amostras

Os ensaios para a determinação da evolução do calor de hidratação foram realizados no Laboratório de Materiais e Estruturas da Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp. Os procedimentos foram realizados conforme a norma NBR-12006, com utilização de um calorímetro semi-adiabático. Em cada um dos recipientes foram depositadas as cápsulas contendo as misturas, onde no interior das mesmas foram inseridos sensores de temperatura, termopares do tipo Pt 100, responsáveis pela coleta contínua de temperatura. O sistema contou com dispositivo dotado de um sistema de aquisição de dados *Field Logger Novus* conectados aos respectivos termopares (Figura 3.6).

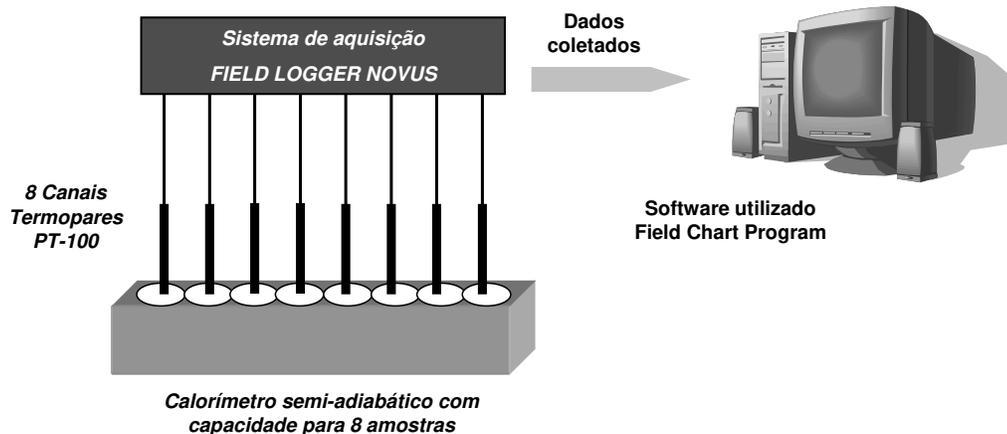


Figura 3.6 - Esquema do dispositivo de aquisição da temperatura x tempo das misturas.

As temperaturas foram registradas a cada 5 minutos e transportadas ao microcomputador por meio do programa *Field Chart*. Esse sistema, composto por 8 canais, possibilitou a aquisição simultânea de temperatura em 8 amostras distintas durante um período de 24 h. Após a coleta dos dados correlacionou-se o valor da temperatura e o tempo de aquisição, compondo uma tabela cujos pares de coordenadas originaram as curvas de temperatura (°C) x tempo (h). A análise criteriosa do período de variação da temperatura de hidratação, representada através dos gráficos, possibilitou a avaliação do efeito inibitório do resíduo em relação à pega do cimento. Desse modo, a análise do grau de compatibilidade das misturas foi determinada considerando-se três metodologias diferentes, porém, utilizando-se como referência comum a curva de hidratação das misturas. A primeira foi relacionada à curva dos resíduos vegetais, considerados altamente compatíveis quando apresentem uma temperatura máxima superior a 60 °C, e incompatíveis quando não excedam a temperatura de 50 °C. A segunda metodologia se relacionou ao cálculo do índice de inibição (I) do resíduo vegetal na pega do cimento, que leva em consideração o tempo de obtenção da temperatura máxima, o valor da temperatura máxima obtida e a inclinação da curva de hidratação. A terceira metodologia foi através do cálculo do fator CA (HACHMI e MOSLEMI,1989), correspondente à razão entre a área formada abaixo da curva de hidratação da mistura entre o resíduo e o cimento em relação à área correspondente à da pasta de cimento. Essas metodologias determinaram parâmetros que possibilitaram determinar as misturas mais adequadas entre o resíduo e o cimento e, comparativamente, indicam aquelas que foram mais eficientes na formação desses compósitos. Entretanto, estas metodologias representam uma condição necessária, porém, não suficiente, daí a necessidade de serem realizados os ensaios que complementem informações a respeito do comportamento físico-mecânico do compósito.

Tanto as variáveis da referida equação do índice de inibição (I), quanto o cálculo das áreas abaixo das curvas foram determinadas através de algoritmos confeccionados com auxílio das várias funções existentes no *software Excel*. O critério adotado para a classificação do resíduo quanto à sua compatibilidade, em conformidade com as metodologias propostas, foi feito de acordo com uma ordem eliminatória, considerando-se a temperatura máxima de hidratação, o fator CA (razão da área sob a curva de hidratação da mistura com os resíduos e a área sob a curva da pasta de cimento) e o valor do índice de inibição.

3.2.2 Obtenção dos traços de trabalho para confecção dos blocos vazados

A definição dos traços de trabalho das misturas teve como ponto de partida os traços já utilizados por outros pesquisadores, os quais sofreram modificações significativas em relação aos teores dos componentes utilizados em função da influência de determinados parâmetros, citados a seguir:

- a) *Estudo da evolução do calor de hidratação das misturas;*
- b) *Proporcionamento adequado para confecção dos blocos vazados através do traço em volume 1:3:2 (cimento: areia e pó de pedra: resíduo vegetal);*
- c) *Massa unitária e distribuição granulométrica dos componentes;*
- d) *Resistência mecânica dos compósitos através de pré-ensaios.*

Em vista da grande disponibilidade desses resíduos, decorrente da intensa atividade agroindustrial existente e de contribuir para um programa de reciclagem, buscou-se otimizar o aproveitamento do teor de resíduo a ser incorporado nas misturas. Ao mesmo tempo, buscou-se obter um compósito com propriedades específicas, que fossem tecnicamente adequadas aos moldes da fabricação industrial dos materiais de construção e, na medida do possível, sem acarretar em prejuízo das propriedades do produto final. A Tabela 3.5 apresenta os traços iniciais provenientes da literatura e suas modificações.

Tabela 3.5 - Modificação dos traços em massa (cimento: resíduo: água).

RESÍDUO	TRAÇO INICIAL	REFERÊNCIA	TRAÇO MODIFICADO
<i>Eucalyptus grandis</i>	1:0,375:0,75	BERALDO et al. (2002)	1:0,36:0,84
<i>Pinus caribaea</i>	1:0,375:0,75	BERALDO et al. (2002)	1:0,36:1,08
<i>Casca de arroz</i>	1:0,36:0,50	ZUCCO (1999)	1:0,28:0,65
<i>Agave sisalana (Sisal)</i>	1:0,108:0,48	BERALDO e FREITAS (2003)	1:0,08:0,60

Os traços completos dos compósitos contendo os resíduos estão indicados na Tabela 3.6, onde foram utilizadas duas opções de adição de polímero (SBR e PAV22) para cada mistura, com variação dos teores de 3%, 5%, 7% e 9% em relação ao teor de cimento. Todos esses traços foram utilizados como fonte de orientação para a confecção das misturas feitas em laboratório.

Tabela 3.6 - Teores em massa dos componentes para cada compósito à base de resíduos.

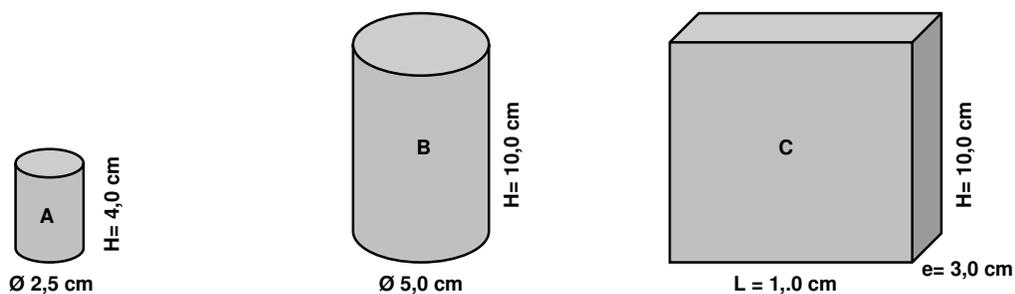
tipo de compósito	TEOR EM MASSA DOS COMPONENTES						
	cimento	resíduo vegetal	agregados minerais		Adição de polímero 1ª opção: SBR 2ª opção: PAV22	Consumo de cimento (kg/m ³)	água
			areia	pó de pedra			
Compósitos de <i>Eucalyptus grandis</i>	1	0,36	1,50	3,00	0% - 3% - 5% - 7% e 9%	241	0,84
Compósitos de <i>Pinus caribaea</i>	1	0,36	1,50	3,00	0% - 3% - 5% - 7% e 9%	241	1,08
Compósitos de Casca de arroz	1	0,28	1,50	3,00	0% - 3% - 5% - 7% e 9%	268	0,65
Compósitos de <i>Agave sisalana (sisal)</i>	1	0,08	1,50	3,00	0% - 3% - 5% - 7% e 9%	354	0,60

Inicialmente, os teores de água foram determinados por meio do adensamento manual de uma porção da mistura colocada na palma da mão (teste da mão). A partir daí observou-se a máxima compactação da mistura que ocorresse perda da água de amassamento. Nesse procedimento foram determinados teores diferentes para cada espécie decorrente das suas características físicas, em especial, a capacidade de absorção de cada resíduo vegetal. Todas as misturas foram executadas de acordo com os teores da Tabela 3.6, sendo utilizadas para cada ensaio as padronizações previstas nas normas técnicas da ABNT, conforme metodologia adotada e em razão das diferentes formas e dimensões dos moldes utilizados. Cabe aqui ressaltar que, apesar de ter sido determinado o índice da consistência das misturas, de acordo com a norma NBR 7215, o mesmo não foi adequado em razão das propriedades inerentes aos resíduos vegetais, tendo em vista que, em alguns casos, o aumento do teor de água acabou por diminuir o valor do índice obtido.

3.2.2.1 Procedimento para elaboração das misturas dos componentes, moldagem e cura dos compósitos

Os procedimentos de mistura dos componentes foram realizados conforme padronização prescrita pela normalização de argamassas de acordo com a norma NBR-13276, excetuando-se alguns procedimentos adaptados, decorrentes das características inerentes aos resíduos vegetais e também da mistura produzida com os outros componentes da mistura (cimento, polímero, areia lavada e pó de pedra).

Inicialmente realizou-se a pesagem dos componentes de acordo com os quantitativos da Tabela 3.6, correspondente ao traço em massa. Deve ser observado que com relação à massa dos agregados minerais, que a mistura entre a areia fina e o pó de pedra, foi utilizado uma proporção de 1/3 para 2/3. A dosagem dos polímeros, em especial, o estireno-butadieno (SBR), pelo fato de seu fornecimento ser na forma emulsionável, com 50% de teor de sólidos presentes na emulsão polimérica, foi descontado 50% do teor da água de amassamento. A homogeneização das misturas foi feita em argamassadeira mecânica, marca *Solotest*, em duas etapas, ou seja, inicialmente com a mistura anidra (sem a presença de água), e após, com a adição da água de amassamento. Na mistura anidra foi empregado um tempo de agitação correspondente a 1 min; após a adição de água agitou-se a mistura por mais 2 min, totalizando um período de 3 min. Após a execução da mistura observou-se a manutenção do teor de água presente nas mesmas; em razão disto, no período entre um ensaio e outro, foi importante cobrir a argamassadeira com um pano úmido evitando-se a perda de água por evaporação. Nas misturas contendo resíduos de sisal não foi possível utilizar a argamassadeira mecânica, pois as fibras acabavam por emperrar as pás do equipamento interrompendo o processo de mistura. Como solução adotou-se uma furadeira com batedores adaptados no lugar das brocas, o que rendeu um resultado satisfatório, possivelmente, em razão do aumento da velocidade e/ou pelo modo como os resíduos eram dispersos por esses batedores. As moldagens foram padronizadas mesmo considerando-se os vários formatos dos moldes (Figura 3.7), produzindo amostras com dimensões distintas e apropriadas à metodologia adotada.



(A) Ensaios de porosidade e permeabilidade

(B) Ensaios físicos e mecânicos

(C) Ensaios de condutividade térmica

Figura 3.7 - Amostras utilizadas de acordo com a metodologia adotada e seus respectivos ensaios: (A) ensaios de porosidade e permeabilidade, (B) ensaios físicos e mecânicos e (C) ensaios de condutividade térmica.

Torna-se importante observar que, pelo fato de possuírem densidades diferentes, em vista da energia de compactação aplicada, as propriedades determinadas foram comparadas somente quando considerou-se apenas um tipo de formato e dimensão de amostra. No caso dos corpos-de-prova do tipo (B), cilíndricos com diâmetro de 5 cm e altura de 10 cm, os resultados correlacionados foram os de resistência mecânica, absorção de água por capilaridade e ultrassom. Para os tipos de amostra (A) e (C) foi avaliado o efeito da variação do teor de polímero somente com relação a cada propriedade, especificamente. Independentemente do tipo de molde utilizado todas as amostras foram moldadas em três camadas da mistura, com espessuras aproximadamente iguais, com aplicação de 20 (vinte) golpes em cada camada, utilizando-se soquete adequado a cada tipo de amostra (em peso e formato). Logo após a moldagem foram providenciadas proteções plásticas com o objetivo de evitar a evaporação da água de amassamento da mistura. As amostras foram submetidas ao tratamento de cura úmida em uma câmara com 90% em média de umidade relativa do ar e, em seguida, foram desformadas no segundo dia, permanecendo na câmara até completar 7 dias. Após esse período, as amostras foram deixadas em ambiente de laboratório até os 28 dias (Figura 3.8).



Figura 3.8 - Amostras (A), (B) e (C) na etapa de cura em ambiente de laboratório (a) e (b).

3.2.3 Caracterização física e mecânica dos compósitos

A metodologia adotada para a caracterização dos compósitos compreendeu as análises da mistura no estado fresco, por intermédio dos ensaios de consistência e retenção de água, e no estado endurecido, através do monitoramento da resistência à compressão, do ensaio de ultra-

som, da determinação da resistência à compressão e da resistência à tração na compressão diametral e da absorção de água por capilaridade.

3.2.3.1 Determinação do índice de retenção de água dos compósitos

Com o objetivo de avaliar a capacidade da mistura fresca dos compósitos em manter o teor de água de amassamento com a adição do polímero, logo após mistura dos componentes buscou-se aplicar os procedimentos baseados na norma NBR-13277. Os ensaios para a determinação dos índices de retenção de água foram executados no Laboratório de Materiais e Estruturas da Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp, utilizando-se os equipamentos conforme Figura 3.9.



Figura 3.9 - Dispositivos do ensaio de retenção de água de acordo com a norma NBR-13277.

- molde cilíndrico de aço, com 110 mm de diâmetro e 25 mm de altura (dimensões internas), parede e base com 5 mm de espessura;
- placa circular de aço, rígida e plana, com 110 mm de diâmetro 5 mm de espessura e usinagem lisa em uma das faces;
- peso com 2,0 kgf constituído de cilindro maciço de metal e com 110 mm de diâmetro;
- espátula constituída de lâmina de aço rígida com borda reta, lisa e chanfrada com comprimento de pelo menos 110 mm;
- discos de papel-filtro faixa branca com 85 g/cm^2 e com 110 mm de diâmetro;
- gaze de tecido de algodão, tipo cirúrgica de trama aberta, cortada em quadrados de 110 mm de arestas.

Inicialmente, pesou-se o molde (M_m) e 12 discos de papel-filtro secos (M_{se}). Em seguida, colocou-se a mistura no molde cilíndrico, através de uma espátula, com 10 incrementos aproximadamente iguais até formar um pequeno excesso. A mistura foi regularizada através

da espátula apoiando-a sobre a borda do molde formando 45° em relação à superfície da mistura, fazendo movimento de vai-e-vem em toda a superfície e numa única passada para eliminar apenas o excesso. Em seguida, passou-se novamente a espátula no sentido contrário, formando um ângulo bem menor com a superfície, no sentido de alisá-la. As bordas do molde foram limpas antes da pesagem (M_{ma}); logo após, colocou-se sobre a superfície da mistura duas telas de gaze, o conjunto com 12 discos de papel-filtro e a placa rígida, onde se aplicou, centralizadamente, o peso de 2,0 kgf acionando imediatamente o cronômetro. Após 2 min retirou-se o peso e a placa base, removeu-se o conjunto de papéis-filtro e, em seguida, pesou-se rapidamente a massa dos discos molhados (M_f). O cálculo do índice de retenção de água (R_a) foi feito através da Equação 3.3:

$$R_a = \left[1 - \frac{(M_f - M_{se})}{AF \cdot (M_{ma} - M_m)} \right] \times 100 \quad (3.3)$$

onde,

R_a : índice de retenção de água (%);

AF : fator água/massa fresca;

M_f : massa do conjunto de discos molhados de papel-filtro (g);

M_{se} : massa do conjunto de discos secos (g);

M_{ma} : massa do molde com a mistura (g);

M_m : massa do molde vazio (g).

3.2.3.2 Monitoramento do compósito através do ultra-som durante o endurecimento

Os ensaios para aferição da velocidade do pulso ultra-sônico (VPU) foram realizados no Laboratório de Materiais e Estruturas da Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp, buscando-se obter uma correlação entre a resistência mecânica e a velocidade do pulso ultra-sônico (ASTM-C 597-83, 1991). As amostras foram monitoradas através das medições do tempo de propagação da onda durante um período correspondente a 28 dias. Para tal, utilizou-se o equipamento *Ultrasonic Tester*, modelo BP7 da *Steinkamp*, com transdutores de seção exponencial de 45 kHz de frequência de ressonância. Para cada traço de trabalho avaliou-se a velocidade média de propagação da onda ultra-sônica em três repetições (3 amostras).

Inicialmente os ensaios foram realizados em amostras cilíndricas nas dimensões 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, posicionando-se os sensores ortogonalmente em relação às faces diametrais no ponto central do círculo, como pode ser observado na Figura 3.10.

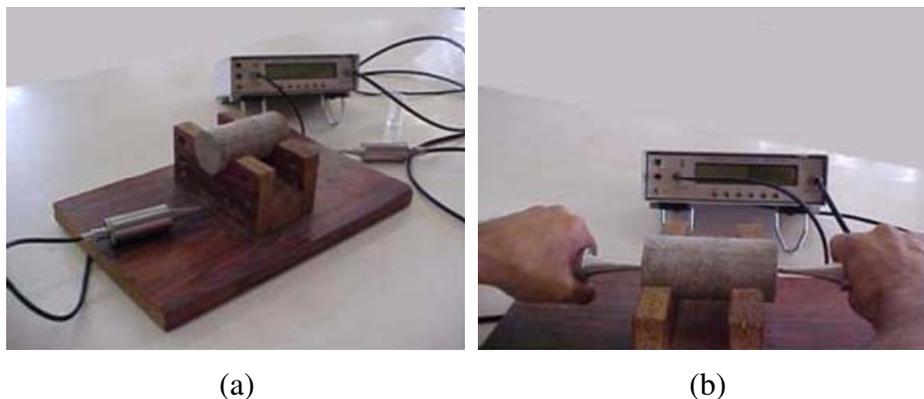


Figura 3.10 - Monitoramento com dispositivo de medição da velocidade do pulso ultra-sônico (VPU) em amostras cilíndricas.

(a) dispositivo de medição e apoio dos corpos-de-prova. (b) ensaio.

Além dessas amostras também foram monitorados os blocos vazados (Figura 3.11) que foram moldados na fábrica de pré-moldados *CIMBAC*. Para este tipo de amostra recomenda-se que os pontos a serem aferidos devam ser aqueles que possuam a direção de maior rigidez do elemento. Neste caso, foram evitados os pontos cuja direção da onda pudesse interceptar os espaços vazios dos blocos. Para esta metodologia foram escolhidos 3 conjuntos de pontos distribuídos em 3 possíveis direções, ou seja, longitudinal, transversal e perpendicular.

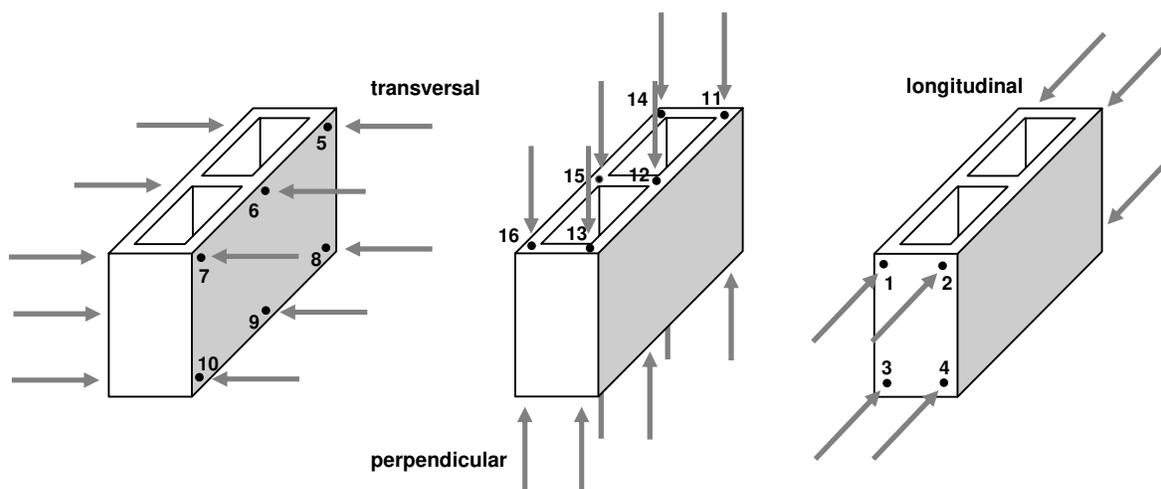


Figura 3.11 - Monitoramento da velocidade do pulso ultra-sônico em blocos vazados.

3.2.3.3 Determinação da resistência à compressão dos compósitos

Os ensaios para a determinação da resistência à compressão dos compósitos foram realizados no laboratório de materiais da Rhodia do Brasil. O método compreende a determinação da resistência à compressão, de acordo com a norma NBR-7215, de corpos-de-prova cilíndricos (5 cm de diâmetro e 10 cm de altura); essas amostras foram elaboradas com as misturas de acordo com a Tabela 3.6 (compósitos à base de resíduos). O preparo das misturas foi efetuado por meio de uma argamassadeira mecânica e as mesmas foram compactadas manualmente em um molde, por um procedimento normalizado, ou seja, 4 camadas com espessuras aproximadamente iguais com 20 golpes cada camada. Uma camada plástica foi colocada em cada molde e fixada com fita crepe para evitar perda de água por evaporação. Os moldes com as misturas foram colocados em câmara úmida, por um período de 24 h, sendo desmoldados após esse período, e colocadas em laboratório onde esses corpos-de-prova permaneceram por 7 dias. Essas amostras foram capeadas nos topos e bases com a mistura de enxofre a quente, de acordo com procedimento padronizado por norma. Na idade de 7 dias os corpos-de-prova foram submetidos ao ensaio de compressão axial até que ocorresse sua ruptura final, inicialmente, colocando-o diretamente sobre o prato inferior da prensa, de maneira que ficasse centrado em relação ao eixo de carregamento (Figura 3.12). O cálculo da resistência à compressão, em megapascals (MPa), de cada corpo-de-prova, foi feito dividindo-se a carga de ruptura pela área da seção transversal do corpo-de-prova. Para cada traço das misturas foram realizados 3 ensaios ou repetições.



Figura 3.12 - Esforços de compressão axial simples em amostras cilíndricas (a) e (b).

3.2.3.4 Determinação da absorção de água por capilaridade

Os ensaios de absorção de água por capilaridade foram realizados no Laboratório de Materiais e Estruturas da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas. Os procedimentos dos ensaios estão baseados na metodologia em conformidade com Camarini et al. (1999) e por meio da norma NBR-9779 (Figura 3.13).



Figura 3.13 - Execução do ensaio de absorção de água por capilaridade dos compósitos.

A preparação das amostras utilizadas foi análoga ao procedimento adotado nos ensaios mecânicos, porém, em complementação, após os 28 dias as amostras foram colocadas em estufa, a uma temperatura de 110 ± 5 °C, para secagem até se obter massa constante (condição seca). As faces laterais das amostras foram protegidas com a aplicação de uma película de parafina, para evitar tanto a evaporação como a penetração de água e direcionar, obrigatoriamente, o fluxo em um único sentido. A partir desta etapa os corpos-de-prova cilíndricos (5 cm de diâmetro e 10 cm de altura) foram colocados parcialmente imersos, correspondendo a 1,0 cm de profundidade, em um recipiente com água e mantendo o nível constante. Em sala apropriada e climatizada a 22 °C, o ensaio teve a duração de 24 h, com pesagens efetuadas seqüencialmente após decorridos: 1/12 h (5 min), 1/6 h (10 min), 1/4 h (15 min), 1/2 h (30 min), 3/4 h (45 min), 1 h, 2 h, 3 h, 4 h, 6 h e 24 h. A massa de água absorvida por amostra foi obtida através dessas sucessivas pesagens, eliminando-se, a cada medida, o excesso de água retido na superfície inferior da amostra, através do uso de um pano úmido. Após o ensaio, os corpos-de-prova foram rompidos em duas metades, observando-se a altura alcançada pela penetração da água, após o período correspondente a 24 h, de acordo com a metodologia adotada.

3.2.3.5 Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido

Os ensaios para determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido foram realizados no Laboratório de Materiais e Estruturas da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas. Os procedimentos foram feitos em conformidade com a norma NBR-13280, sendo os dispositivos necessários para a execução do ensaio:

- Balança com resolução de 0,1 g e capacidade mínima de 1000 g;
- Paquímetro com resolução de 0,1 mm;
- Moldes cilíndricos com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura;
- Misturador mecânico (Solotest);
- Soquete metálico;
- Espátula.

A preparação das amostras utilizadas foi análoga ao procedimento adotado nos ensaios mecânicos, porém, em complementação, após os 28 dias as amostras foram colocadas em estufa, a uma temperatura de (110 ± 5) °C, onde permaneceram para secagem até constância de massa. Os corpos-de-prova foram retirados da estufa e deixados para esfriar até alcançarem a temperatura ambiente. Com auxílio do paquímetro determinou-se o diâmetro do corpo-de-prova em duas posições ortogonais no seu terço médio e a sua altura em três pontos diferentes. Pesou-se o corpo-de-prova na balança com resolução de 0,1 g e registrou-se sua massa (M) em g. Os resultados foram determinados, inicialmente, através do cálculo do volume do corpo-de-prova, em cm^3 , a partir das médias das medidas do diâmetro (D), em cm, e da altura (h), em cm. O cálculo e registro do valor da densidade de massa aparente (γ_{ap}), em kg/m^3 , a partir da Equação 3.5.

$$\gamma_{ap} = 1000 \cdot \frac{M}{V} \quad (3.5)$$

onde,

γ_{ap} : densidade de massa aparente (kg/m^3);

M : massa do corpo-de-prova (g);

V : volume do corpo-de-prova (cm^3).

3.2.4 Metodologia específica para caracterização final dos compósitos

O procedimento de caracterização final dos compósitos consistiu em determinar parâmetros específicos, cujos valores pudessem fornecer informações relativas às propriedades desses materiais. Nas condições de serviço, durante sua vida útil para uma dada aplicação, inúmeros fatores influenciam o comportamento dos compósitos. Por essa razão, foram adotadas metodologias específicas para a obtenção de determinadas propriedades. Com este intuito, determinou-se a condutividade térmica, o índice de porosidade, o índice de permeabilidade e a análise da microestrutura, com a finalidade de se avaliar as características dos compósitos frente a estas solicitações.

3.2.4.1 Ensaios de permeabilidade e porosidade

Os ensaios para determinação dos índices de permeabilidade e de porosidade dos compósitos foram realizados no Laboratório de Escoamento de Meios Porosos da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, mediante orientação de técnico especializado. Pelo fato de ambos serem ensaios não destrutivos, foi possível a utilização simultânea de uma única amostra. Tal metodologia é usualmente utilizada para determinação desses parâmetros, originalmente, em rochas, porém, utilizou-se o mesmo procedimento em analogia ao compósito em questão, considerando-se para todos os efeitos, as diferenças inerentes aos materiais.

3.2.4.1.1 Preparação das amostras

A metodologia para a determinação da porosidade e da permeabilidade ficou vinculada ao tipo de equipamento utilizado e, por conseqüência, definiu-se o padrão de dimensão das amostras em função das dimensões do porta-amostra em questão. As amostras que representaram os traços de trabalho para os compósitos foram confeccionadas com referência à metodologia de mistura e moldagem nos mesmos padrões utilizados para os corpos-de-prova de argamassa, procedimento já descrito anteriormente, sendo similar à preparação de corpos-de-prova moldados em outros ensaios. Após a moldagem as amostras foram submetidas à cura úmida por período de 7 dias e no período restante da cura e endurecimento, ficaram em ambiente do

laboratório até completar o período de 28 dias. Em seguida, as mesmas foram colocadas em estufa na temperatura entre 100 °C e 110 °C até apresentar constância de massa, garantindo a condição seca das amostras.

3.2.4.1.2 Ensaio de Permeabilidade

Neste ensaio utilizou-se o equipamento denominado *permeabilímetro* (Figura 3.14), que consiste em um medidor de permeabilidade por intrusão do gás nitrogênio (N₂). As amostras cilíndricas, elaboradas com os traços de trabalho dos compósitos em questão, foram confeccionadas nas dimensões de 2,5 cm de diâmetro por 5,0 cm de altura, sendo apropriadas às dimensões do porta-amostra do permeabilímetro.



Figura 3.14 - Equipamento denominado *permeabilímetro* usado para medir a permeabilidade por intrusão do gás nitrogênio (N₂).

Inicialmente, para o fornecimento do gás, ajustou-se a pressão do cilindro do gás N₂ em aproximadamente 0,69 MPa, valor referencial adotado. Para facilitar a introdução do corpo-de-prova, foi produzido um vácuo no interior do porta-amostra, através da abertura de uma válvula específica. Em seguida, aplicou-se uma pequena pressão neste compartimento, fazendo com que a membrana de borracha presente no interior do porta-amostra ficasse aderida à superfície lateral da mesma, evitando-se possíveis escoamentos do gás. Em função do valor da vazão estimada, optou-se em trabalhar no modo “pressão baixa” (*low pressure*), ou seja, abaixo da vazão mínima, sendo que, a diferença de pressão (ΔP) foi regulada através dos controles denominados *permeameter regulator* e *mercury regulator*. Em função da variação

do valor de c (manômetro de mercúrio) e de h_w (manômetro de água) definiu-se, para cada tipo de amostra, a placa de orifício, que consiste em um dispositivo de restrição ao fluxo do gás N_2 , fixando um valor de vazão. A leitura pôde então ser realizada quando o sistema atingia o regime permanente, ou seja, a taxa de fluxo do gás N_2 era constante, o que podia ser verificado através da estabilização do nível dos fluidos presentes nos respectivos manômetros (colunas). A partir do procedimento descrito, pôde-se, então, determinar o valor do coeficiente de permeabilidade das amostras, de acordo com a Lei de Darcy, através da Equação 3.6.

$$K = c \cdot Q \cdot h_w \cdot \frac{L}{200} \cdot A \quad (3.6)$$

onde:

- K : coeficiente de permeabilidade (μ darcies);
- c : leitura na escala do manômetro de mercúrio após sua estabilização (mm);
- Q : valor de vazão pré-determinada em razão da variação das colunas (cm^3/s);
- h_w : leitura na escala do manômetro da água após sua estabilização (mm);
- L : altura do corpo-de-prova cilíndrico (cm);
- A : área da seção transversal do corpo-de-prova cilíndrico (cm^2).

3.2.4.1.3 Ensaios de Porosidade

Neste ensaio utilizou-se o equipamento denominado *porosímetro* (Figura 3.15), que consiste em um medidor de porosidade por intrusão do gás nitrogênio (N_2). O porta-amostra para este ensaio, denominado *câmara*, é constituído de uma cápsula metálica com dimensões também apropriadas ao corpo-de-prova de 2,5 cm de diâmetro por 5,0 cm de altura. Para o fornecimento do gás N_2 , foi ajustada uma pressão do cilindro similar ao valor referencial adotado no ensaio anterior, ou seja, aproximadamente 0,69 MPa. Inicialmente foi determinado o volume da câmara vazia (VCV), através da expansão do gás N_2 e da respectiva leitura no relógio mostrador.



Figura 3.15 - Equipamento denominado *porosímetro* utilizado para medir a porosidade por intrusão do gás nitrogênio (N₂).

Em seguida, colocou-se a amostra no interior da câmara para a determinação do volume de gás ocupado no cilindro, e, assim, sucessivamente, para todas as amostras ensaiadas. O cálculo do volume do corpo-de-prova cilíndrico (V_t) foi feito a partir da média dos valores aferidos de três medidas da altura e do diâmetro dos mesmos. Desse modo, determinou-se o valor do índice de vazios (porosidade) das amostras (Lei de Boyle) através da Equação 3.7.

$$I_v = 100 \cdot (V_t - V_s) / V_t \quad (3.7)$$

onde:

I_v : índice de vazios do corpo-de-prova (porosidade em %);

V_t : volume do corpo-de-prova cilíndrico (cm³);

V_s : volume dos sólidos (VCV - leitura do gás ocupado no cilíndrico em cm³);

Nota: VCV corresponde ao volume da câmara vazia em cm³.

3.2.4.2 Caracterização da Microestrutura através dos ensaios de microscopia eletrônica

Para a caracterização da microestrutura dos materiais à base de resíduos foram utilizados ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV), por meio da interpretação de imagens. Os ensaios foram feitos em amostras fraturadas, nas dimensões aproximadas de 5 mm x 5mm,

retiradas de parte do corpo-de-prova cilíndricos (5 cm de diâmetro e 10 cm de altura) e dos blocos vazados, para análise no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) utilizando-se o detector de leitura para os elétrons secundários (SEI).

3.2.4.2.1 Preparação das amostras

Para a realização dos ensaios em MEV, utilizando o detector de elétrons secundários (SEI), é necessário que a superfície da amostra seja condutora, ou seja, que permita a passagem de corrente. Desse modo, considerando-se o tipo de amostra em questão, ou seja, compósitos à base de cimento, foi realizado um tratamento superficial através da deposição de um filme fino a vácuo sobre a superfície da amostra, através do equipamento denominado *Sputtering* (Figura 3.16).



Figura 3.16 - Dispositivo para deposição de filme fino a vácuo (ouro ou carbono) sobre a amostra denominado *Sputtering*: (a) perspectiva geral (b) abertura da câmara (c) câmara vazia (d) câmara com o porta-amostra.

3.2.4.2.2 Ensaios de microscopia por varredura (MEV)

Os ensaios de microscopia foram realizados no Laboratório Nacional de Luz Síncrotron. Em vista do grau de exigência desejado, foi recomendada a utilização do microscópio eletrônico de varredura LV-SEM (*Low Vacuum - Scanning Electron Microscope*), modelo JSM-5900LV (Figura 3.17).



Figura 3.17 - Microscópio eletrônico de varredura LV-SEM (modelo JSM-5900LV).

As características do microscópio são:

- Filamento termo-iônico de Tungstênio e Voltagem de aceleração de 1 kV a 30 kV;
- Detectores de elétrons secundários e retro-espalhados;
- Resolução de 03 nm em 30 kV para elétrons secundários;
- Aquisição de imagem digital com 1280x960 *pixels* de resolução;
- Câmara de introdução com tamanho máximo de 6 polegadas;
- Porta-amostra totalmente motorizado: nos três eixos (x,y e z), com duplo eixo de inclinação e rotação;
- Modo de operação em baixo vácuo, com detector de elétrons retro-espalhados;
- Difração de elétrons retro-espalhados (*EBS*D, *Noran Orkid*), dispondo de aquisição de mapa de orientação cristalográfica;
- Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X (*EDS*, *Noram Voyager*), detector de Si (Li) de 10 mm², resolução em energia de 136 eV, janela ultra-fina de *Novar*, realização de análise química qualitativa e quantitativa (padrões de elementos puros, terras raras e minerais estão disponíveis) e mapeamento químico.

O microscópio eletrônico de varredura LV-SEM, entre outros recursos, possibilita a realização de varredura por elétrons permitindo a visualização, em tempo real, da superfície da amostra. O sinal é captado por um detector específico, passando através de um fotomultiplicador que o transforma em imagem. As imagens fornecidas pelo MEV possuem um caráter virtual, pois o

que é visualizado no monitor do aparelho é a transcodificação da energia emitida pelos elétrons. O equipamento é dotado de um sistema de refrigeração, do tipo *Chiller*, com o objetivo de protegê-lo de um possível superaquecimento. A amostra é colocada em um compartimento localizado no interior do microscópio, denominado câmara de infravermelho, cujo ambiente é submetido ao vácuo, preservando a integridade da mesma de eventuais interferências externas. Após a sua fixação em uma base de porta-amostra (Figura 3.18), a mesma é conduzida através de uma câmara de introdução para o interior do microscópio onde está localizado o porta-amostra motorizado, dispositivo este que permite a movimentação da amostra em diversas direções e afastamentos. A amostra pode ser visualizada no interior do microscópio por meio de um equipamento denominado CCD (*Charge Coupled Device*).

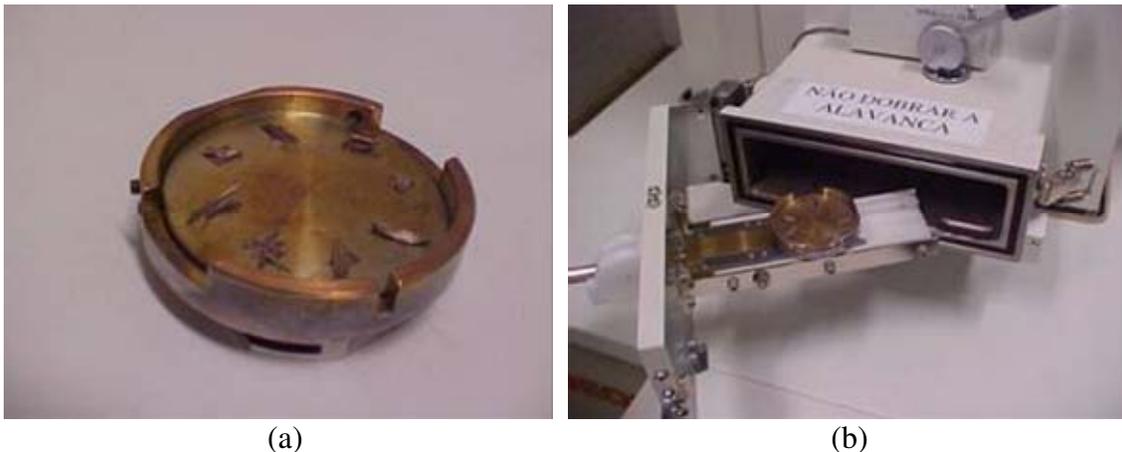


Figura 3.18 - Porta-amostra após banho em ouro (a) e dispositivo para introduzir o porta-amostra no interior da câmara de infravermelho do microscópio LV-SEM (b).

Através da literatura, do próprio desenvolvimento dos ensaios e do tipo dos componentes envolvidos na mistura do compósito, foram utilizadas as seguintes magnificações (ampliações) 200 x, 500 x, 700 x, 2000 x e 2500 x. Após a aferição de todos os parâmetros de controle de imagem para cada magnificação, tais como, controle de foco, correção de movimento da imagem (*OL wobbler*), correção do astigmatismo, brilho e contraste adequados, a imagem devia ser congelada antes de sua aquisição final. Para efeito de registro das informações, as características básicas de aquisição podem ser fixadas através de uma tarja preta, localizada na parte superior ou inferior da imagem, de acordo com a Figura 3.19.

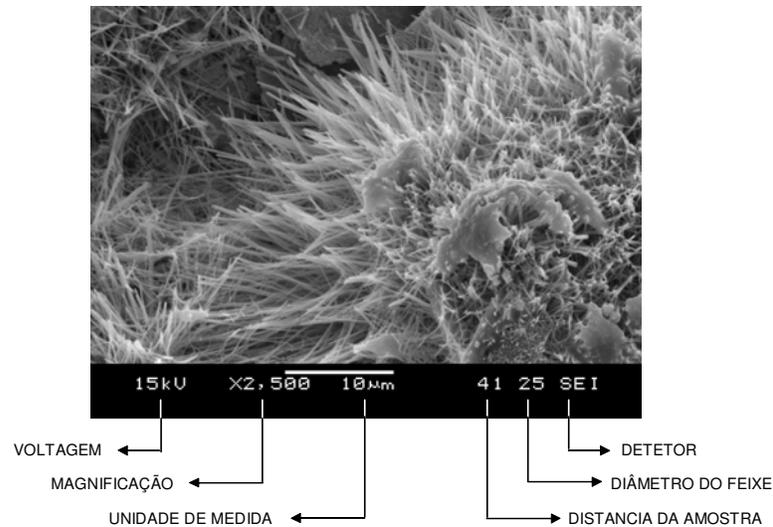


Figura 3.19 - Informações características de aquisição através da microscopia de varredura.

3.2.4.3 Determinação da condutividade térmica

Os ensaios para a determinação da condutividade térmica dos compósitos foram realizados no Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas de Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, através do equipamento denominado *Condutímetro Fluximétrico* (NBR-12094), de acordo com a Figura 3.20. Tem a vantagem de utilizar dois transdutores de fluxo para uma mesma amostra, para reduzir o tempo de medição em até 1/3 do tempo normal, de acordo com Güths (1990).

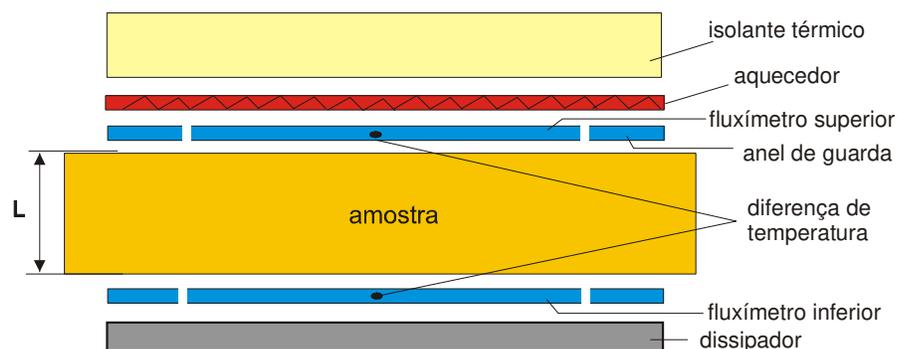


Figura 3.20- Princípio do método de medição da resistência térmica.
Fonte: Norma Técnica NBR-12094.

O resultado do ensaio é obtido ao se atingir o regime permanente, a partir do qual, a curva converge para um valor específico em ambos os fluxímetros evidenciando-se o valor da condutividade térmica determinado. A preparação dos corpos-de-prova foi feita de acordo com o item 3.2.2.1. As amostras foram confeccionadas nas dimensões 100 mm x 100 mm x 30 mm (largura, altura e espessura), em função do tipo de material e das especificações de acordo com a norma. Antes da realização dos ensaios é necessário que as amostras estejam na condição seca, por essa razão, após os 28 dias; as amostras foram colocadas em estufa para secagem até a obtenção de massa constante. O dispositivo experimental utilizado no ensaio foi composto por um sistema de aquisição de dados do tipo HP3852A-44705A, conectado a um micro-computador, que monitorou o fluxo de calor e as temperaturas durante o ensaio. O sistema de aquisição de dados recebeu informações dos fluxímetros superior e inferior, e do termopar a cada leitura programada. De acordo com a Figura 3.21, o calor foi fornecido para a amostra por meio de uma resistência aquecedora (placa quente), alimentada por uma fonte de corrente contínua (voltímetro). A placa fria (dissipador) foi ligada a um dispositivo de banho termostatizado, sendo responsável em manter a temperatura constante na faixa dos 20 °C. O conjunto de medição foi mantido sob uma pequena pressão correspondente a 0,008 MPa durante os ensaios, através de um dispositivo basculante, com a finalidade de minimizar a resistência térmica de contato.

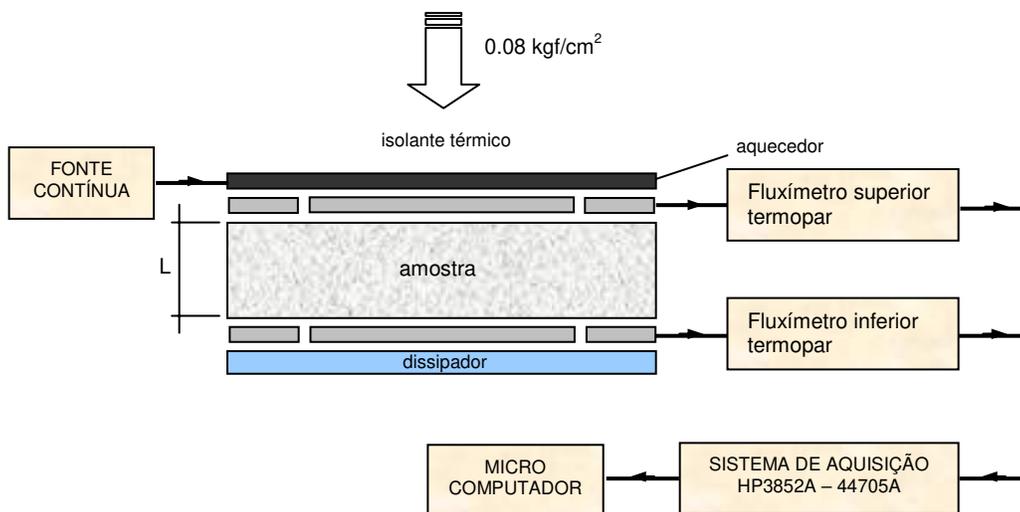


Figura 3.21 - Esquema simplificado do dispositivo de medição da condutividade térmica.

Fonte: Stancato (2000).

No início de cada ensaio, recomenda-se verificar se o sistema oferece as condições necessárias para garantir o fluxo unidirecional (minimizando-se as perdas de calor), de acordo com os procedimentos e as prescrições normatizadas a seguir:

- Dispositivo experimental de medição em ambiente climatizado (temperatura e umidade relativa constante);
- Sistema de aquisições de dados interligados com o micro e com os fluxímetros superior e inferior;
- Interligação da fonte de corrente contínua com a placa aquecedora;
- Banho termostaticado na placa fria mantendo temperatura constante de 20 °C;
- Montagem do dispositivo segundo a ordem apresentada nas figuras 3.14 e 3.15, acoplados em um sistema basculantes;
 - Placa de material isolante para evitar a fuga de calor da placa aquecedora;
 - Placa aquecedora;
 - Fluxímetro superior;
 - Amostra (corpo-de-prova a ser ensaiado);
 - Fluxímetro inferior;
 - Placa fria (dissipador);
- Aplicação de uma pressão de 0,008 MPa, através da colocação de um peso sobre o sistema basculante;
- Leituras de acordo com o procedimento de medição normalizado, até que o sistema tenha alcançado o regime permanente.

O acesso e a introdução das características da amostra, bem como, os controles das condições de contorno e a interpretação dos dados provenientes do sistema de aquisição, foram feitos através de um software apropriado e disponível no Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas de Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica (UFSC).

A resistência térmica é determinada a partir da aplicação da lei de Fourier (Equação 3.8):

$$R = \frac{T_1 - T_2}{\left(\frac{q_1 + q_2}{2}\right)} \quad (3.8)$$

onde:

R : resistência térmica (m^2 K/W);

q_1 e q_2 : densidade de fluxo de calor medido pelos fluxímetros 1 e 2 (W/m^2);

T_1 e T_2 : temperaturas superficiais da amostra medidas por termopares tipo T dispostos em arranjo diferencial (K).

Considerando que a amostra é homogênea, torna-se possível determinar a condutividade térmica do material (λ), segundo a Equação 3.9:

$$\lambda = \frac{L}{R} \quad (3.9)$$

onde:

λ : condutividade térmica (W/m K);

L : espessura da amostra (m).

3.3 Caracterização e procedimentos específicos para blocos vazados

3.3.1 Preparação e moldagem dos blocos vazados

Inicialmente, em uma primeira etapa, a moldagem dos blocos foi executada nas instalações da Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp, através do uso de um equipamento de moldagem manual (Permaq MBM 050) equipada com sistema de vibro-prensagem, com direção da vibração classificada como unidirecional vertical e com frequência de vibração em torno de 60 Hz. As quantidades da mistura foram calculadas para moldar 3 blocos com medida de 9 cm x 19 cm x 39 cm (espessura da parede de 20 mm), correspondendo ao volume compatível com a capacidade de produção da máquina de bloco e de acordo com o molde disponível.

Seqüência de funcionamento da prensa durante a moldagem dos blocos (Souza, 2001):

- preenchimento do recipiente dosador com a mistura destinada à moldagem dos blocos;
- recipiente dosador é deslocado para frente de modo a permitir o preenchimento do molde dos blocos (com a máquina em funcionamento);
- após verificado todo o preenchimento do molde, retorna-se o recipiente para posição de origem e inicia-se a descida dos extratores permitindo a compactação dos blocos dentro do molde. Esta compactação é feita com a máquina em funcionamento, até os blocos atingirem a altura necessária;
- após compactação e, antes de finalizar a vibração, os blocos são desmoldados.

Logo após a moldagem dos blocos em laboratório eles foram encaminhados para a câmara de cura úmida, complementando-se o processo através da aspersão manual, permanecendo os blocos nesse local por um período de 28 dias. A segunda etapa do processo consistiu na simulação da moldagem dos blocos de acordo com o processo de fabricação nos padrões comerciais. As pesagens individuais de todos os componentes para cada traço, exceto os teores de água, foram feitas em laboratório antes de serem encaminhadas para a fábrica de blocos. Em seguida, foram identificadas e acondicionadas em sacos plásticos quantidades suficientes para duas moldagens de 4 blocos de 9 cm x 19 cm x 39 cm para cada traço proposto. Embora se tenha idealizado simular a mistura tal como ela é feita na rotina diária do processo de fabricação, não foi possível se proceder da mesma maneira e, desse modo, a mistura foi processada em uma betoneira e lançada diretamente nos moldes do equipamento industrial (vibro-prensa automatizada). A partir deste momento os procedimentos ficaram por conta do funcionamento automático do equipamento, de acordo com a seqüência descrita por Medeiros (1993). Após moldagem os blocos foram retirados e encaminhados a um local onde permaneceram cobertos por um plástico e molhados manualmente, através de mangueira, duas vezes ao dia por um período de 3 dias consecutivos, pois esse é o procedimento usual da casa na indústria.

3.3.2 Ensaios de caracterização dos blocos vazados.

Em conformidade com as normas específicas para blocos vazados foram providenciados os ensaios de caracterização de acordo com a seqüência:

- Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Determinação da resistência à compressão (NBR-7184).
- Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Determinação da absorção de água, do teor de umidade e da área líquida (NBR-12118).

3.3.2.1 Ensaios de resistência à compressão

Os ensaios para determinação da resistência à compressão foram realizados no Laboratório de Materiais e Estruturas de Construção da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Os blocos foram moldados de acordo com o procedimento descrito anteriormente e suas dimensões foram tomadas em concordância com a norma NBR-7173. Em seguida, utilizou-se a prensa equipada com pratos de apoio e provida de dispositivo para efetuar a distribuição uniforme dos esforços na amostra, com transmissão de carga de modo progressivo e sem a ocorrência de choques. Na condição seca os blocos tiveram suas faces regularizadas com argamassa de gesso com espessura máxima de 3 mm. Os blocos foram ensaiados com aplicação de carga na mesma direção do esforço que eles devem suportar durante seu emprego; assim, os blocos foram colocados na prensa com o centro de gravidade alinhado no eixo de carga dos pratos. Os resultados da resistência à compressão (expressos em MPa) foram obtidos dividindo-se a carga máxima (expressa em Newton) pela média das áreas das duas faces de trabalho, em mm^2 , sem desconto das áreas dos furos e das reentrâncias, em concordância com a norma.

3.3.2.2 Ensaios de absorção de água, o teor de umidade e a área líquida

Os ensaios para determinação da absorção de água, do teor de umidade e da área líquida foram realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Para a determinação da massa seca, após o período de 28 dias da moldagem, os blocos foram colocados em estufa a $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ por um período correspondente a 24 h, contada a partir do momento de início de elevação da temperatura. Em seguida, os blocos foram pesados e colocados novamente em

estufa por 2 h, tolerando-se que os blocos permanecessem 10 min fora da estufa. A operação foi repetida até que em duas pesagens sucessivas não se registraram para os blocos diferença de massa superior a 0,5% em relação ao maior valor e anotou-se, então, a massa seca (m_1). Para a determinação da saturação, após resfriados naturalmente à temperatura ambiente, os blocos foram imersos em água à temperatura de (23 ± 5) °C por um período correspondente a 24 h. Os blocos foram pesados na condição saturados com superfície seca, anotando-se os valores encontrados. Repetiu-se a operação a cada 2 h, até que em duas pesagens sucessivas não foram registradas diferenças de massas superiores a 0,5% em relação ao maior valor, anotando-se a massa saturada (m_2). Para a determinação da área líquida foram medidas as dimensões com sensibilidade de 0,5 mm; o valor médio de cada dimensão dos blocos foi medido com 3 determinações executadas em pontos diferentes. Depois de saturados, conforme procedimento anteriormente descrito, determinou-se as massas quando imersos em água à temperatura de (23 ± 5) °C, por meio de balança hidrostática; o valor encontrado denominou-se massa aparente (m_4). A porcentagem de umidade de cada bloco, no momento da entrega ao laboratório, foi expressa como porcentagem da absorção total segundo a equação (3.10):

$$u\% = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100 \quad (3.10)$$

onde,

$u\%$: umidade do bloco no momento da entrega em laboratório (%);

m_1 : massa do bloco seco (kg);

m_2 : massa saturada do bloco (kg);

m_3 : massa do bloco no momento da entrega em laboratório (kg).

O valor da absorção de água, expresso em porcentagem, calculado pela equação (3.11):

$$a\% = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (3.11)$$

onde,

$a\%$: absorção de água (%).

O valor da área líquida, expresso em cm^2 , calculado segundo a equação (3.12):

$$Aliq = \frac{m_2 - m_4}{h \cdot \gamma \cdot 1000} \quad (3.12)$$

onde,

$Aliq$: área líquida (cm^2);

m_4 : massa aparente do bloco (kg);

h : altura do bloco medida na direção perpendicular à seção de trabalho (cm);

γ : massa específica da água utilizada no ensaio (g/m^3).

4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

Considerando a seqüência de ensaios realizados, as apresentações dos resultados foram organizadas em cinco fases distintas, representando toda estrutura prática do trabalho que foi desenvolvido nos vários laboratórios e centros de pesquisas, versando sobre os seguintes tópicos:

- Caracterização dos materiais: resíduos vegetais e agregados minerais;
- Análise do grau de compatibilidade química entre o cimento e os resíduos vegetais;
- Caracterização dos compósitos e da matriz cimentícia modificada;
- Caracterização e avaliação final: condutividade térmica, porosidade, permeabilidade e microscopia eletrônica de varredura;
- Caracterização dos blocos vazados a partir de norma técnica específica.

4.1 Caracterização dos materiais

4.1.1 Distribuição em tamanho de partículas vegetais e massa unitária dos resíduos e agregados minerais

A Tabela 4.1 apresenta a distribuição em tamanho de partículas vegetais dos resíduos provenientes das espécies *Eucalyptus grandis*, *Pinus caribaea* e *Agave sisalana* (sisal). As frações dos resíduos foram utilizadas, oportunamente, do mesmo modo que foram fornecidas pelas indústrias, representando uma etapa a menos no processo de formação desses agregados. Por opção, a casca de arroz foi utilizada na forma de fração inteira (medida média do comprimento da casca em torno de 10 mm), dispensando a etapa de determinação de sua distribuição em tamanho de partículas

Tabela 4.1 - Distribuição em tamanho de partículas dos resíduos vegetais.

DISTRIBUIÇÃO EM TAMANHO DE PARTÍCULAS (baseado nas normas NBR-7221 e NBR-7217)													
Abertura de peneiras (mm)		MASSA RETIDA (g)				% RETIDA				% ACUMULADA			
# Malha	(mm)	Pinus	Eucalyptus	Sisal	Casca	Pinus	Eucalyptus	Sisal	Casca	Pinus	Eucalyptus	Sisal	Casca
4	4,760	0,23	0,05	0,00	-	0,23	0,05	0,00	-	0,23	0,1	0,00	-
8	2,380	1,17	5,50	0,24	-	1,17	5,51	0,24	-	1,40	5,6	0,24	-
16	1,190	10,10	52,70	6,85	-	10,11	52,82	6,84	-	11,51	58,4	7,08	-
30	0,590	27,37	26,58	19,61	-	27,40	26,64	19,59	-	38,91	85,0	26,68	-
50	0,297	30,43	9,99	39,35	-	30,46	10,01	39,31	-	69,38	95,0	65,99	-
100	0,149	21,46	3,16	32,76	-	21,48	3,17	32,73	-	90,86	98,2	98,72	-
200	0,074	7,58	1,19	1,22	-	7,59	1,19	1,22	-	98,45	99,4	99,94	-
Fundo	Fundo	1,55	0,61	0,06	-	1,55	0,61	0,06	-	100,00	100,0	100,00	-
Módulo de Finura										3,11	4,42	2,99	-
Dimensão máxima característica (mm)										2,38	4,76	2,38	-

Nota: Não há resultados para a casca de arroz em razão da utilização da fração inteira (comprimento médio=10 mm).

As representações gráficas dos resultados obtidos nos ensaios de granulometria dos resíduos vegetais estão apresentadas na Figura. 4.1. Os resultados apresentados com utilização de uma escala logarítmica, que auxilia a visualização da distribuição granulométrica, foram comparados com os gráficos determinados para os agregados minerais. No caso dos resíduos de *Pinus* e *Eucalyptus* esta metodologia foi adequada e serviu para mostrar a distribuição granulométrica dessas partículas, apresentado teor de finos correspondente a 30,62% e 4,97%, respectivamente. A presença desses finos na mistura com o cimento Portland pode influenciar a condição inibitória, podendo resultar em aumento do tempo de pega e do endurecimento da mistura. Esta metodologia não foi adequada para os resíduos de *Agave sisalana*, porque essas fibras na podem ser classificadas como agregado, porém, se mostrou útil na determinação do teor de finos presentes, correspondente a 34,01%.

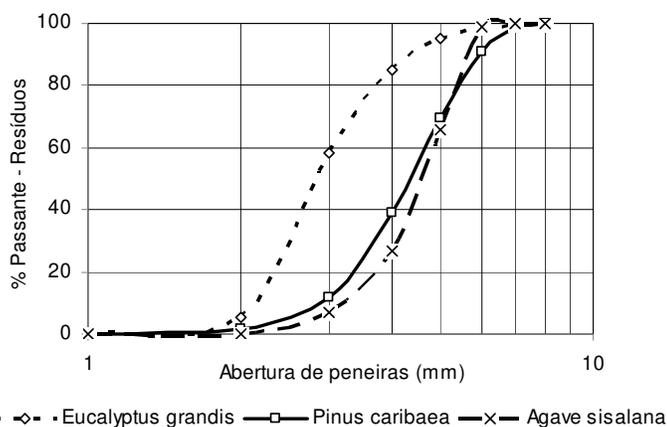


Figura 4.1 - Distribuição granulométrica dos resíduos com base em porcentagem passante.

Analogamente, a distribuição granulométrica dos agregados minerais (areia lavada e pó de pedra) está apresentada na Tabela 4.2 e na Figura 4.2. Em vista dos resultados observou-se uma distribuição linear do pó de pedra (com conformação horizontal), correspondendo a um agregado mal graduado, ou seja, contendo maiores porcentagens tanto de partículas finas como grossas. A areia lavada, por sua vez, correspondeu a um agregado uniforme, ou seja, apresentou uma porção predominante de grânulos com o mesmo diâmetro e maior percentagem de massa retida na peneira #100. Essa característica auxilia, de certa maneira, a previsão do valor do consumo de água a ser utilizado num mesmo traço, pressupondo-se que o agregado esteja numa condição seca. Devem ser considerados outros fatores que podem influenciar na quantidade de água consumida, tais como, a higroscopia inerente aos resíduos vegetais.

Tabela 4.2 - Distribuição granulométrica dos agregados minerais.

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA							
Abertura de peneiras (mm)		MASSA RETIDA (g)		% RETIDA		% ACUMULADA	
# Malha	(mm)	Areia fina	Pó de pedra	Areia fina	Pó de pedra	Areia fina	Pó de pedra
4	4,76	0,00	29,83	0,00	4,25	0,00	4,25
8	2,38	1,41	208,14	0,13	29,64	0,13	33,89
16	1,19	1,23	130,06	0,12	18,52	0,25	52,41
30	0,59	6,56	107,84	0,62	15,36	0,87	67,77
50	0,297	205,26	66,16	19,43	9,42	20,30	77,20
100	0,149	642,77	68,37	60,85	9,74	81,15	86,93
200	0,074	183,76	40,76	17,40	5,81	98,54	92,74
Fundo	-	15,39	50,99	1,46	7,26	100,00	100,00
Módulo de Finura						2,01	4,15
Dimensão máxima característica (mm)						2,38	4,76

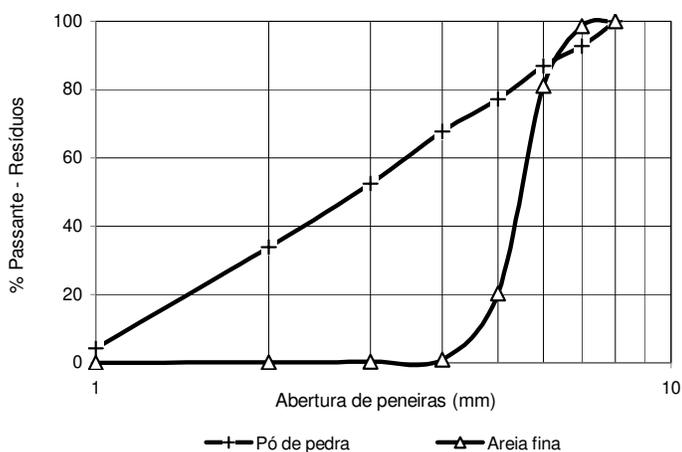


Figura 4.2 - Distribuição granulométrica dos agregados minerais em porcentagem passante.

Nas Tabelas 4.3 e 4.4 estão apresentados os valores da massa unitária dos resíduos vegetais e dos agregados minerais, respectivamente. Em razão da utilização dos traços em massa na confecção das misturas no estudo das dosagens, como consequência ocorreram diferenças significativas do volume na confecção das misturas para cada resíduo. Para os compósitos à base de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea*, em vista da similaridade dos valores de massa unitária, manteve-se o mesmo teor de resíduos em relação ao cimento. Nos compósitos de casca de arroz ocorreu uma diminuição da quantidade em massa do resíduo em relação aos traços dos resíduos anteriores.

Tabela 4.3 - Massa unitária no estado seco e solto dos resíduos vegetais (NBR-7251).

Tipo de Resíduo	Amostra	Massa amostra (g)	Massa unitária estado seco e solto (kg/m³)
<i>Eucalyptus grandis</i>	P1	446,7	111
	P2	445,8	
	P3	436,1	
	Pmédio	442,9	
<i>Pinus caribaea</i>	P1	507,6	127
	P2	518,6	
	P3	503,4	
	Pmédio	509,9	
Casca de arroz	P1	915,4	228
	P2	936,4	
	P3	889,6	
	Pmédio	913,8	

Tabela 4.4 - Massa unitária no estado seco e solto dos agregados minerais (NBR-7251).

Tipo de Agregado	Amostra	Massa amostra (g)	Massa unitária estado seco e solto (kg/m³)
Pó de pedra	P1	7244,6	1832
	P2	7548,6	
	P3	7189,8	
	Pmédio	7327,7	
Areia fina lavada	P1	6454,6	1565
	P2	6171,2	
	P3	6159,4	
	Pmédio	6261,7	

De um modo geral, em vista da grande diferença existente entre as massas unitárias determinadas para os agregados minerais e os resíduos vegetais, acabou resultando em menor volume ocupado por estes componentes nos compósitos.

4.2 Curvas do calor de hidratação das misturas com resíduos e pastas de cimento

Nas Figuras 4.3 a 4.26 estão apresentadas as curvas do calor de hidratação da mistura entre resíduos vegetais com diâmetro do tamanho das partículas malha #100 e malha # 4,8 mm, e em combinação com diferentes tipos de cimentos (CPII-E, CPIII e CPV-ARI). Os resultados foram determinados de acordo com a norma NBR-12006, através do monitoramento da temperatura durante o período de 24 h. As curvas apresentadas foram sempre comparadas às curvas das respectivas pastas de cimento (cimento + água). Como a tendência do comportamento dos resíduos é a de inibir as reações de hidratação, pode-se dizer que a quantidade de calor de hidratação gerado, após a mistura dos resíduos com o cimento, foi, em geral, menor em relação ao calor gerado pela pasta, principalmente, durante o período que correspondeu ao início dos ensaios até a obtenção das respectivas temperaturas máximas.

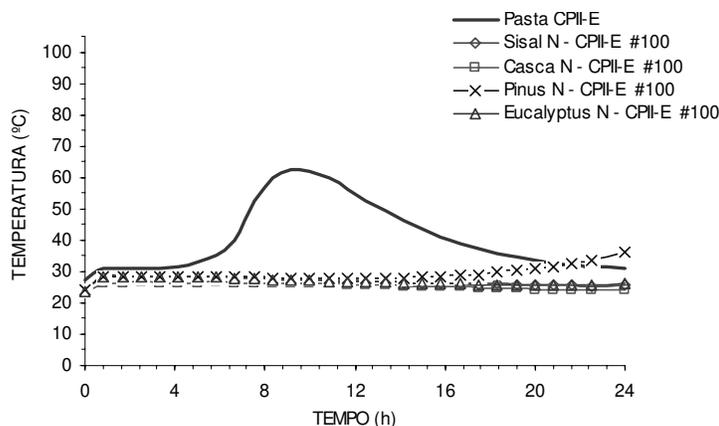


Figura 4.3 - Variação do calor de hidratação dos resíduos naturais (#100) com CII-E.

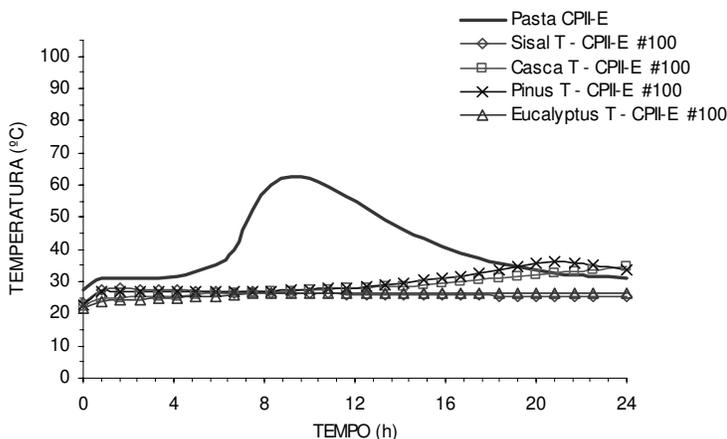


Figura 4.4 - Variação do calor de hidratação dos resíduos tratados (#100) com CII-E.

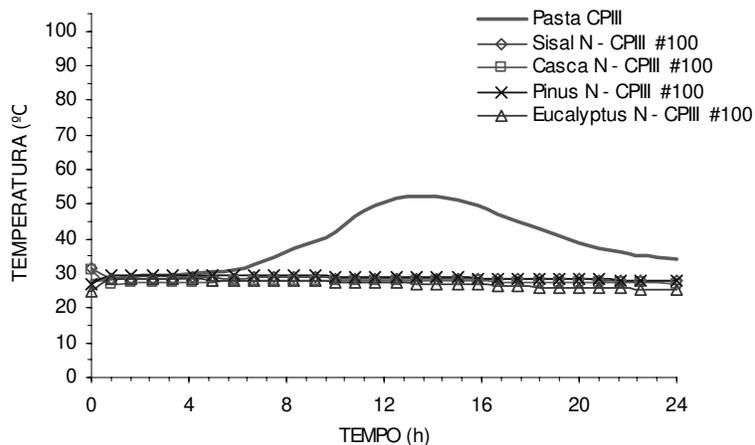


Figura 4.5 - Variação do calor de hidratação dos resíduos naturais (#100) com CIII.

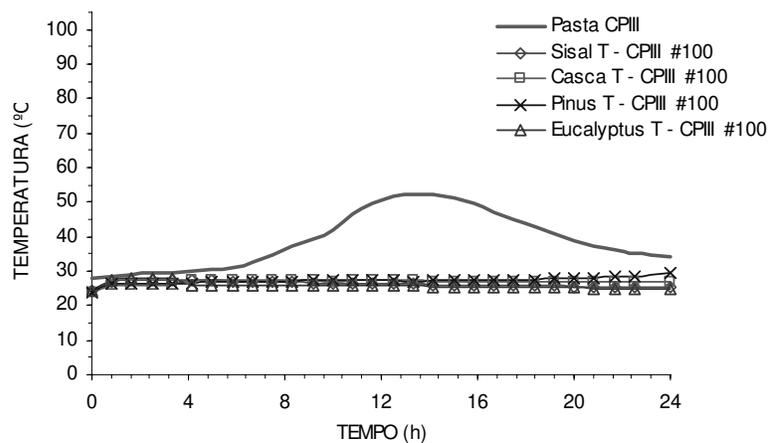


Figura 4.6 - Variação do calor de hidratação dos resíduos tratados (#100) com CIII.

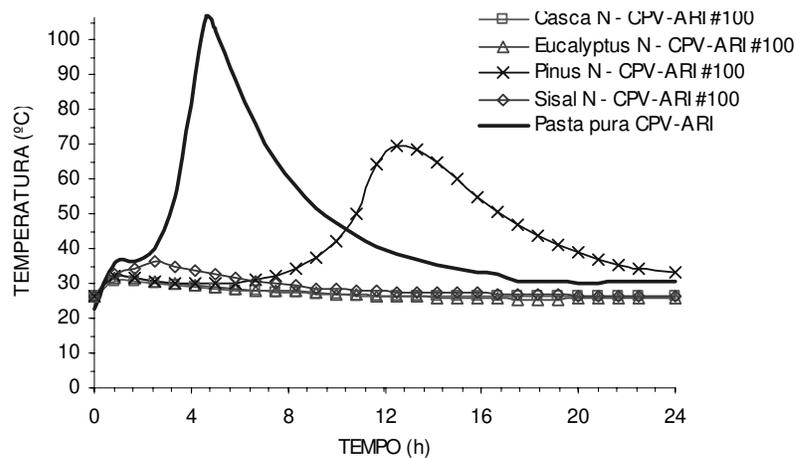


Figura 4.7 - Variação do calor de hidratação dos resíduos naturais (#100) com CPV-ARI.

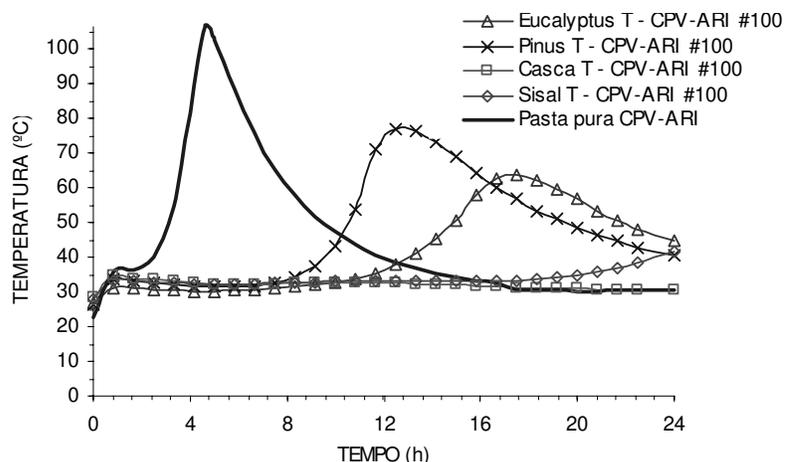


Figura 4.8 - Variação do calor de hidratação dos resíduos tratados (#100) com CPV-ARI.

De um modo geral, as curvas de calor de hidratação das misturas com resíduos naturais (N) e tratados (T), malha #100, utilizando os cimentos tipo CPIII e CPII-E, apresentaram baixo desenvolvimento de taxa de calor, durante o período de 24 h (Figuras 4.3 a 4.8). Porém, as curvas das misturas com o cimento do tipo CPV-ARI apresentaram melhor desempenho em relação aos outros cimentos, no que diz respeito aos maiores valores de temperatura máxima alcançada e menores períodos de tempo para sua obtenção. Tal fato pôde ser observado principalmente quando da utilização dos resíduos provenientes da espécie *Pinus caribaea* com e sem tratamento e da espécie *Eucalyptus grandis* com tratamento. Levando-se em conta tal desempenho foram realizados ensaios com o objetivo de testar algumas adições nas misturas. Nas Figuras 4.9 a 4.12 estão apresentadas as curvas das misturas dos resíduos (partículas #100) com o cimento CPV-ARI com a adição do aditivo acelerador de pega (CaCl_2) e do polímero estireno-butadieno (SBR). Como pôde ser observado, os resultados para os resíduos das espécies *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* foram bem expressivos, ou seja, a adição com SBR aumentou o valor do tempo de obtenção da temperatura máxima em aproximadamente 2 h a 3 h em relação ao resíduo sem adição. A adição com CaCl_2 reduziu o valor desse tempo, apresentando diferença de, aproximadamente, 2 h acima do valor do tempo obtido com a pasta de cimento (valor referência). As pastas com os resíduos de *Pinus* apresentaram temperatura máxima acima dos 70 °C; já as pastas com os resíduos de *Eucalyptus* apresentaram temperatura máxima acima dos 60 °C, e com adição de CaCl_2 , acima dos 70 °C.

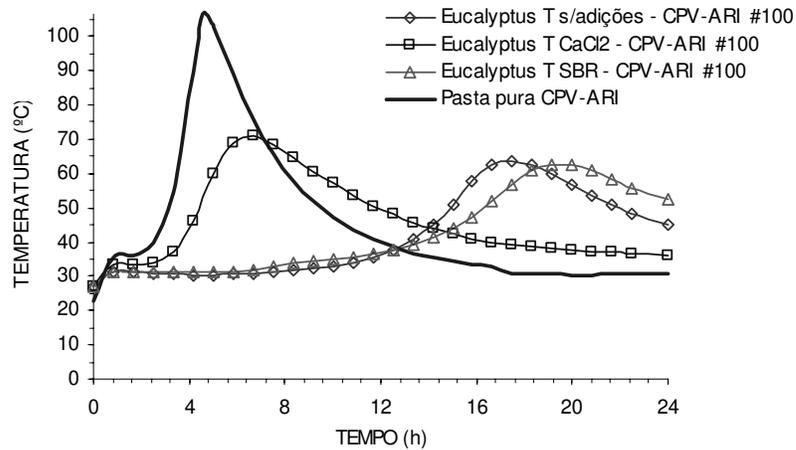


Figura 4.9 - Variação do calor de hidratação do *Eucalyptus grandis* tratado (#100) com CPV-ARI (sem adição, com adição de CaCl₂ e SBR).

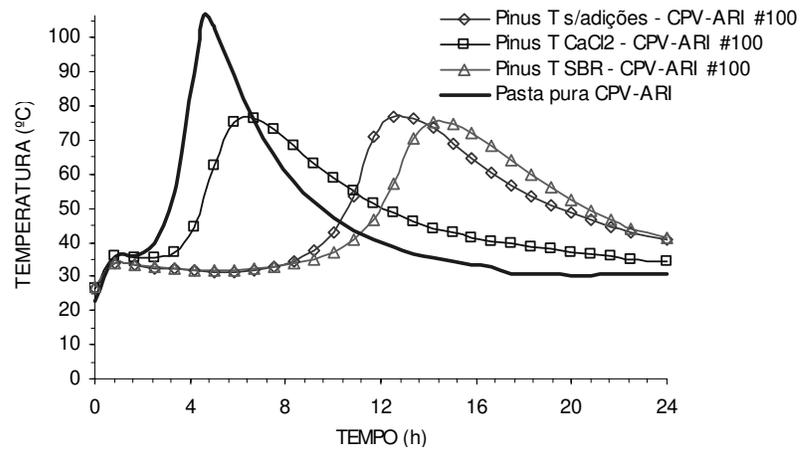


Figura 4.10 - Variação do calor de hidratação do *Pinus caribaea* tratado (#100) com CPV-ARI (sem adição, com adição de CaCl₂ e SBR).

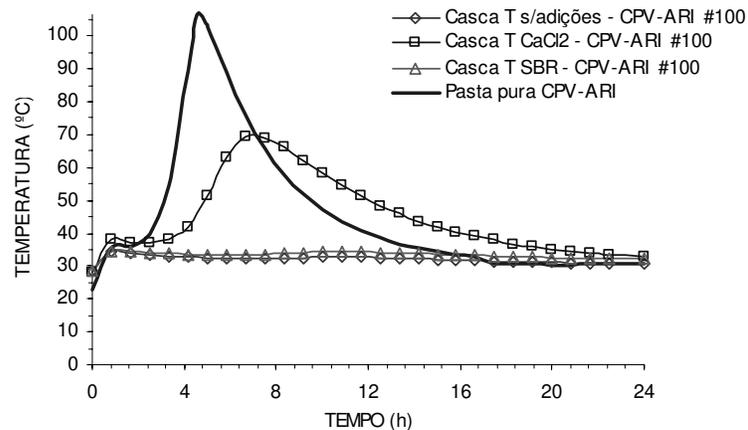


Figura 4.11 - Variação do calor de hidratação da casca de arroz tratada (#100) com CPV-ARI (sem adição, com adição de CaCl₂ e SBR).

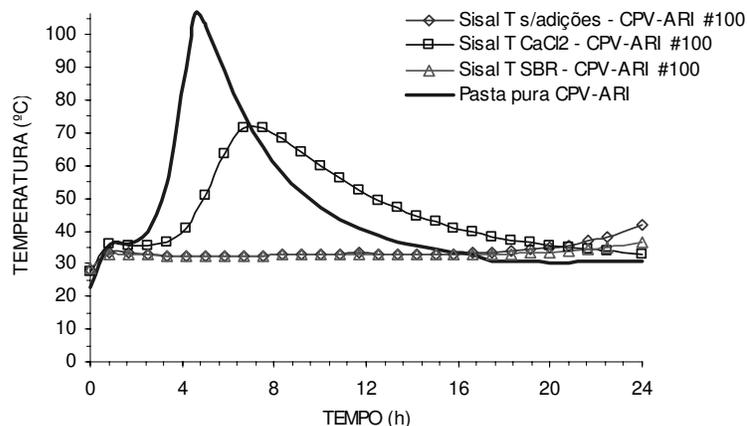


Figura 4.12 - Variação do calor de hidratação do sisal tratado (#100) com CPV-ARI (sem adição, com adição de CaCl_2 e SBR).

Nas curvas de calor de hidratação das Figuras 4.11 e 4.12 correspondentes às misturas com os resíduos provenientes da casca de arroz e da espécie *Agave sisalana* (sisal), verificou-se que somente as misturas com o uso de acelerador de pega (CaCl_2) apresentaram bom desempenho na produção de calor. Nessa condição, o valor do tempo correspondente à obtenção da temperatura máxima diferenciou em aproximadamente 2 h a 3 h em relação ao valor de tempo obtido com a pasta de cimento, tanto para os resíduos provenientes da casca de arroz como do sisal, obtendo-se temperaturas máximas da ordem de 70 °C. A seguir, estão apresentadas, nas Figuras 4.13 a 4.16, as curvas de calor de hidratação da mistura entre os resíduos vegetais com tamanho das partículas passantes na malha # 4,8 mm (fração normal) e os cimentos CII-E. Este procedimento representa uma complementação à metodologia proposta por Moslemi et al. (1983), com o objetivo de avaliar o comportamento da mistura durante o processo de hidratação, utilizando-se os traços de trabalho que simulem as condições de serviço dos compósitos. Algumas curvas mostraram que a mistura continuou a reagir, mesmo após o período de 24 h, porém, em vista da aplicação proposta, ou seja, a fabricação de blocos vazados, é necessária que seja obtida, praticamente, 90% da resistência final do bloco após 3 dias da moldagem. Além do que, quanto maior for o período de reação da mistura, menor será a chance de endurecimento do compósito, pois acaba por prevalecer mais a interferência dos extrativos dos resíduos na reação de hidratação, favorecendo assim uma condição inibitória.

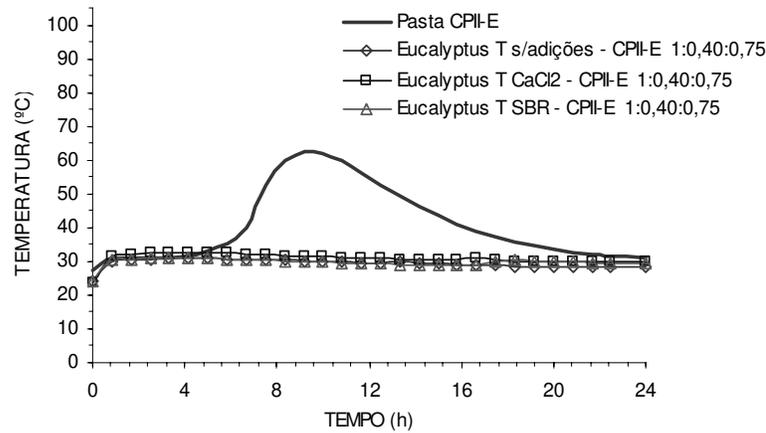


Figura 4.13 - Variação do calor de hidratação dos resíduos tratados de *Eucalyptus grandis* traço 1:0,40:0,75 com o cimento CII-E (sem adição, com adição de CaCl_2 e SBR).

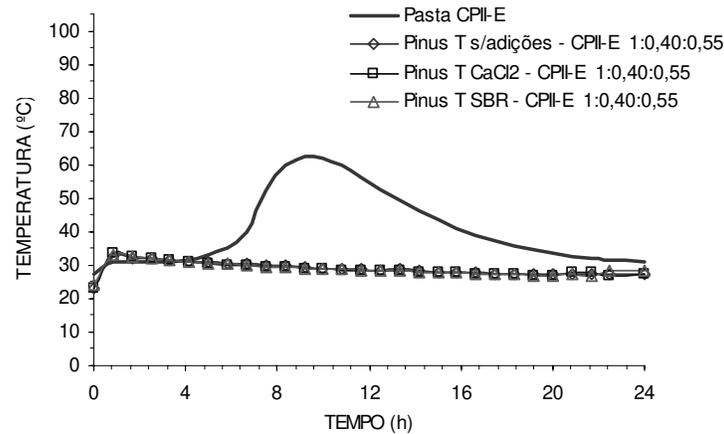


Figura 4.14 - Variação do calor de hidratação dos resíduos tratados de *Pinus caribaea* traço 1:0,40:0,55 com o cimento CII-E (sem adições, com adição de CaCl_2 e SBR).

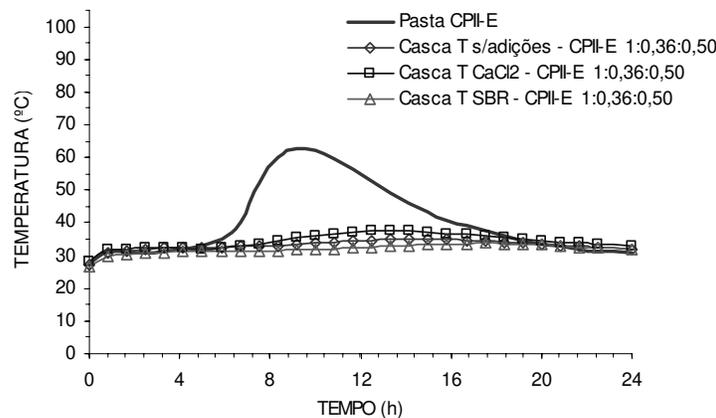


Figura 4.15 - Variação do calor de hidratação dos resíduos tratados de casca de arroz traço 1:0,36:0,50 com o cimento CII-E (sem adições, com adição de CaCl_2 e SBR).

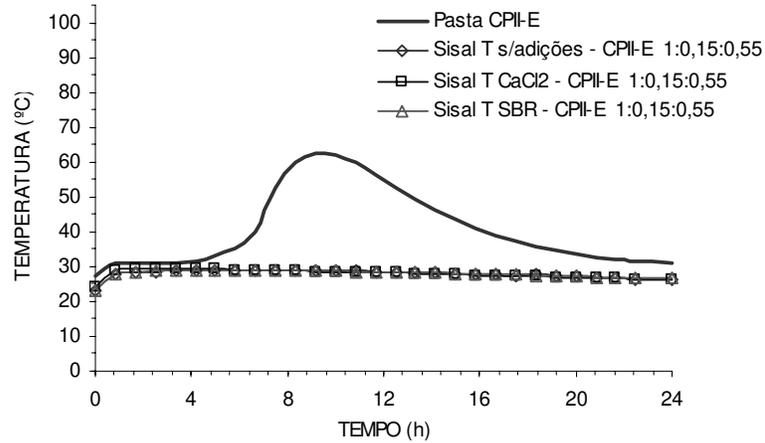


Figura 4.16 - Variação do calor de hidratação dos resíduos tratados de *Agave sisalana* traço 1:0,15:0,55 com o cimento CII-E (sem adições, com adição de CaCl_2 e SBR).

As curvas de hidratação da mistura entre os resíduos na fração normal (partículas passantes na malha # 4,8 mm) e o cimento do tipo CII-E não foram relevantes em comparação à curva referência (pasta de cimento CII-E), pois, praticamente, não houve variação da temperatura monitorada ao durante o período correspondente a 24 h. Analogamente, com o objetivo de se avaliar o comportamento das misturas com um novo tipo de cimento (CIII) foram utilizados os mesmos traços anteriores. Em continuidade, estão apresentadas, nas Figuras 4.17 a 4.20, as curvas de calor de hidratação das misturas entre os resíduos vegetais na fração normal e o cimento do tipo CIII.

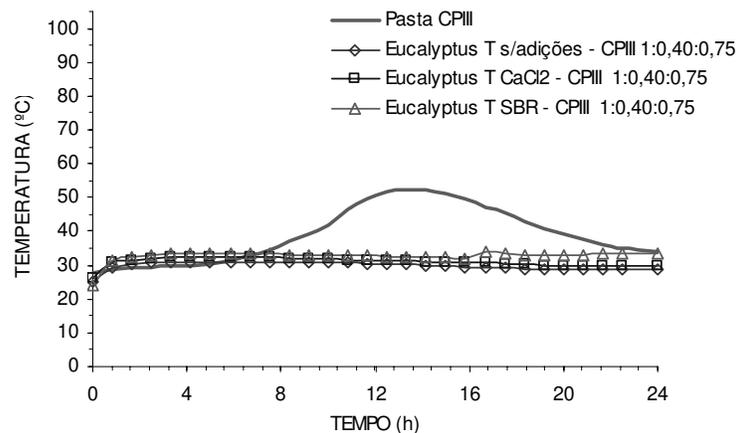


Figura 4.17 - Variação do calor de hidratação dos resíduos tratados de *Eucalyptus grandis* traço 1:0,40:0,75 com o cimento CIII (sem adições, com adição de CaCl_2 e SBR).

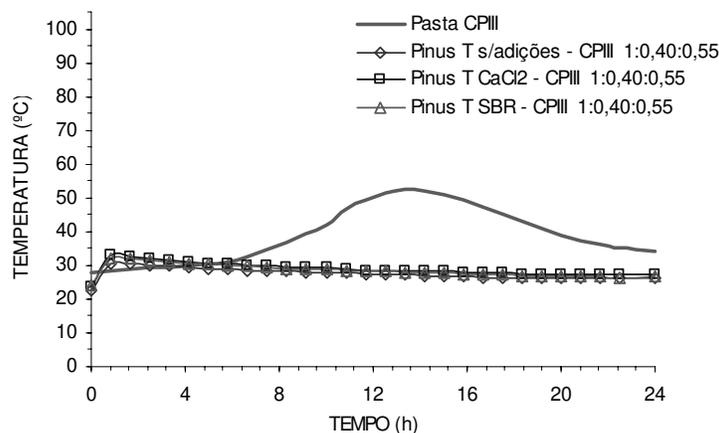


Figura 4.18 - Variação do calor de hidratação dos resíduos tratados de *Pinus caribaea* traço 1:0,40:0,55 com o cimento CPIII (sem adições, com adição de CaCl_2 e SBR).

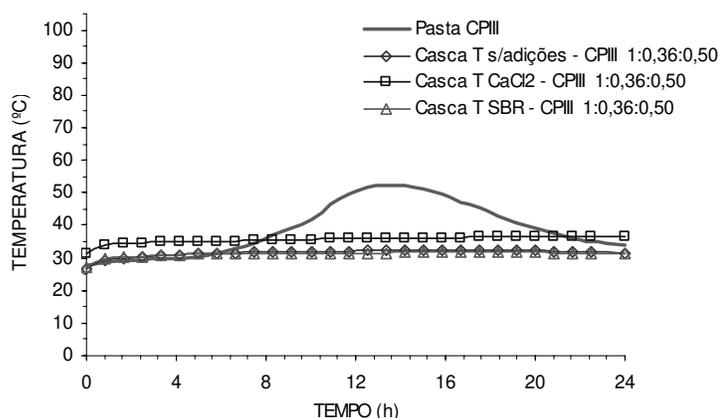


Figura 4.19 - Variação do calor de hidratação dos resíduos tratados de casca de arroz traço 1:0,36:0,50 com o cimento CPIII (sem adições, com adição de CaCl_2 e SBR).

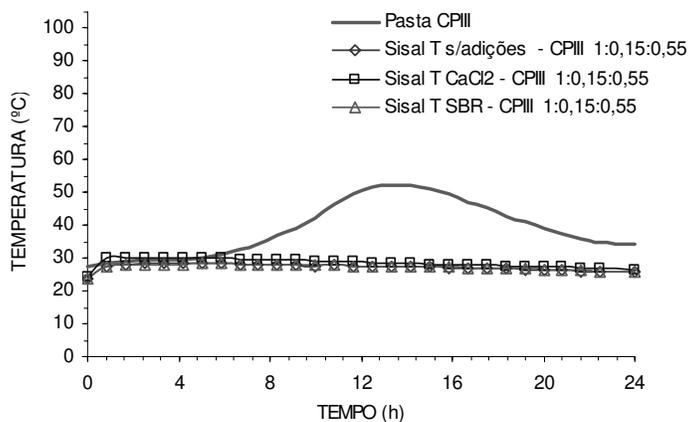


Figura 4.20 - Variação do calor de hidratação dos resíduos tratados de casca de arroz traço 1:0,15:0,55 com o cimento CPIII (sem adições, com adição de CaCl_2 e SBR).

Do mesmo modo ao ocorrido com os gráficos anteriores, as curvas de hidratação da mistura entre os resíduos e o cimento CPIII não foram significativas, pois, praticamente, houve pouca variação em torno da temperatura ambiente ao longo do período de ensaio. As misturas dos resíduos com o cimento CPIII se mostraram ligeiramente mais incompatíveis em relação às misturas com o cimento CII-E, o que pode ser atribuído a maior quantidade de escória de alto forno presente no CPIII. Nas Figuras 4.21 a 4.26 estão apresentadas as curvas de calor de hidratação da mistura entre os resíduos vegetais na fração normal e o cimento CPV-ARI. Analogamente aos procedimentos anteriores foram utilizados os mesmos traços de trabalho para os compósitos, também com o objetivo de simular as condições de serviço.

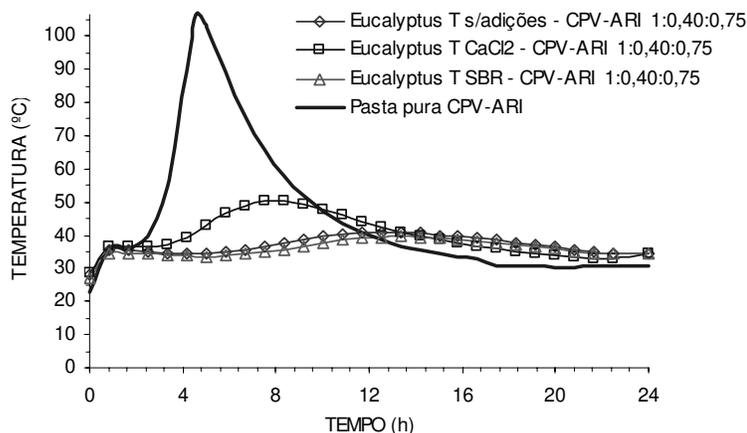


Figura 4.21 - Variação do calor de hidratação dos resíduos tratados de *Eucalyptus grandis* traço 1:0,40:0,75 com o cimento CPV-ARI (sem adições, com adição de CaCl_2 e SBR).

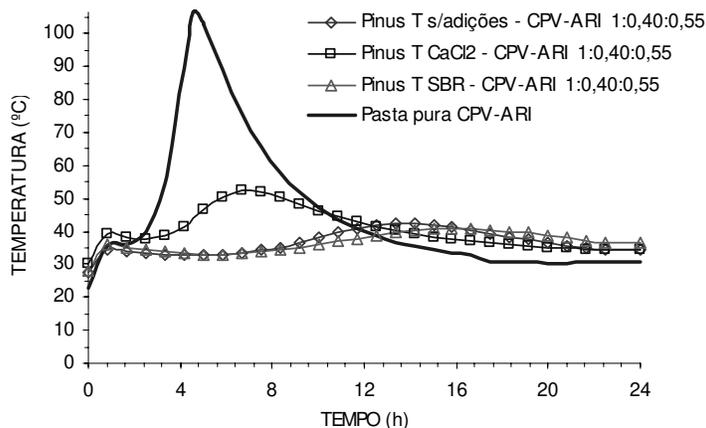


Figura 4.22 - Variação do calor de hidratação dos resíduos tratados de *Pinus caribaea* traço 1:0,40:0,55 com o cimento CPV-ARI (sem adições, com adição de CaCl_2 e SBR).

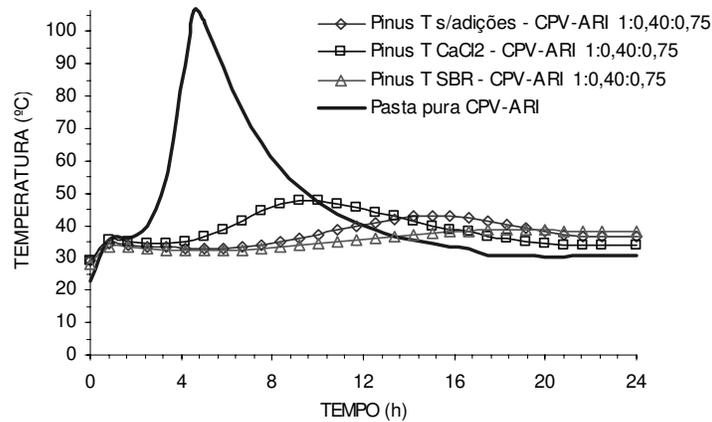


Figura 4.23 - Variação do calor de hidratação dos resíduos tratados de *Pinus caribaea* traço 1:0,40:0,75 com o cimento CPV-ARI (sem adições, com adição de CaCl_2 e SBR).

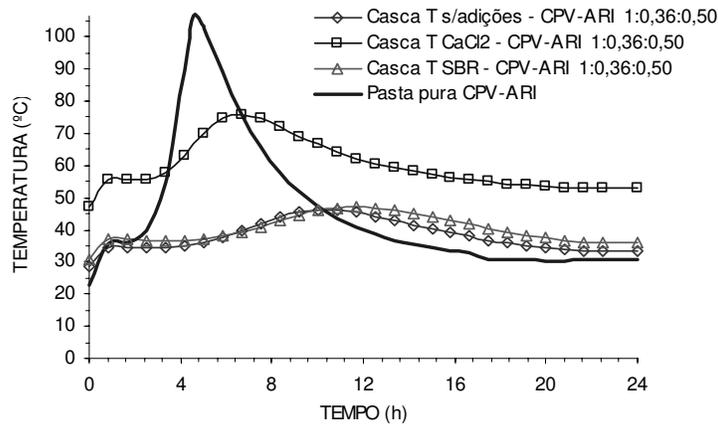


Figura 4.24 - Variação do calor de hidratação dos resíduos tratados de casca de arroz traço 1:0,36:0,50 com o cimento CPV-ARI (sem adições, com adição de CaCl_2 e SBR).

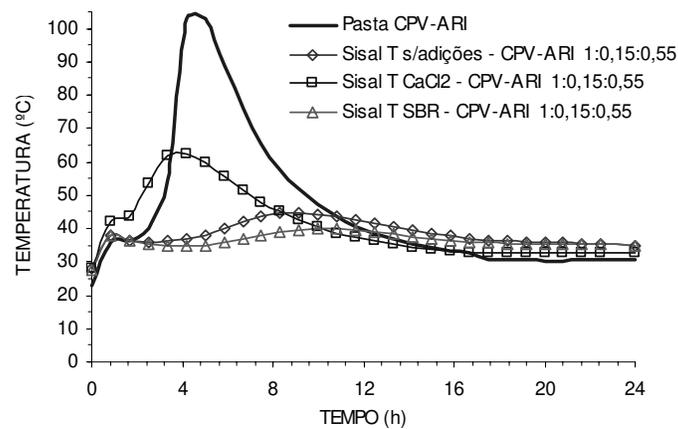


Figura 4.25 - Variação do calor de hidratação dos resíduos tratados de *Agave sisalana* traço 1:0,15,:0,55 com o cimento CPV-ARI (sem adições, com adição de CaCl_2 e SBR).

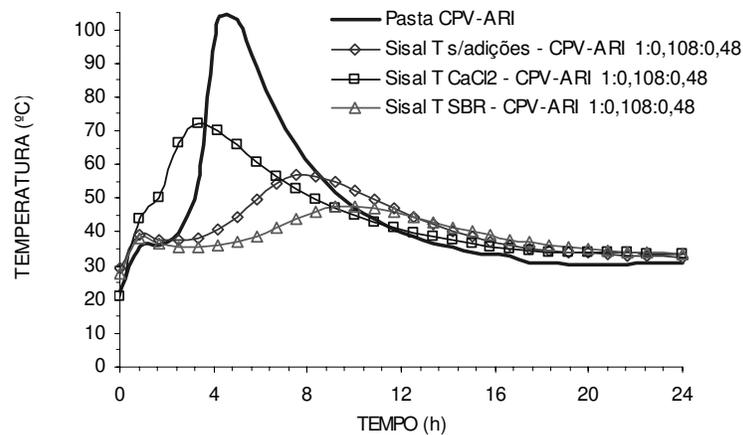


Figura 4.26 - Variação do calor de hidratação dos resíduos tratados de *Agave sisalana* traço 1:0,108:0,48 com o cimento CPV-ARI (sem adições, com adição de CaCl_2 e SBR).

Na Figura 4.24 observou-se que na mistura com a adição de CaCl_2 o registro da temperatura inicial foi bem acima do valor da temperatura ambiente ($47,2\text{ }^\circ\text{C}$), o que pode ser atribuído a um possível atraso no início da aquisição da temperatura, após a mistura da pasta com resíduos, e não à ocorrência de um fenômeno isolado. As curvas de calor de hidratação das misturas com resíduos na fração normal utilizando-se o cimento CPV-ARI apresentaram maior variação de temperatura em relação aos outros cimentos, com maior produção de calor durante o ensaio, como já era de se esperar em vista de outros resultados apresentados pelos resíduos na granulometria malha #100. Os teores dos resíduos provenientes da espécie do *Agave sisalana* (sisal) foram reduzidos de 15% para 10,8% em relação à massa de cimento. A partir disso, observou-se um aumento da temperatura máxima em todas as misturas, ou seja, sem adições de $44,7\text{ }^\circ\text{C}$ para $47\text{ }^\circ\text{C}$, com adição, de CaCl_2 de $62,9\text{ }^\circ\text{C}$ para $72,1\text{ }^\circ\text{C}$ e com adição de SBR, de $40\text{ }^\circ\text{C}$ para $47,7\text{ }^\circ\text{C}$.

4.3 Análise do grau de compatibilidade química entre o cimento os resíduos vegetais

Nas metodologias utilizadas para a análise do grau de compatibilidade química da mistura entre o cimento e os resíduos vegetais, ou seja, baseada no valor da temperatura máxima obtida, no cálculo do índice de inibição e no cálculo do fator CA correspondente à razão entre as áreas abaixo das curvas das misturas com resíduos e da pasta pura (cimento + água), sempre foram consideradas as curvas do calor de hidratação determinadas por meio da metodologia

proposta. Considerando-se a diversidade dos resultados obtidos para cada metodologia, pode-se afirmar, seguramente, que nenhuma delas é totalmente confiável. Em contrapartida, esses resultados se complementaram e, ao mesmo tempo, forneceram subsídios que indicaram os traços mais compatíveis a serem adotados nas etapas posteriores deste trabalho.

4.3.1 Metodologia baseada no valor da temperatura máxima

Nas Tabelas de 4.5 a 4.7 apresenta-se o grau de compatibilidade baseado no valor de temperatura máxima das misturas entre os resíduos passantes na malha #100 e fração normal, e os diferentes tipos de cimento (CPIII, CPII-E e CPV-ARI), com e sem a utilização dos tratamentos. Na condição de fração normal dos resíduos foram utilizados os traços de trabalho dos compósitos, simulando as condições de serviço reais. Ambos os tipos de cimentos Portland CPII-E e CPIII se mostraram menos reativos com as misturas dos resíduos vegetais.

Tabela 4.5 - Grau de compatibilidade das misturas baseado na temperatura máxima (CPII-E).

<i>TEMPERATURA MÁXIMA - Sandermann e Kholer (citados por HOFSTRAND et al., 1984)</i>						
<i>Tipo da Mistura</i>	<i>Tipo de Cimento</i>	<i>T_{máx} Resíduo</i>	<i>T_{máx} Cimento</i>	<i>Condição</i>	<i>GRAU DE COMPATIBILIDADE</i>	
Eucalyptus N #100	CPII-E	28,50	62,90	T _{máx} < 50	incompatíveis	
Pinus N #100	CPII-E	35,70	62,90	T _{máx} < 50	incompatíveis	
Casca N #100	CPII-E	26,70	62,90	T _{máx} < 50	incompatíveis	
Sisal N #100	CPII-E	28,30	62,90	T _{máx} < 50	incompatíveis	
Eucalyptus T #100	CPII-E	28,30	62,90	T _{máx} < 50	incompatíveis	
Pinus T #100	CPII-E	27,80	62,90	T _{máx} < 50	incompatíveis	
Casca T #100	CPII-E	29,50	62,90	T _{máx} < 50	incompatíveis	
Sisal T #100	CPII-E	29,10	62,90	T _{máx} < 50	incompatíveis	
Eucalyptus T s/adições 1:0,40:0,75	CPII-E	31,10	52,50	T _{máx} < 50	incompatíveis	
Eucalyptus T CaCl ₂ 1:0,40:0,75	CPII-E	32,70	52,50	T _{máx} < 50	incompatíveis	
Eucalyptus T SBR 1:0,40:0,75	CPII-E	31,00	52,50	T _{máx} < 50	incompatíveis	
Pinus T s/adições 1:0,40:0,75	CPII-E	32,70	62,90	T _{máx} < 50	incompatíveis	
Pinus T CaCl ₂ 1:0,40:0,75	CPII-E	33,70	62,90	T _{máx} < 50	incompatíveis	
Pinus T SBR 1:0,40:0,75	CPII-E	33,00	52,50	T _{máx} < 50	incompatíveis	
Casca T s/adições 1:0,36:0,50	CPII-E	35,20	62,90	T _{máx} < 50	incompatíveis	
Casca T CaCl ₂ 1:0,36:0,50	CPII-E	37,50	62,90	T _{máx} < 50	incompatíveis	
Casca T SBR 1:0,36:0,50	CPII-E	33,70	62,90	T _{máx} < 50	incompatíveis	
Sisal T s/adições 1:0,15:0,55	CPII-E	29,20	62,90	T _{máx} < 50	incompatíveis	
Sisal T CaCl ₂ 1:0,15:0,55	CPII-E	29,60	62,90	T _{máx} < 50	incompatíveis	
Sisal T SBR 1:0,15:0,55	CPII-E	29,10	62,90	T _{máx} < 50	incompatíveis	
Sisal T s/adições 1:0,036:0,40 t	CPII-E	33,00	62,90	T _{máx} < 50	incompatíveis	
Sisal T CaCl ₂ 1:0,036:0,40 t	CPII-E	46,00	62,90	T _{máx} < 50	incompatíveis	
Sisal T SBR 1:0,036:0,40 t	CPII-E	31,70	52,50	T _{máx} < 50	incompatíveis	

Também não houve compatibilidade, com exceção da mistura entre o cimento CPIII e o resíduo proveniente do *Agave sisalana* (sisal) tratado, no traço de 1:0,036:0,40 com adição do cloreto de cálcio (CaCl_2), que apresentou uma temperatura ligeiramente acima de 50 °C, ou seja, 52,9 °C, mostrando uma pequena compatibilidade.

Tabela 4.6 - Grau de compatibilidade das misturas baseado na temperatura máxima (CPIII).

<i>TEMPERATURA MÁXIMA - Sandermann e Kholer (citados por HOFSTRAND et al., 1984)</i>					
<i>Tipo da Mistura</i>	<i>Tipo de Cimento</i>	<i>T_{máx} Resíduo</i>	<i>T_{máx} Cimento</i>	<i>Condição</i>	<i>GRAU DE COMPATIBILIDADE</i>
Eucalyptus N #100	CPIII	27,80	52,50	T _{máx} < 50	incompatíveis
Pinus N #100	CPIII	29,20	52,50	T _{máx} < 50	incompatíveis
Casca N #100	CPIII	27,30	52,50	T _{máx} < 50	incompatíveis
Sisal N #100	CPIII	27,30	52,50	T _{máx} < 50	incompatíveis
Eucalyptus T #100	CPIII	26,70	52,50	T _{máx} < 50	incompatíveis
Pinus T #100	CPIII	34,70	52,50	T _{máx} < 50	incompatíveis
Casca T #100	CPIII	36,00	52,50	T _{máx} < 50	incompatíveis
Sisal T #100	CPIII	27,70	52,50	T _{máx} < 50	incompatíveis
Eucalyptus T s/adições 1:0,40:0,75	CPIII	31,00	52,50	T _{máx} < 50	incompatíveis
Eucalyptus T CaCl_2 1:0,40:0,75	CPIII	32,20	52,50	T _{máx} < 50	incompatíveis
Eucalyptus T SBR 1:0,40:0,75	CPIII	34,00	52,50	T _{máx} < 50	incompatíveis
Pinus T s/adições 1:0,40:0,75	CPIII	31,00	52,50	T _{máx} < 50	incompatíveis
Pinus T CaCl_2 1:0,40:0,75	CPIII	33,50	52,50	T _{máx} < 50	incompatíveis
Pinus T SBR 1:0,40:0,75	CPIII	32,50	52,50	T _{máx} < 50	incompatíveis
Casca T s/adições 1:0,36:0,50	CPIII	32,70	52,50	T _{máx} < 50	incompatíveis
Casca T CaCl_2 1:0,36:0,50	CPIII	36,70	52,50	T _{máx} < 50	incompatíveis
Casca T SBR 1:0,36:0,50	CPIII	31,80	52,50	T _{máx} < 50	incompatíveis
Sisal T s/adições 1:0,15:0,55	CPIII	28,50	52,50	T _{máx} < 50	incompatíveis
Sisal T CaCl_2 1:0,15:0,55	CPIII	30,30	52,50	T _{máx} < 50	incompatíveis
Sisal T SBR 1:0,15:0,55	CPIII	28,30	52,50	T _{máx} < 50	incompatíveis
Sisal T s/adições 1:0,036:0,40 t	CPIII	36,50	52,50	T _{máx} < 50	incompatíveis
Sisal T CaCl_2 1:0,036:0,40 t	CPIII	52,90	52,50	50 < T _{máx} < 60	compatíveis
Sisal T SBR 1:0,036:0,40 t	CPIII	33,70	52,50	T _{máx} < 50	incompatíveis

Tabela 4.7 - Grau de compatibilidade das misturas baseado na temperatura máxima (CPV-ARI).

<i>TEMPERATURA MÁXIMA - Sandermann e Kholer (citados por HOFSTRAND et al., 1984)</i>					
<i>Tipo da Mistura</i>	<i>Tipo de Cimento</i>	<i>T_{máx} Resíduo</i>	<i>T_{máx} Cimento</i>	<i>Condição</i>	<i>GRAU DE COMPATIBILIDADE</i>
Eucalyptus N #100	CPV-ARI	31,70	106,40	T _{máx} < 50	incompatíveis
Pinus N #100	CPV-ARI	69,60	106,40	T _{máx} > 60	altamente compatíveis
Casca N #100	CPV-ARI	30,60	106,40	T _{máx} < 50	incompatíveis
Sisal N #100	CPV-ARI	36,40	106,40	T _{máx} < 50	incompatíveis
Eucalyptus T s/adições #100	CPV-ARI	63,70	106,40	T _{máx} > 60	altamente compatíveis
Eucalyptus T CaCl ₂ #100	CPV-ARI	71,00	106,40	T _{máx} > 60	altamente compatíveis
Eucalyptus T SBR #100	CPV-ARI	62,70	106,40	T _{máx} > 60	altamente compatíveis
Pinus T s/adições #100	CPV-ARI	77,50	106,40	T _{máx} > 60	altamente compatíveis
Pinus T CaCl ₂ #100	CPV-ARI	76,60	106,40	T _{máx} > 60	altamente compatíveis
Pinus T SBR #100	CPV-ARI	75,50	106,40	T _{máx} > 60	altamente compatíveis
Casca T s/adições #100	CPV-ARI	34,70	106,40	T _{máx} < 50	incompatíveis
Casca T CaCl ₂ #100	CPV-ARI	69,90	106,40	T _{máx} > 60	altamente compatíveis
Casca T SBR #100	CPV-ARI	34,70	106,40	T _{máx} < 50	incompatíveis
Sisal T s/adições #100	CPV-ARI	41,50	106,40	T _{máx} < 50	incompatíveis
Sisal T CaCl ₂ #100	CPV-ARI	72,00	106,40	T _{máx} > 60	altamente compatíveis
Sisal T SBR #100	CPV-ARI	36,50	106,40	T _{máx} < 50	incompatíveis
Eucalyptus T s/adições 1:0,40:0,75	CPV-ARI	41,00	106,40	T _{máx} < 50	incompatíveis
Eucalyptus T CaCl ₂ 1:0,40:0,75	CPV-ARI	50,70	106,40	50 < T _{máx} < 60	compatíveis
Eucalyptus T SBR 1:0,40:0,75	CPV-ARI	39,50	106,40	T _{máx} < 50	incompatíveis
Pinus T s/adições 1:0,40:0,55	CPV-ARI	42,50	106,40	T _{máx} < 50	incompatíveis
Pinus T CaCl ₂ 1:0,40:0,55	CPV-ARI	52,20	106,40	50 < T _{máx} < 60	compatíveis
Pinus T SBR 1:0,40:0,55	CPV-ARI	41,00	106,40	T _{máx} < 50	incompatíveis
Pinus T s/adições 1:0,40:0,75	CPV-ARI	43,00	106,40	T _{máx} < 50	incompatíveis
Pinus T CaCl ₂ 1:0,40:0,75	CPV-ARI	47,90	106,40	T _{máx} < 50	incompatíveis
Pinus T SBR 1:0,40:0,75	CPV-ARI	38,70	106,40	T _{máx} < 50	incompatíveis
Casca T s/adições 1:0,36:0,50	CPV-ARI	46,20	106,40	T _{máx} < 50	incompatíveis
Casca T CaCl ₂ 1:0,36:0,50	CPV-ARI	76,00	106,40	T _{máx} > 60	altamente compatíveis
Casca T SBR 1:0,36:0,50	CPV-ARI	47,00	106,40	T _{máx} < 50	incompatíveis
Sisal T s/adições 1:0,108:0,48 t	CPV-ARI	57,00	106,40	50 < T _{máx} < 60	compatíveis
Sisal T CaCl ₂ 1:0,108:0,48 t	CPV-ARI	72,10	106,40	T _{máx} > 60	Altamente compatível
Sisal T SBR 1:0,108:0,48 t	CPV-ARI	47,70	106,40	T _{máx} < 50	incompatíveis
Sisal T s/adições 1:0,15:0,55 t	CPV-ARI	44,70	106,40	T _{máx} < 50	incompatíveis
Sisal T CaCl ₂ 1:0,15:0,55 t	CPV-ARI	62,90	106,40	T _{máx} > 60	Altamente compatível
Sisal T SBR 1:0,15:0,55 t	CPV-ARI	40,00	106,40	T _{máx} < 50	incompatíveis

O cimento Portland do tipo CPV-ARI, ao contrário dos cimentos anteriores, mostrou ser compatível com muitas misturas propostas. A capacidade reativa desse cimento está relacionada ao teor de aluminato tricálcico (C₃A) presente em sua composição, contribuindo para sua resistência inicial, pois libera uma grande quantidade de calor de hidratação. Por apresentar grande rapidez na pega é regularizado pela adição de gesso, o qual, pode variar de 6% a 13% em função do tipo de cimento. Na obtenção da temperatura máxima para cada

mistura, considerando-se as curvas de calor de hidratação de cada cimento, observou-se uma dependência entre o tempo para sua obtenção e o valor de temperatura máxima alcançada pelas misturas. Através das curvas de calor das pastas de cimento, conforme as figuras anteriormente apresentadas, quanto maior foi a temperatura alcançada menor foi o tempo determinado para sua obtenção; neste caso presume-se que as chances de endurecimento das misturas estão intimamente relacionadas com o tempo de pega. Observa-se que mesmo após um longo processo de endurecimento da mistura, durante o período de hidratação que pode se estender por horas, o compósito não fornece resistência mecânica adequada, resultando em seu enfraquecimento e até mesmo em sua desintegração total.

4.3.2 Índice de inibição baseado no monitoramento da curva do calor de hidratação

Nas Tabelas 4.8 a 4.11 e nas Figuras 4.27 a 4.29 apresenta-se o grau de compatibilidade baseado no índice de inibição dos resíduos passantes na malha #100 e fração normal, com e sem tratamentos. O índice de inibição, de acordo com Hofstrand et al. (1984), considera três parâmetros para a elaboração do cálculo, ou seja, a temperatura máxima, a inclinação máxima da curva exotérmica e o tempo necessário para obtenção da temperatura máxima. Contudo, como seu valor é relativo, foram comparados os parâmetros da mistura que contêm os resíduos com aqueles referentes à pasta de cimento. A classificação para os intervalos do grau de inibição, foi definida pela ordem de grandeza dos valores dos índices encontrados e pela capacidade de endurecimento das misturas (Tabela 4.8). Os sinais negativos, encontrados no cálculo de alguns índices, comprovam a presença dos extrativos dos resíduos que impediram a continuidade da reação, constituindo-se uma condição demasiadamente inibitória.

Tabela 4.8 - Intervalos dos limites máximos e mínimos de classificação do índice de inibição.

INTERVALOS DE CLASSIFICAÇÃO PARA O ÍNDICE DE INIBIÇÃO				
tipos de cimento	Condições inibitórias			
	não inibitório	fracamente inibitório	medianamente inibitório	fortemente inibitório
CPII-E	$l < 30$	$30 < l < 50$	$50 < l < 150$	-
CPIII	$l < 30$	-	-	-
CPV-ARI	$l < 30$	$30 < l < 50$	$50 < l < 150$	$150 < l < 300$

Tabela 4.9 - Grau de compatibilidade das misturas baseado no índice de inibição (CPII-E).

INDICE DE INIBIÇÃO - HOFSTRAND et al. (1984) - CPII-E							
Tipo da Mistura	Tipo de Cimento	Temperatura Máxima (°C)	Tempo da T _{máx} (h)	Inclinação da curva	GRAU DE INIBIÇÃO		
					Índice	Intervalo	Condição inibitória
Eucalyptus N #100	CPII-E	28,50	1,67	0,44	-43,6	-	fortemente inibitório
Pinus N #100	CPII-E	35,70	23,83	1,53	60,2	50 < (I) < 150	medianamente inibitório
Casca N #100	CPII-E	26,70	2,42	0,33	-41,7	-	fortemente inibitório
Sisal N #100	CPII-E	28,30	2,33	0,65	-39,4	-	fortemente inibitório
Eucalyptus T #100	CPII-E	28,30	12,25	0,44	17,5	(I) < 30	não inibitório
Pinus T #100	CPII-E	27,80	20,42	1,31	46,3	30 < (I) < 50	fracamente inibitório
Casca T #100	CPII-E	29,50	23,87	0,87	64,8	50 < (I) < 150	medianamente inibitório
Sisal T #100	CPII-E	29,10	0,92	0,55	-48,6	-	fortemente inibitório
Eucalyptus T s/adições 1:0,40:0,75	CPII-E	31,10	4,75	0,65	-23,7	-	fortemente inibitório
Eucalyptus T CaCl ₂ 1:0,40:0,75	CPII-E	32,70	3,92	1,09	-25,8	-	fortemente inibitório
Eucalyptus T SBR 1:0,40:0,75	CPII-E	31,00	2,42	1,64	-33,4	-	fortemente inibitório
Pinus T s/adições 1:0,40:0,75	CPII-E	32,70	0,58	0,22	-44,3	-	fortemente inibitório
Pinus T CaCl ₂ 1:0,40:0,75	CPII-E	33,70	0,42	0,65	-42,4	-	fortemente inibitório
Pinus T SBR 1:0,40:0,75	CPII-E	33,00	0,50	1,20	-41,3	-	fortemente inibitório
Casca T s/adições 1:0,36:0,50	CPII-E	35,20	13,67	0,98	19,1	(I) < 30	não inibitório
Casca T CaCl ₂ 1:0,36:0,50	CPII-E	37,50	12,67	-0,16	14,6	(I) < 30	não inibitório
Casca T SBR 1:0,36:0,50	CPII-E	33,70	17,25	0,87	37,0	30 < (I) < 50	fracamente inibitório
Sisal T s/adições 1:0,15:0,55	CPII-E	29,20	4,75	1,53	-23,6	-	fortemente inibitório
Sisal T CaCl ₂ 1:0,15:0,55	CPII-E	29,60	1,58	1,09	-40,7	-	fortemente inibitório
Sisal T SBR 1:0,15:0,55	CPII-E	29,10	4,67	1,31	-24,5	-	fortemente inibitório
Sisal T s/adições 1:0,036:0,40	CPII-E	36,50	23,42	1,20	58,2	50 < (I) < 150	medianamente inibitório
Sisal T CaCl ₂ 1:0,036:0,40	CPII-E	52,90	10,25	5,24	1,0	(I) < 30	não inibitório
Sisal T SBR 1:0,036:0,40	CPII-E	33,70	0,75	0,65	-40,8	-	fortemente inibitório

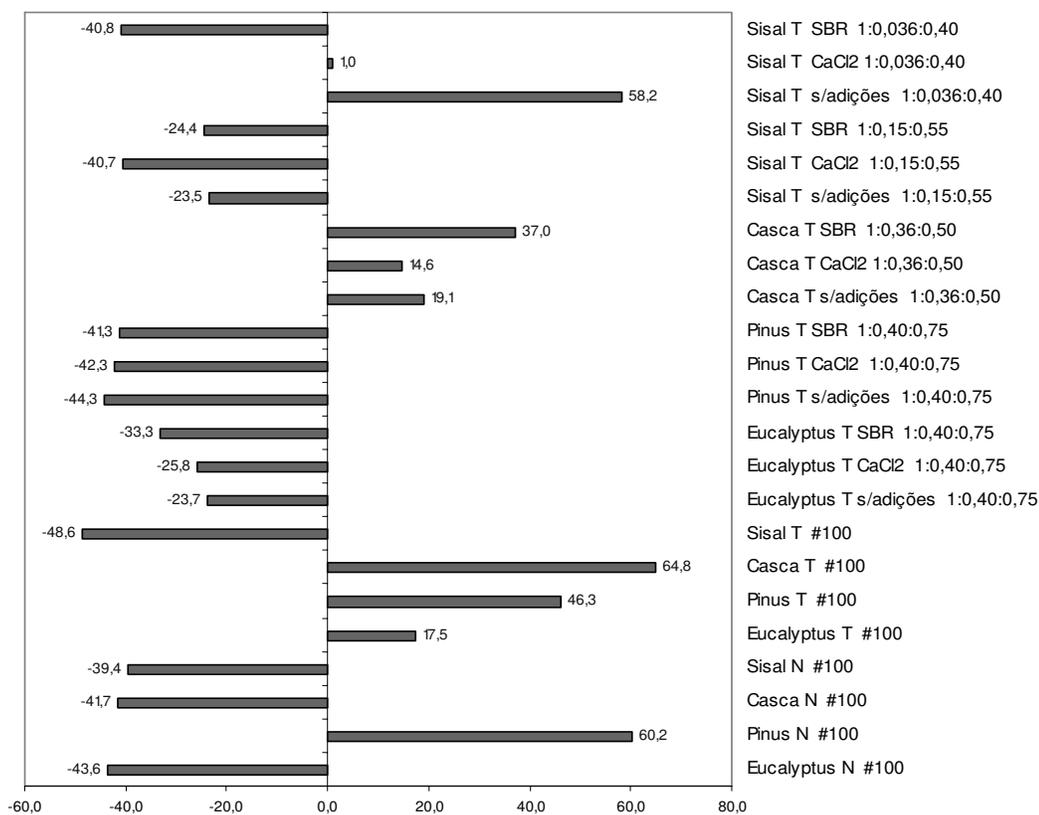


Figura 4.27 - Grau de compatibilidade química pelo índice de inibição das misturas (CPII-E).

Os resultados dos cálculos dos índices inibitórios foram representados por intermédio dos diagramas de barras horizontais, de acordo com a Figura 4.27. O gráfico possui uma linha divisória vertical, com abscissa de valor zero, onde as barras localizadas à esquerda indicam as misturas inibitórias (valores com sinais negativos). Já ao lado direito, o grau de inibição está representado proporcionalmente pelo valor do índice, ou seja, quanto maior for esse valor maior será o grau de inibição, onde a condição inibitória é definida em função dos intervalos de classificação.

Tabela 4.10 - Grau de compatibilidade das misturas baseado no índice de inibição (CPIII).

INDICE DE INIBIÇÃO - HOFSTRAND et al. (1984) - CPIII								
Tipo da Mistura	Tipo de Cimento	Temperatura Máxima (°C)	Tempo da T _{máx} (h)	Inclinação da curva	GRAU DE INIBIÇÃO			
					Índice	Intervalo	Condição inibitória	
Eucalyptus N #100	CPIII	27,80	2,00	0,44	-36,0	-	fortemente inibitório	
Pinus N #100	CPIII	29,20	0,92	0,11	-40,0	-	fortemente inibitório	
Casca N #100	CPIII	27,30	10,58	0,55	-9,3	-	fortemente inibitório	
Sisal N #100	CPIII	27,30	6,08	0,55	-22,0	-	fortemente inibitório	
Eucalyptus T #100	CPIII	26,70	1,58	0,55	-37,2	-	fortemente inibitório	
Pinus T #100	CPIII	34,70	23,67	0,55	29,5	(I) < 30	não inibitório	
Casca T #100	CPIII	36,00	4,92	1,64	-21,1	-	fortemente inibitório	
Sisal T #100	CPIII	27,70	1,75	0,44	-38,3	-	fortemente inibitório	
Eucalyptus T s/adições 1:0,40:0,75	CPIII	31,00	3,17	1,42	-22,9	-	fortemente inibitório	
Eucalyptus T CaCl ₂ 1:0,40:0,75	CPIII	32,20	2,58	1,09	-8,8	-	fortemente inibitório	
Eucalyptus T SBR 1:0,40:0,75	CPIII	34,00	15,92	-0,22	-32,3	-	trecho atípico	
Pinus T s/adições 1:0,40:0,75	CPIII	31,00	0,25	0,22	-38,5	-	fortemente inibitório	
Pinus T CaCl ₂ 1:0,40:0,75	CPIII	33,50	0,25	0,22	-34,0	-	fortemente inibitório	
Pinus T SBR 1:0,40:0,75	CPIII	32,50	0,42	0,11	-36,2	-	fortemente inibitório	
Casca T s/adições 1:0,36:0,50	CPIII	32,70	15,42	0,55	4,6	(I) < 30	não inibitório	
Casca T CaCl ₂ 1:0,36:0,50	CPIII	36,70	20,92	0,55	14,6	(I) < 30	não inibitório	
Casca T SBR 1:0,36:0,50	CPIII	31,80	15,00	0,65	3,6	(I) < 30	não inibitório	
Sisal T s/adições 1:0,036:0,40	CPIII	33,00	23,42	0,76	23,0	(I) < 30	não inibitório	
Sisal T CaCl ₂ 1:0,036:0,40	CPIII	46,00	18,42	1,75	2,9	(I) < 30	não inibitório	
Sisal T SBR 1:0,036:0,40	CPIII	31,70	1,50	0,98	-28,6	-	fortemente inibitório	
Sisal T s/adições 1:0,15:0,55	CPIII	28,50	3,42	0,65	-29,9	-	fortemente inibitório	
Sisal T CaCl ₂ 1:0,15:0,55	CPIII	30,30	1,58	0,55	-33,5	-	fortemente inibitório	
Sisal T SBR 1:0,15:0,55	CPIII	28,30	4,58	0,98	-24,8	-	fortemente inibitório	

A inclinação máxima da curva representa um importante parâmetro para o cálculo do índice de inibição. Com o objetivo de se obter melhor precisão possível, considerando-se um trecho que representasse a inclinação de fato, adotou-se para a sua determinação um intervalo de tempo correspondente a 1 h. Considerando-se que o intervalo de tempo das aquisições ocorreu a cada 5 min, foram determinadas inclinações a cada 12 aquisições, correspondente a 60 minutos, possibilitando a escolha da maior inclinação existente durante o fenômeno. Em vista da metodologia adotada não foram consideradas as inclinações ocorridas após a obtenção da

temperatura máxima, pois neste trecho, a liberação do calor gerado durante o processo de hidratação está condicionada à ação dos extrativos presentes nos resíduos. De certo modo, pode-se dizer que o poder de reação do cimento, quando em presença de substâncias inibitórias sofre uma desaceleração, impedindo o processo de endurecimento natural da mistura.

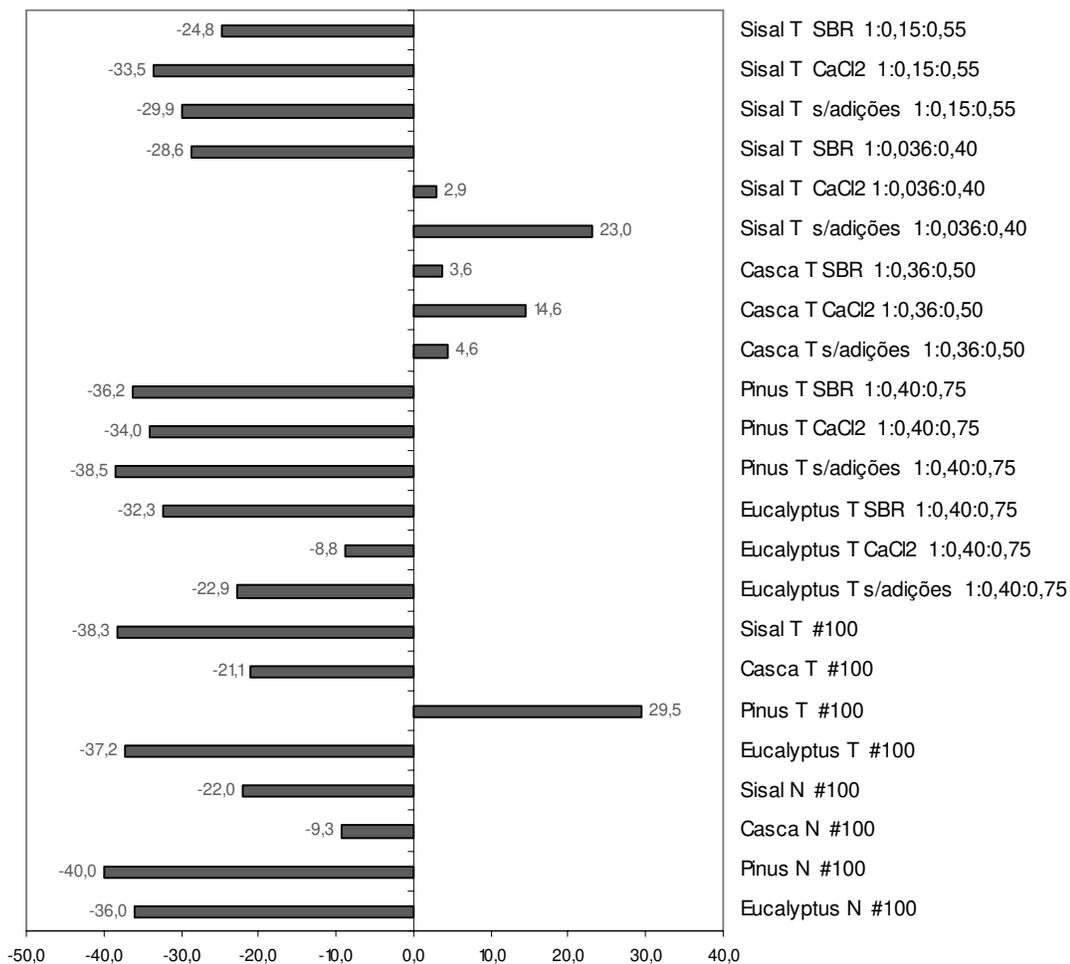


Figura 4.28 - Grau de compatibilidade química pelo índice de inibição das misturas (CPIII).

Os critérios de classificação para o índice de inibição obedeceram os limites mínimos e máximos encontrados para os tipos de cimento utilizados, de acordo com a Tabela 4.8. Os resultados dos índices de inibição das misturas com CPII-E e CPIII apresentaram grande incompatibilidade (60% para o cimento do tipo CPII-E e 70% para o CPIII). As características das curvas de hidratação desse lotes de cimentos, tais como, o valor da temperatura máxima de hidratação e o respectivo tempo para sua obtenção, não forneceram subsídios suficientes que

favorecessem uma condição mínima de compatibilidade. Em contrapartida, os resultados com o cimento CPV-ARI se mostraram mais compatíveis com as misturas ensaiadas (Tabela 4.11).

Tabela 4.11 - Grau de compatibilidade das misturas baseado no índice de inibição (CPV-ARI).

ÍNDICE DE INIBIÇÃO - HOFSTRAND et al. (1984) - CPV-ARI							
Tipo da Mistura	Tipo de Cimento	Temperatura Máxima (°C)	Tempo da T _{máx} (h)	Inclinação da curva	GRAU DE INIBIÇÃO		
					Índice	Intervalo	Condição inibitória
Eucalyptus N #100	CPV-ARI	31,70	0,25	0,00	-66,4	-	fortemente inibitório
Pinus N #100	CPV-ARI	69,60	12,67	16,80	42,3	30 < (I) < 50	fracamente inibitório
Casca N #100	CPV-ARI	30,60	0,17	0,11	-68,5	-	fortemente inibitório
Sisal N #100	CPV-ARI	36,40	2,50	2,95	-28,3	-	fortemente inibitório
Eucalyptus T s/adições #100	CPV-ARI	63,70	17,08	8,95	91,6	50 < (I) < 150	medianamente inibitório
Eucalyptus T CaCl ₂ #100	CPV-ARI	71,00	6,42	16,36	27,6	(I) < 30	não inibitório
Eucalyptus T SBR #100	CPV-ARI	62,70	19,17	6,44	115,4	50 < (I) < 150	medianamente inibitório
Pinus T s/adições #100	CPV-ARI	77,50	12,83	21,05	30,1	(I) < 30	não inibitório
Pinus T CaCl ₂ #100	CPV-ARI	76,60	6,25	22,15	6,1	(I) < 30	não inibitório
Pinus T SBR #100	CPV-ARI	75,50	14,42	16,80	43,2	30 < (I) < 50	fracamente inibitório
Casca T s/adições #100	CPV-ARI	34,70	0,50	0,55	-59,4	-	fortemente inibitório
Casca T CaCl ₂ #100	CPV-ARI	69,90	6,83	14,18	35,5	30 < (I) < 50	fracamente inibitório
Casca T SBR #100	CPV-ARI	34,70	0,92	0,44	-53,5	-	fortemente inibitório
Sisal T s/adições #100	CPV-ARI	41,50	23,92	2,51	245,5	150 < (I) < 300	fortemente inibitório
Sisal T CaCl ₂ #100	CPV-ARI	72,00	7,00	14,73	12,5	(I) < 30	não inibitório
Sisal T SBR #100	CPV-ARI	36,50	23,92	0,98	272,2	150 < (I) < 300	fortemente inibitório
Eucalyptus T s/adições 1:0,40:0,75	CPV-ARI	41,00	12,08	1,31	98,2	50 < (I) < 150	medianamente inibitório
Eucalyptus T CaCl ₂ 1:0,40:0,75	CPV-ARI	50,70	7,83	5,13	33,7	30 < (I) < 50	fracamente inibitório
Eucalyptus T SBR 1:0,40:0,75	CPV-ARI	39,50	12,83	1,31	110,5	50 < (I) < 150	medianamente inibitório
Pinus T s/adições 1:0,40:0,55	CPV-ARI	42,50	13,50	1,96	112,7	50 < (I) < 150	medianamente inibitório
Pinus T CaCl ₂ 1:0,40:0,55	CPV-ARI	52,20	6,67	6,00	20,6	(I) < 30	não inibitório
Pinus T SBR 1:0,40:0,55	CPV-ARI	41,00	15,50	1,31	142,9	50 < (I) < 150	medianamente inibitório
Pinus T s/adições 1:0,40:0,75	CPV-ARI	43,00	14,75	1,64	128,2	50 < (I) < 150	medianamente inibitório
Pinus T CaCl ₂ 1:0,40:0,75	CPV-ARI	47,90	9,67	3,60	57,0	50 < (I) < 150	medianamente inibitório
Pinus T SBR 1:0,40:0,75	CPV-ARI	38,70	17,33	0,76	174,5	150 < (I) < 300	fortemente inibitório
Casca T s/adições 1:0,36:0,50	CPV-ARI	46,20	10,58	2,51	70,7	50 < (I) < 150	medianamente inibitório
Casca T CaCl ₂ 1:0,36:0,50	CPV-ARI	76,00	6,50	8,29	10,1	(I) < 30	não inibitório
Casca T SBR 1:0,36:0,50	CPV-ARI	47,00	11,33	2,18	78,9	50 < (I) < 150	medianamente inibitório
Sisal T s/adições 1:0,108:0,48 t	CPV-ARI	57,00	7,58	8,18	25,86	50 < (I) < 150	medianamente inibitório
Sisal T CaCl ₂ 1:0,108:0,48 t	CPV-ARI	72,10	3,42	18,98	5,37	(I) < 30	não inibitório
Sisal T SBR 1:0,108:0,48 t	CPV-ARI	47,70	9,50	3,05	55,89	30 < (I) < 50	fracamente inibitório
Sisal T s/adições 1:0,15:0,55 t	CPV-ARI	44,70	8,58	2,40	48,39	30 < (I) < 50	fracamente inibitório
Sisal T CaCl ₂ 1:0,15:0,55 t	CPV-ARI	62,90	3,75	13,64	5,59	(I) < 30	não inibitório
Sisal T SBR 1:0,15:0,55 t	CPV-ARI	40,00	9,58	1,42	66,32	30 < (I) < 50	fracamente inibitório

Os resultados obtidos no cálculo dos índices inibitórios das misturas com utilização do cimento CPV-ARI apresentaram boa compatibilidade. Neste caso, as características das curvas de hidratação do cimento, tais como, o valor da temperatura máxima de hidratação e o respectivo tempo para sua obtenção, auxiliaram no sentido de compensar a inibição da mistura devido à presença dos resíduos vegetais. Além de outros fatores, a capacidade de reação do cimento influencia, decisivamente, no bom desempenho da mistura durante o período de hidratação.

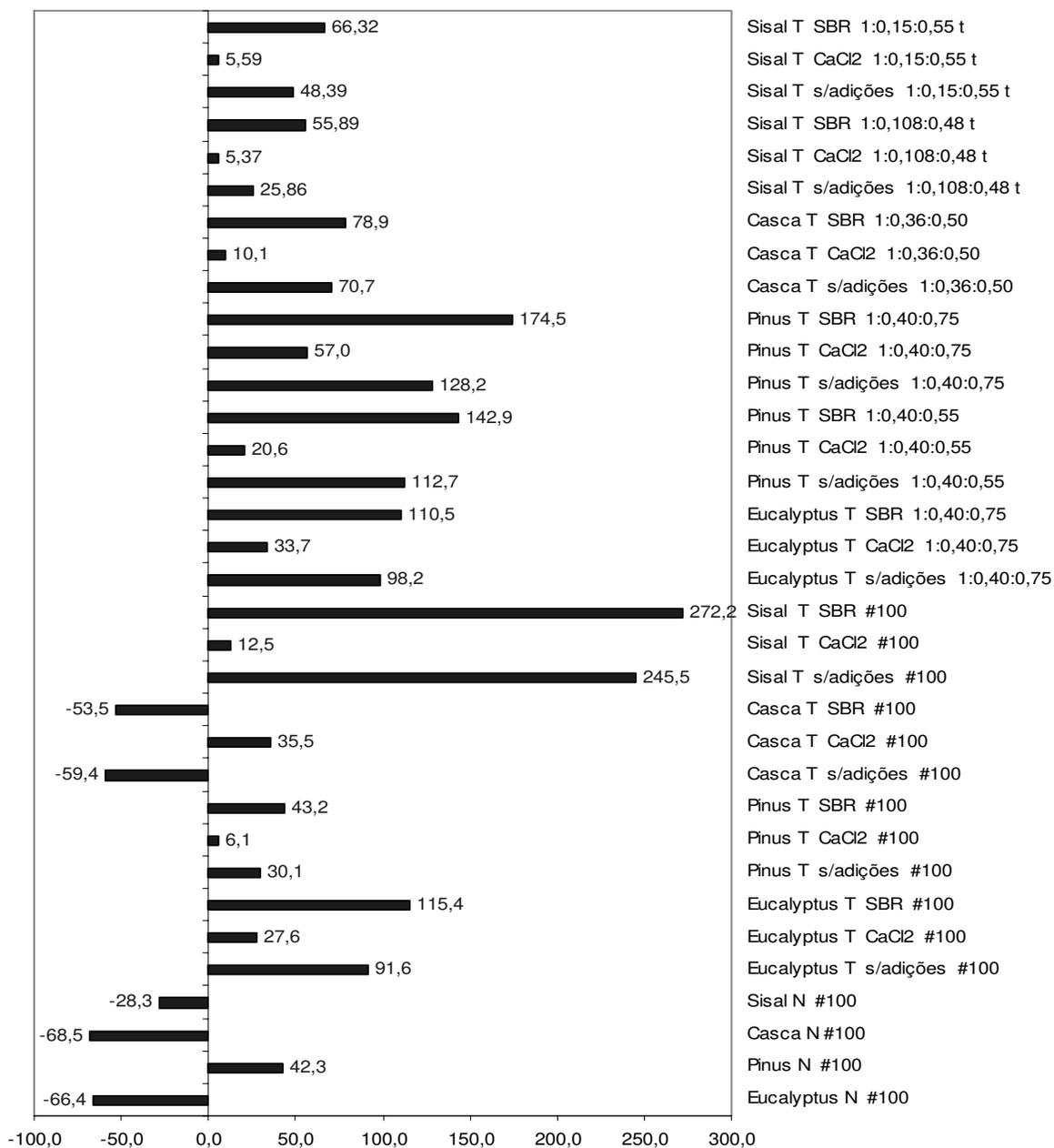


Figura 4.29 - Grau de compatibilidade química pelo índice de inibição das misturas (CPV-ARI).

4.3.3 Fator “CA” (razão entre as áreas abaixo das curvas do calor de hidratação)

Os graus de compatibilidade, segundo o fator CA, correspondente à razão entre as áreas abaixo das curvas do calor de hidratação das misturas com os resíduos passantes na malha #100 e fração normal, com e sem tratamentos, estão apresentados nas Tabelas 4.12 a 4.14.

Tabela 4.12 - Fator CA (razão entre as áreas abaixo da curva do calor) com o CII-E.

FATOR "CA" (Razão entre as áreas abaixo da curva do calor de hidratação) - HACHMI e MOSLEMI (1989)						
Tipo da Mistura	Área da mistura	Tipo de Cimento	Área cimento	CA	Condição	GRAU DE COMPATIBILIDADE
Eucalyptus N #100	38685,50	CII-E	59092,75	0,65	28% < CA < 68%	moderadamente compatível
Pinus N #100	41972,75	CII-E	59092,75	0,71	CA > 68%	compatível
Casca N #100	36748,25	CII-E	59092,75	0,62	28% < CA < 68%	moderadamente compatível
Sisal N #100	38722,75	CII-E	59092,75	0,66	28% < CA < 68%	moderadamente compatível
Eucalyptus T #100	37249,00	CII-E	59092,75	0,63	28% < CA < 68%	moderadamente compatível
Pinus T #100	43080,75	CII-E	59092,75	0,73	CA > 68%	compatível
Casca T #100	41025,00	CII-E	59092,75	0,69	CA > 68%	compatível
Sisal T #100	37745,00	CII-E	59092,75	0,64	28% < CA < 68%	moderadamente compatível
Eucalyptus T s/adições 1:0,40:0,75	42432,50	CII-E	59092,75	0,72	CA > 68%	compatível
Eucalyptus T CaCl ₂ 1:0,40:0,75	44726,75	CII-E	59092,75	0,76	CA > 68%	compatível
Eucalyptus T SBR 1:0,40:0,75	42903,50	CII-E	59092,75	0,73	CA > 68%	compatível
Pinus T s/adições 1:0,40:0,75	41791,00	CII-E	59092,75	0,71	CA > 68%	compatível
Pinus T CaCl ₂ 1:0,40:0,75	41534,75	CII-E	59092,75	0,70	CA > 68%	compatível
Pinus T SBR 1:0,40:0,75	41590,25	CII-E	59092,75	0,70	CA > 68%	compatível
Casca T s/adições 1:0,36:0,50	47846,00	CII-E	59092,75	0,81	CA > 68%	compatível
Casca T CaCl ₂ 1:0,36:0,50	49721,75	CII-E	59092,75	0,84	CA > 68%	compatível
Casca T SBR 1:0,36:0,50	46122,00	CII-E	59092,75	0,78	CA > 68%	compatível
Sisal T s/adições 1:0,15:0,55	40302,75	CII-E	59092,75	0,68	28% < CA < 68%	moderadamente compatível
Sisal T CaCl ₂ 1:0,15:0,55	40285,50	CII-E	59092,75	0,68	28% < CA < 68%	moderadamente compatível
Sisal T SBR 1:0,15:0,55	40371,75	CII-E	59092,75	0,68	28% < CA < 68%	moderadamente compatível
Sisal T s/adições 1:0,036:0,40	45815,25	CII-E	59092,75	0,78	CA > 68%	compatível
Sisal T CaCl ₂ 1:0,036:0,40	59001,75	CII-E	59092,75	1,00	CA > 68%	compatível
Sisal T SBR 1:0,036:0,40	44991,00	CII-E	59092,75	0,76	CA > 68%	compatível

Tabela 4.13 - Fator CA (razão entre as áreas abaixo da curva do calor) com o cimento CIII.

FATOR "CA" (Razão entre as áreas abaixo da curva do calor de hidratação) - HACHMI e MOSLEMI (1989)						
Tipo da Mistura	Área da mistura	Tipo de Cimento	Área do cimento	CA	Condição	GRAU DE COMPATIBILIDADE
Eucalyptus N #100	38922,00	CIII	56407,25	0,69	CA > 68%	compatível
Pinus N #100	41590,50	CIII	56407,25	0,74	CA > 68%	compatível
Casca N #100	39540,00	CIII	56407,25	0,70	CA > 68%	compatível
Sisal N #100	41063,00	CIII	56407,25	0,73	CA > 68%	compatível
Eucalyptus T #100	37214,50	CIII	56407,25	0,66	28% < CA < 68%	moderadamente compatível
Pinus T #100	39204,25	CIII	56407,25	0,70	CA > 68%	compatível
Casca T #100	38566,50	CIII	56407,25	0,68	CA > 68%	compatível
Sisal T #100	37843,00	CIII	56407,25	0,67	28% < CA < 68%	moderadamente compatível
Eucalyptus T s/adições 1:0,40:0,75	42923,50	CIII	56407,25	0,76	CA > 68%	compatível
Eucalyptus T CaCl ₂ 1:0,40:0,75	44777,50	CIII	56407,25	0,79	CA > 68%	compatível
Eucalyptus T SBR 1:0,40:0,75	47243,00	CIII	56407,25	0,84	CA > 68%	compatível
Pinus T s/adições 1:0,40:0,75	39776,75	CIII	56407,25	0,71	CA > 68%	compatível
Pinus T CaCl ₂ 1:0,40:0,75	41860,75	CIII	56407,25	0,74	CA > 68%	compatível
Pinus T SBR 1:0,40:0,75	41130,50	CIII	56407,25	0,73	CA > 68%	compatível
Casca T s/adições 1:0,36:0,50	45426,50	CIII	56407,25	0,81	CA > 68%	compatível
Casca T CaCl ₂ 1:0,36:0,50	51478,75	CIII	56407,25	0,91	CA > 68%	compatível
Casca T SBR 1:0,36:0,50	45048,50	CIII	56407,25	0,80	CA > 68%	compatível
Sisal T s/adições 1:0,15:0,55	39383,25	CIII	56407,25	0,70	CA > 68%	compatível
Sisal T CaCl ₂ 1:0,15:0,55	41325,25	CIII	56407,25	0,73	CA > 68%	compatível
Sisal T SBR 1:0,15:0,55	39410,50	CIII	56407,25	0,70	CA > 68%	compatível
Sisal T s/adições 1:0,036:0,40	44131,75	CIII	56407,25	0,78	CA > 68%	compatível
Sisal T CaCl ₂ 1:0,036:0,40	55805,25	CIII	56407,25	0,99	CA > 68%	compatível
Sisal T SBR 1:0,036:0,40	43995,50	CIII	56407,25	0,78	CA > 68%	compatível

Tabela 4.14 - Fator CA (razão entre as áreas abaixo da curva do calor) com o CPV-ARI.

FATOR "CA" (Razão entre as áreas abaixo da curva do calor de hidratação) - HACHMI e MOSLEMI (1989)						
Tipo da Mistura	Área da mistura	Tipo de Cimento	Área do cimento	CA	Condição	GRAU DE COMPATIBILIDADE
Eucalyptus N #100	39211,75	CPV-ARI	66245,00	0,59	28% < CA < 68%	Moderadamente compatível
Pinus N #100	60526,50	CPV-ARI	66245,00	0,91	CA > 68%	compatível
Casca N #100	39218,25	CPV-ARI	66245,00	0,59	28% < CA < 68%	Moderadamente compatível
Sisal N #100	41877,00	CPV-ARI	66245,00	0,63	28% < CA < 68%	Moderadamente compatível
Eucalyptus T s/adições #100	60301,50	CPV-ARI	66245,00	0,91	CA > 68%	compatível
Eucalyptus T CaCl ₂ #100	66259,25	CPV-ARI	66245,00	1,00	CA > 68%	compatível
Eucalyptus T SBR #100	60983,00	CPV-ARI	66245,00	0,92	CA > 68%	compatível
Pinus T s/adições #100	68180,75	CPV-ARI	66245,00	1,03	CA > 68%	compatível
Pinus T CaCl ₂ #100	67883,00	CPV-ARI	66245,00	1,02	CA > 68%	compatível
Pinus T SBR #100	67258,75	CPV-ARI	66245,00	1,02	CA > 68%	compatível
Casca T s/adições #100	46230,75	CPV-ARI	66245,00	0,70	CA > 68%	compatível
Casca T CaCl ₂ #100	65255,75	CPV-ARI	66245,00	0,99	CA > 68%	compatível
Casca T SBR #100	48015,50	CPV-ARI	66245,00	0,72	CA > 68%	compatível
Sisal T s/adições #100	48539,25	CPV-ARI	66245,00	0,73	CA > 68%	compatível
Sisal T CaCl ₂ #100	65897,50	CPV-ARI	66245,00	0,99	CA > 68%	compatível
Sisal T SBR #100	47555,50	CPV-ARI	66245,00	0,72	CA > 68%	compatível
Eucalyptus T s/adições 1:0,40:0,75	53628,75	CPV-ARI	66245,00	0,81	CA > 68%	compatível
Eucalyptus T CaCl ₂ 1:0,40:0,75	57310,25	CPV-ARI	66245,00	0,87	CA > 68%	compatível
Eucalyptus T SBR 1:0,40:0,75	51974,00	CPV-ARI	66245,00	0,78	CA > 68%	compatível
Pinus T s/adições 1:0,40:0,55	52935,75	CPV-ARI	66245,00	0,80	CA > 68%	compatível
Pinus T CaCl ₂ 1:0,40:0,55	58555,50	CPV-ARI	66245,00	0,88	CA > 68%	compatível
Pinus T SBR 1:0,40:0,55	53010,25	CPV-ARI	66245,00	0,80	CA > 68%	compatível
Pinus T s/adições 1:0,40:0,75	53724,50	CPV-ARI	66245,00	0,81	CA > 68%	compatível
Pinus T CaCl ₂ 1:0,40:0,75	55983,00	CPV-ARI	66245,00	0,85	CA > 68%	compatível
Pinus T SBR 1:0,40:0,75	51226,75	CPV-ARI	66245,00	0,77	CA > 68%	compatível
Casca T s/adições 1:0,36:0,50	55136,25	CPV-ARI	66245,00	0,83	CA > 68%	compatível
Casca T CaCl ₂ 1:0,36:0,50	86669,25	CPV-ARI	66245,00	1,31	CA > 68%	compatível
Casca T SBR 1:0,36:0,50	58080,75	CPV-ARI	66245,00	0,88	CA > 68%	compatível
Sisal T s/adições 1:0,108:0,48	59645,50	CPV-ARI	66245,00	0,90	CA > 68%	compatível
Sisal T CaCl ₂ 1:0,108:0,48	64430,50	CPV-ARI	66245,00	0,97	CA > 68%	compatível
Sisal T SBR 1:0,108:0,48	56545,00	CPV-ARI	66245,00	0,85	CA > 68%	compatível
Sisal T s/adições 1:0,15:0,55	55768,50	CPV-ARI	66245,00	0,84	CA > 68%	compatível
Sisal T CaCl ₂ 1:0,15:0,55	59014,25	CPV-ARI	66245,00	0,89	CA > 68%	compatível
Sisal T SBR 1:0,15:0,55	52898,00	CPV-ARI	66245,00	0,80	CA > 68%	compatível

O fator CA corresponde à capacidade de produção de calor produzida durante o período de hidratação proveniente da mistura com os resíduos em relação à pasta de cimento. A interferência causada pelos resíduos presentes na mistura, durante o processo de hidratação dos grãos de cimento, tem influência direta sobre a quantidade de calor produzida. O calor produzido durante o período de hidratação, com o endurecimento da mistura, pode, então, ser utilizado como um indicador de compatibilidade. Durante o período de hidratação a quantidade de calor varia em função das eventuais trocas de calor, assim, quanto maior for o valor do fator CA, maior será a quantidade de calor liberada e, conseqüentemente, maior será a compatibilidade química de uma determinada biomassa vegetal.

Dentre as metodologias utilizadas para avaliar o grau de compatibilidade das misturas, o cálculo do índice de inibição foi o que se mostrou mais objetivo e criterioso, em vista dos parâmetros de cálculo considerados (temperatura máxima, tempo de obtenção da temperatura máxima e inclinação da curva de hidratação). A metodologia baseada na temperatura máxima, considerando-se que a referência de comparação é sempre a pasta de cimento, dependerá sempre do grau de reatividade do mesmo; desse modo sua tendência será de incompatibilidade quando o cimento for de baixa reatividade e de compatibilidade quando este tiver boa capacidade de reação. A metodologia do cálculo do fator CA considera sempre uma porcentagem relativa do calor gerado, não importando o grau de reatividade do cimento e, portanto, analisa sempre sob o ponto de vista otimista, com a tendência em classificar as misturas como compatíveis.

4.4 Caracterização física e mecânica dos compósitos

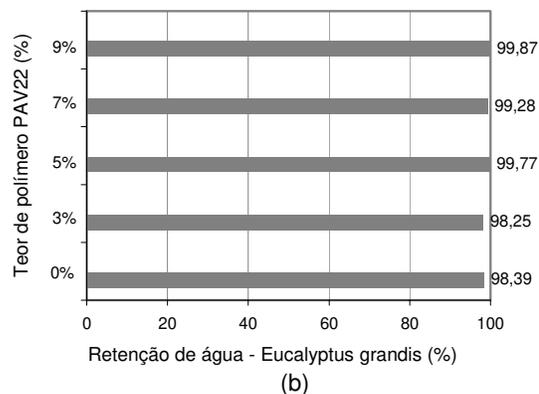
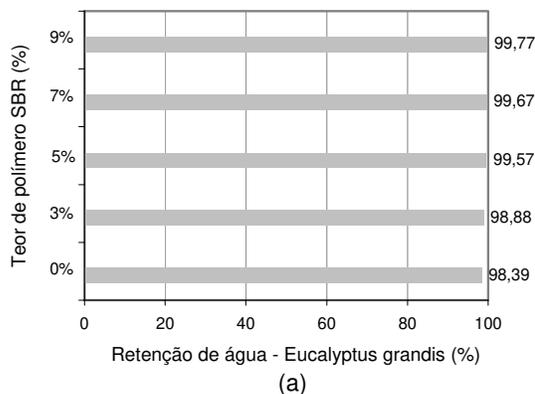
Tendo em vista a avaliação do grau de compatibilidade do cimento em relação aos resíduos, optou-se pela utilização do cimento CPV-ARI (alta resistência inicial), que apresentou um desempenho mais adequado à aplicação proposta. Desse modo, na caracterização dos compósitos e dos blocos, utilizou-se somente este tipo de cimento.

4.4.1 Índice de retenção de água das misturas

A determinação dos índices de retenção de água foi efetuada com base nos procedimentos prescritos pela norma NBR-13277 e apresentados pelas Tabelas 4.15 a 4.18 e Figuras 4.30 a 4.33. Os resultados apresentaram baixa variação do índice com a adição dos polímeros, considerando-se o baixo teor de água utilizado; isto pode ser atribuído à capacidade de absorção de água por parte dos resíduos vegetais ou em razão da formação da película de polímero que impermeabiliza a mistura, evitando a evaporação ou a perda de água. De acordo com Sakai e Sujita (1995), a capacidade da argamassa polimérica, tanto de impedir a penetração de água como de evitar sua saída da mistura, está relacionada à formação de uma película polimérica. A retenção da água depende da relação do teor de polímero presente na mistura em relação ao cimento (P/C). Provavelmente, as razões para isto podem ser explicadas em vista das propriedades hidrofílicas e coloidais inerentes ao látex (OHAMA, 1998).

Tabela 4.15 - Retenção de água do compósito de *Eucalyptus grandis* (SBR e PAV22).

Índice de retenção de água - <i>Eucalyptus grandis</i> traço 1:0,36:0,84									
Teor de polímero SBR	C1	C2	C3	Média	Teor de polímero PAV22	C1	C2	C3	Média
0%	98,21	98,85	98,12	98,39	0%	98,21	98,85	98,12	98,39
3%	99,18	98,00	99,46	98,88	3%	97,54	99,20	98,02	98,25
5%	100,92	98,16	99,64	99,57	5%	99,35	103,42	96,55	99,77
7%	103,31	98,53	97,16	99,67	7%	100,08	98,36	99,41	99,28
9%	99,35	103,42	96,55	99,77	9%	103,05	97,68	98,87	99,87

Figura 4.30 - Retenção de água do compósito de *Eucalyptus grandis*: (a) (SBR) e (b) PAV22.Tabela 4.16 - Retenção de água do compósito de *Pinus caribaea* (SBR e PAV22).

Índice de retenção de água - <i>Pinus caribaea</i> traço 1:0,36:1,08									
Teor de polímero SBR	C1	C2	C3	Média	Teor de polímero PAV22	C1	C2	C3	Média
0%	98,06	96,38	97,48	97,31	0%	98,06	96,38	97,48	97,31
3%	99,83	98,86	97,33	98,67	3%	98,28	98,21	99,21	98,57
5%	98,16	98,22	99,04	98,47	5%	98,83	98,86	98,33	98,67
7%	98,99	99,07	98,66	98,91	7%	98,44	98,33	98,69	98,49
9%	98,83	98,86	98,33	98,67	9%	98,26	98,48	99,56	98,77

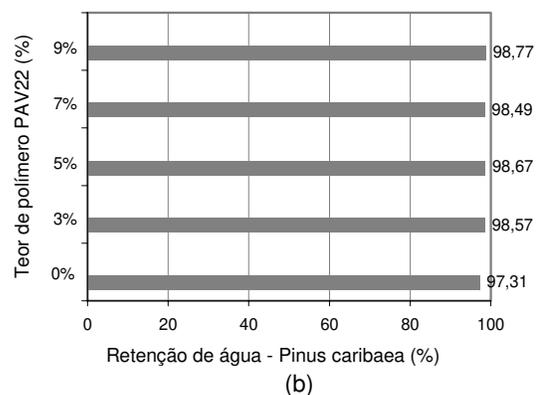
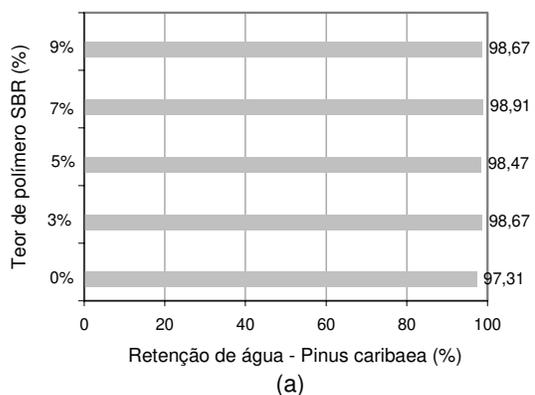
Figura 4.31 - Retenção de água do compósito de *Pinus caribaea*: (a) SBR e (b) PAV22.

Tabela 4.17 - Retenção de água do compósito de casca de arroz (SBR e PAV22).

Índice de retenção de água - casca de arroz traço 1:0,28:0,65									
Teor de polímero SBR	C1	C2	C3	Média	Teor de polímero PAV22	C1	C2	C3	Média
0%	97,69	97,89	97,76	97,78	0%	97,69	97,89	97,76	97,78
3%	99,04	100,19	98,23	99,15	3%	99,15	98,79	99,20	99,05
5%	97,75	98,61	100,48	98,95	5%	99,42	98,76	98,96	99,05
7%	100,15	98,79	98,20	99,05	7%	98,83	98,82	98,33	98,66
9%	99,57	99,68	99,56	99,60	9%	99,29	100,13	98,33	99,25

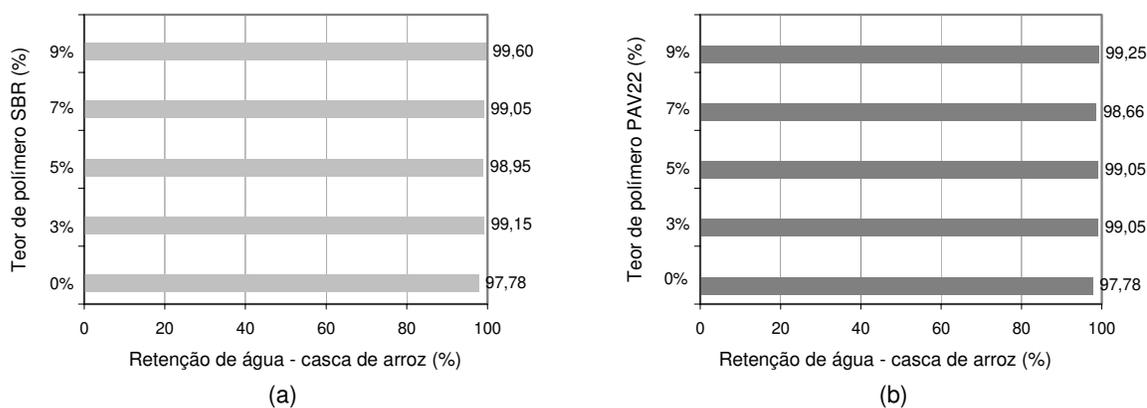
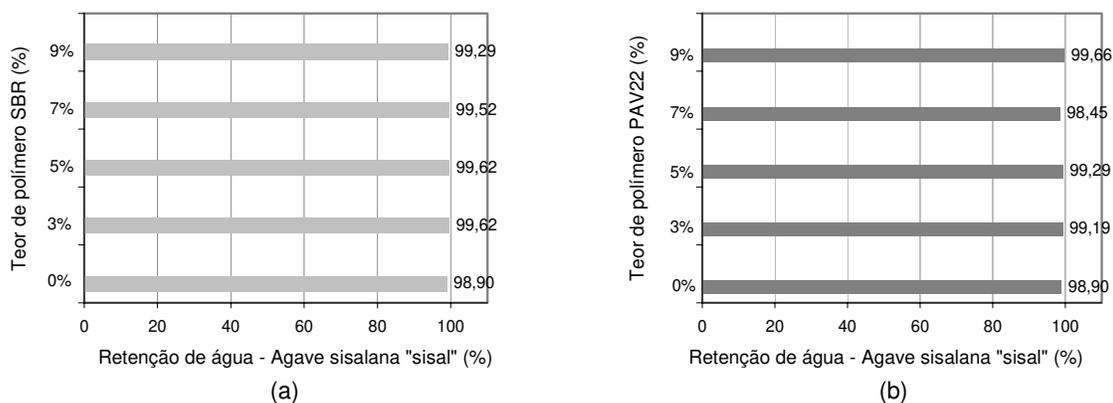


Figura 4.32 - Retenção de água do compósito de casca de arroz: (a) SBR e (b) PAV22.

Tabela 4.18 - Retenção de água do compósito de *Agave sisalana* "sisal" (SBR e PAV22).

Índice de retenção de água - <i>Agave sisalana</i> (sisal) traço 1:0.0,08:0,60									
Teor de polímero SBR	C1	C2	C3	Média	Teor de polímero PAV22	C1	C2	C3	Média
0%	99,22	97,82	99,67	98,90	0%	99,22	97,82	99,67	98,90
3%	99,31	99,23	99,33	99,29	3%	98,31	99,53	99,73	99,19
5%	99,69	99,50	99,68	99,62	5%	99,31	99,23	99,33	99,29
7%	99,31	99,53	99,73	99,52	7%	99,35	99,42	96,59	98,45
9%	99,31	99,23	99,33	99,29	9%	99,68	99,70	99,60	99,66

Figura 4.33 - Retenção de água do compósito de *Agave sisalana*: (a) SBR e (b) PAV22.

4.4.2 Velocidade do pulso ultra-sônico (VPU) através dos compósitos

Nas Tabelas 4.19 a 4.26 e Figuras 4.34 a 4.41 estão apresentados os resultados obtidos com a determinação da VPU através dos compósitos. De um modo geral, foi constatado um aumento da velocidade ao longo dos 7 primeiros dias após a moldagem dos compósitos. Decorrido esse período de tempo, até o limite de 28 dias, os resultados apresentaram valores oscilantes com tendências à sua estabilização para um determinado valor. Como o equipamento de ultra-som detecta descontinuidades internas em materiais, a propagação da onda gerada no interior dos compósitos reflete a descontinuidade existente em razão da heterogeneidade, que pode ser influenciada pelo processo de mistura, granulometria, densidade dos componentes, etc. Embora tenha ocorrido aumento da VPU no período de 7 dias em todos os casos, as adições dos polímeros tiveram influência na VPU, em função do tipo de polímero e do teor utilizado. Nos compósitos à base de *Eucalyptus grandis*, casca de arroz e sisal a adição dos polímeros aumentou a VPU; já para os compósitos de *Pinus caribaea* diminuiu a VPU. Os compósitos à base de sisal apresentaram maiores valores de VPU, na faixa de 3,0 km/s a 3,5 km/s, em relação aos compósitos dos outros resíduos que oscilaram na faixa de 1,4 km/s a 2,2 km/s.

Tabela 4.19 - VPU no compósito de *Eucalyptus grandis* (SBR).

Modelo matemático para velocidade do pulso ultra-sônico (VPU)			
tipo de compósito	Teor de SBR	Equação da $v=f(t)$	Cof. de determinação
Eucalyptus grandis traço 1:0,36:0,84	0%	$v = 1,73.[1-\exp(-1,34-0,63t)]$	$r^2 = 0,98$
	3%	$v = 1,67.[1-\exp(-1,49-0,60t)]$	$r^2 = 0,96$
	5%	$v = 1,76.[1-\exp(-1,11-0,61t)]$	$r^2 = 0,99$
	7%	$v = 1,82.[1-\exp(-1,11-0,56t)]$	$r^2 = 0,98$
	9%	$v = 1,75.[1-\exp(-0,74-0,68t)]$	$r^2 = 0,95$

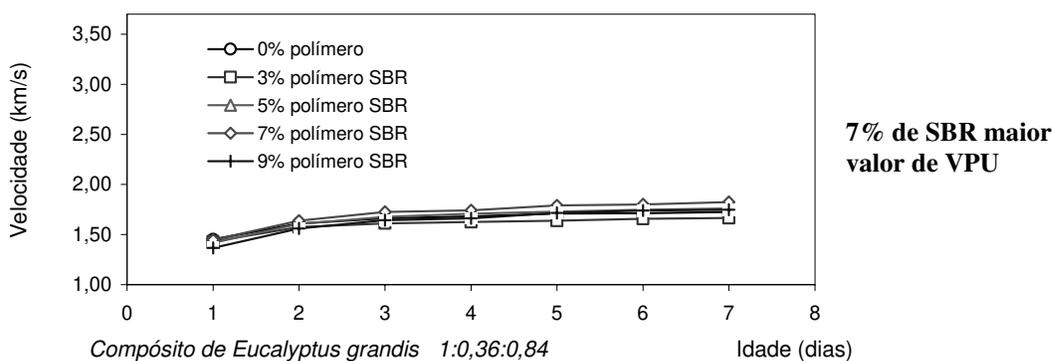
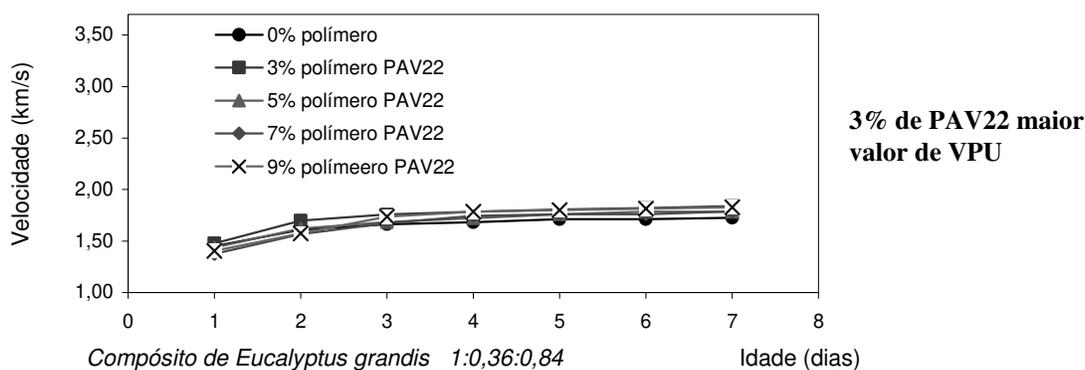


Figura 4.34 - VPU no compósito de *Eucalyptus grandis* (SBR).

Tabela 4.20 - VPU no compósito de *Eucalyptus grandis* (PAV22).

Modelo matemático para velocidade do pulso ultra-sônico (VPU)			
tipo de compósito	Teor de PAV22	Equação da $v=f(t)$	Cof. de determinação
Eucalyptus grandis traço 1:0,36:0,84	0%	$v = 1,73.[1-\exp(-1,34-0,63t)]$	$r^2 = 0,98$
	3%	$v = 1,84.[1-\exp(-1,28-0,56t)]$	$r^2 = 0,98$
	5%	$v = 1,78.[1-\exp(-1,00-0,65t)]$	$r^2 = 0,98$
	7%	$v = 1,79.[1-\exp(-1,00-0,58t)]$	$r^2 = 0,94$
	9%	$v = 1,83.[1-\exp(-0,74-0,71t)]$	$r^2 = 0,99$

Figura 4.35 - VPU no compósito de *Eucalyptus grandis* (PAV22).Tabela 4.21 - VPU no compósito de *Pinus caribaea* (SBR).

Modelo matemático para velocidade do pulso ultra-sônico (VPU)			
tipo de compósito	Teor de SBR	Equação da $v=f(t)$	Cof. de determinação
Pinus caribaea traço 1:0,36:1,08	0%	$v = 2,13.[1-\exp(-1,24-0,70t)]$	$r^2 = 0,93$
	3%	$v = 2,07.[1-\exp(-1,24-0,67t)]$	$r^2 = 0,99$
	5%	$v = 2,09.[1-\exp(-1,08-0,70t)]$	$r^2 = 0,98$
	7%	$v = 2,07.[1-\exp(-0,92-0,73t)]$	$r^2 = 0,97$
	9%	$v = 2,02.[1-\exp(-1,00-0,73t)]$	$r^2 = 0,96$

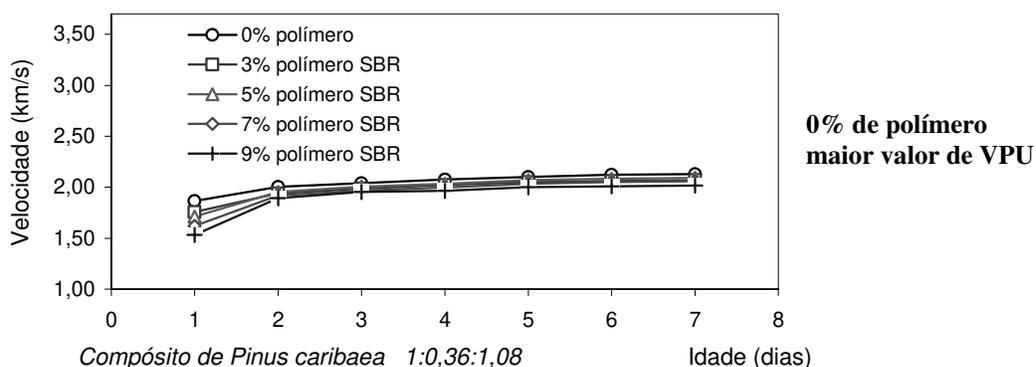
Figura 4.36 - VPU no compósito de *Pinus caribaea* (SBR).

Tabela 4.22 - VPU no compósito de *Pinus caribaea* (PAV22).

Modelo matemático para velocidade do pulso ultra-sônico (VPU)			
tipo de compósito	Teor de PAV22	Equação da $v=f(t)$	Cof. de determinação
Pinus caribaea traço 1:0,36:1,08	0%	$v = 2,13.[1-\exp(-1,24-0,70t)]$	$r^2 = 0,93$
	3%	$v = 2,10.[1-\exp(-1,62-0,54t)]$	$r^2 = 0,96$
	5%	$v = 2,10.[1-\exp(-1,22-0,72t)]$	$r^2 = 0,96$
	7%	$v = 2,08.[1-\exp(-1,43-0,56t)]$	$r^2 = 0,96$
	9%	$v = 2,06.[1-\exp(-2,16-0,56t)]$	$r^2 = 0,97$

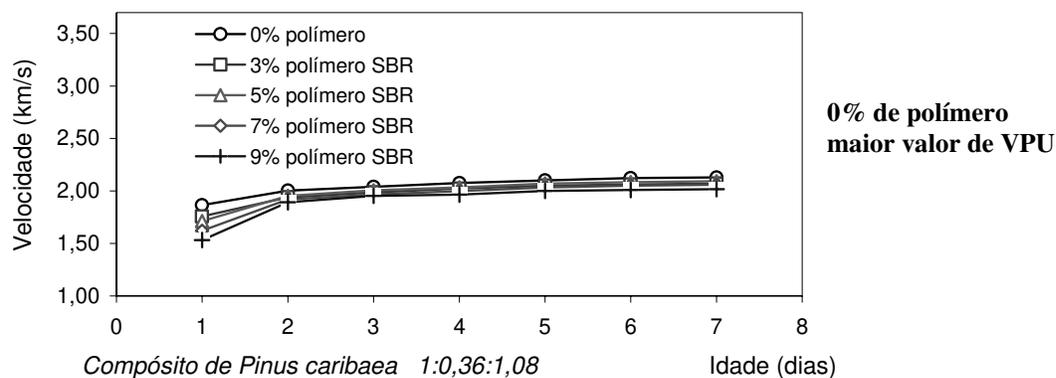
Figura 4.37 - VPU no compósito de *Pinus caribaea* (PAV22).

Tabela 4.23 - VPU no compósito de casca de arroz (SBR).

Modelo matemático para velocidade do pulso ultra-sônico (VPU)			
tipo de compósito	Teor de SBR	Equação da $v=f(t)$	Cof. de determinação
Casca de arroz traço 1:0,28:0,65	0%	$v = 2,05.[1-\exp(-1,43-0,60t)]$	$r^2 = 0,99$
	3%	$v = 2,01.[1-\exp(-1,10-0,72t)]$	$r^2 = 0,94$
	5%	$v = 1,99.[1-\exp(-1,26-0,78t)]$	$r^2 = 0,97$
	7%	$v = 2,12.[1-\exp(-1,48-0,63t)]$	$r^2 = 0,98$
	9%	$v = 2,18.[1-\exp(-1,78-0,44t)]$	$r^2 = 0,97$

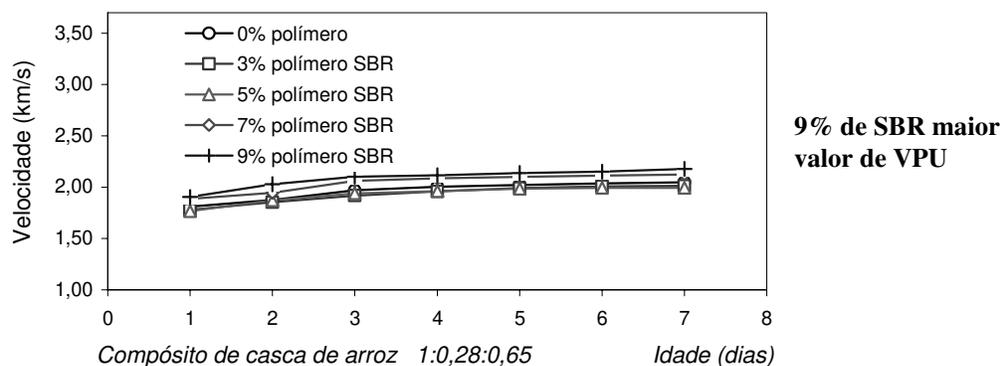


Figura 4.38 - VPU no compósito de casca de arroz (SBR).

Tabela 4.24 - VPU no compósito de casca de arroz (PAV22).

Modelo matemático para velocidade do pulso ultra-sônico (VPU)			
tipo de compósito	Teor de PAV22	Equação da $v=f(t)$	Cof. de determinação
Casca de arroz traço 1:0,28:0,65	0%	$v = 2,05.[1-\exp(-1,43-0,60t)]$	$r^2 = 0,99$
	3%	$v = 1,98.[1-\exp(-1,04-0,53t)]$	$r^2 = 0,92$
	5%	$v = 2,25.[1-\exp(-1,46-0,59t)]$	$r^2 = 0,98$
	7%	$v = 2,16.[1-\exp(-1,69-0,54t)]$	$r^2 = 0,95$
	9%	$v = 2,10.[1-\exp(-1,63-0,54t)]$	$r^2 = 0,94$

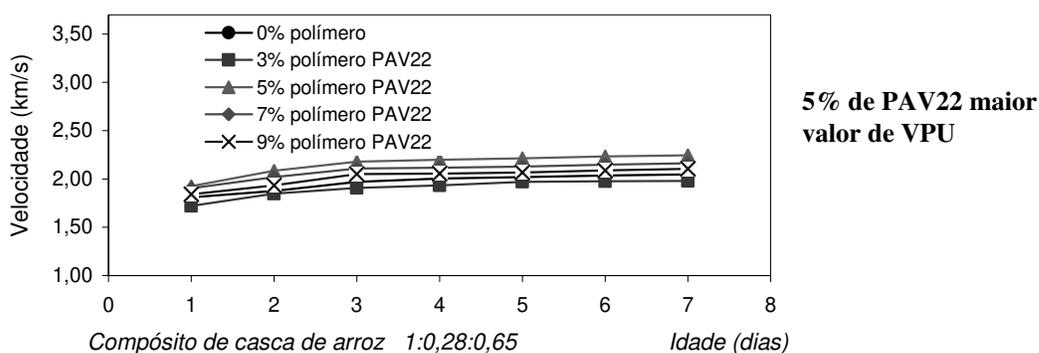


Figura 4.39 - VPU no compósito de casca de arroz (PAV22).

Tabela 4.25 - VPU no compósito de *Agave sisalana* "sisal" (SBR).

Modelo matemático para velocidade do pulso ultra-sônico (VPU)			
tipo de compósito	Teor de SBR	Equação da $v=f(t)$	Cof. de determinação
Agave sisalana traço 1:0,08:0,60	0%	$v = 3,44.[1-\exp(-1,57-0,88t)]$	$r^2 = 0,77$
	3%	$v = 3,39.[1-\exp(-2,91-0,15t)]$	$r^2 = 0,98$
	5%	$v = 3,52.[1-\exp(-1,82-0,61t)]$	$r^2 = 0,93$
	7%	$v = 3,41.[1-\exp(-1,89-0,65t)]$	$r^2 = 0,95$
	9%	$v = 3,49.[1-\exp(-1,97-0,65t)]$	$r^2 = 0,97$

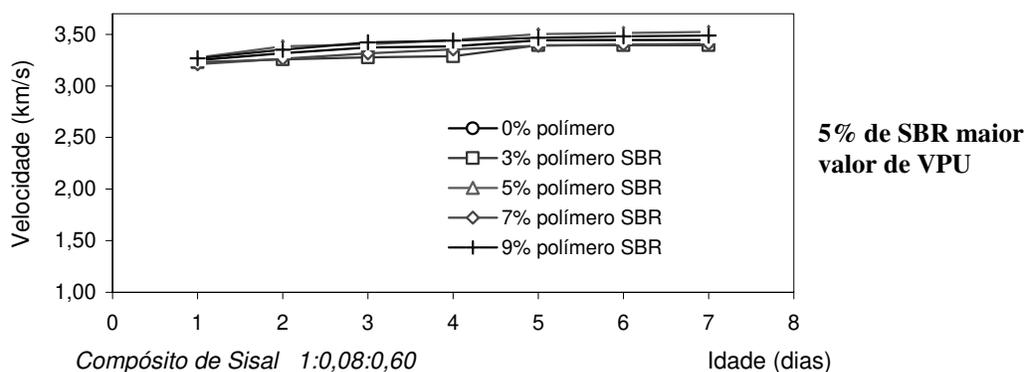
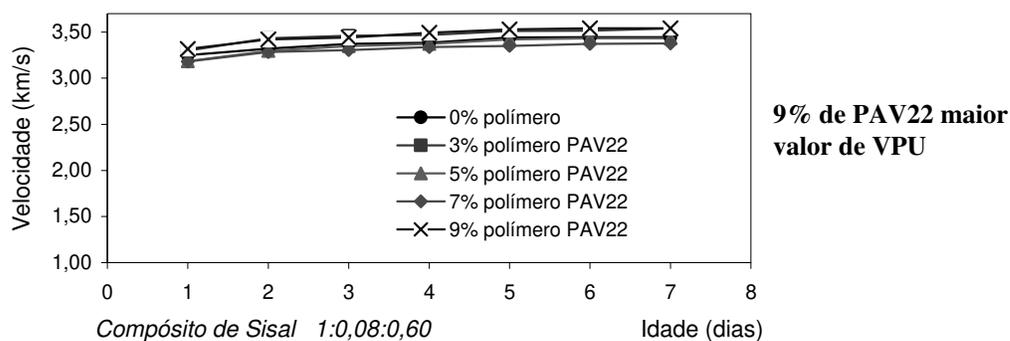
Figura 4.40 - VPU no compósito de *Agave sisalana* "sisal" (SBR).

Tabela 4.26 - VPU no compósito de *Agave sisalana* (PAV22).

Modelo matemático para velocidade do pulso ultra-sônico (VPU)			
tipo de compósito	Teor de PAV22	Equação da $v=f(t)$	Cof. de determinação
Agave sisalana traço 1:0,08:0,60	0%	$v = 3,44.[1-\exp(-1,57-0,88t)]$	$r^2 = 0,77$
	3%	$v = 3,54.[1-\exp(-2,39-0,45t)]$	$r^2 = 0,94$
	5%	$v = 3,43.[1-\exp(-1,75-0,70t)]$	$r^2 = 0,89$
	7%	$v = 3,38.[1-\exp(-2,20-0,59t)]$	$r^2 = 0,94$
	9%	$v = 3,54.[1-\exp(-1,93-0,92t)]$	$r^2 = 0,92$

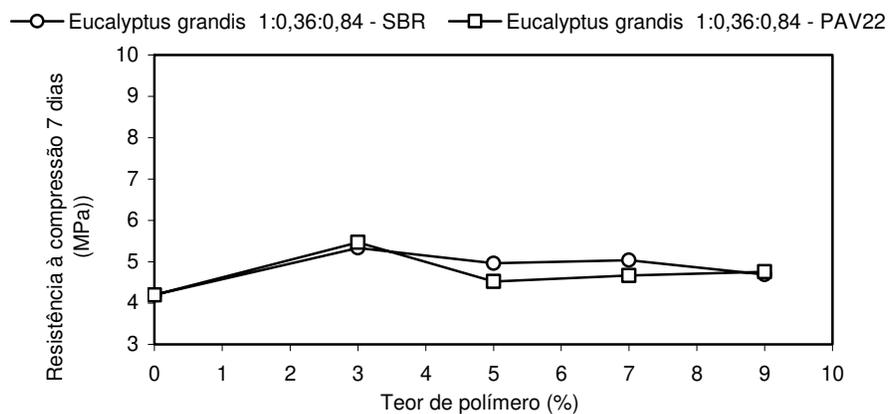
Figura 4.41 - VPU no compósito de *Agave sisalana* (PAV22).

4.4.3 Resistência mecânica à compressão dos compósitos

Os resultados da variação da resistência à compressão dos compósitos com CPV-ARI, apresentados na Tabelas 4.27 a 4.30 e nas Figuras 4.42 a 4.45, foram obtidos com base em traços pré-determinados para cada resíduo vegetal em estudo. *A priori* buscou-se otimizar o teor de resíduo em relação ao cimento a fim de se obter valores mínimos de resistência em função da aplicação proposta. Através dos resultados obtidos, observou-se que com a adição dos polímeros o valor da resistência à compressão dos compósitos com resíduos provenientes das espécies *Eucalyptus grandis* e *Agave sisalana* (sisal) aumentou em relação aos compósitos sem a adição dos polímeros. Em contrapartida, para os compósitos com resíduos provenientes da espécie *Pinus caribaea* houve uma diminuição dos valores de resistência com a adição dos polímeros. Para os compósitos com resíduos provenientes da espécie casca de arroz os valores de resistência à compressão aumentaram com a adição do polímero SBR e diminuíram com a adição do polímero PAV22, em comparação aos compósitos sem a adição dos polímeros.

Tabela 4.27 - Resistência à compressão (7 dias) do compósito de *Eucalyptus grandis*.

Resistência à compressão aos 7 dias (MPa) - Compósito <i>Eucalyptus grandis</i>					traço 1:0,36:0,84				
Teor de polímero SBR (%)	C1	C2	C3	Média	Teor de polímero PAV22 (%)	C1	C2	C3	Media
0	3,32	4,83	4,46	4,20	0	3,32	4,83	4,46	4,20
3	5,00	5,30	5,70	5,33	3	-	5,37	5,57	5,47
5	4,38	5,50	4,48	4,79	5	4,37	4,17	5,03	4,52
7	5,50	5,00	5,65	5,38	7	4,09	4,76	5,17	4,67
9	5,00	4,38	4,69	4,69	9	4,67	4,53	5,07	4,76

Figura 4.42 - Resistência à compressão (7 dias) do compósito de *Eucalyptus grandis*.Tabela 4.28 - Resistência à compressão (7 dias) do compósito de *Pinus caribaea*.

Resistência à compressão aos 7 dias (MPa) - Compósito <i>Pinus caribaea</i>					traço 1:0,36:1,08				
Teor de polímero SBR (%)	C1	C2	C3	Média	Teor de polímero PAV22 (%)	C1	C2	C3	Media
0	6,46	5,41	6,38	6,08	0	6,46	5,41	6,38	6,08
3	4,93	4,63	5,27	4,94	3	5,55	5,44	6,69	5,89
5	5,20	5,25	5,27	5,24	5	5,88	5,88	6,47	6,08
7	5,79	5,84	4,97	5,53	7	5,64	7,15	6,20	6,33
9	3,62	5,08	5,44	4,71	9	3,85	4,64	4,33	4,27

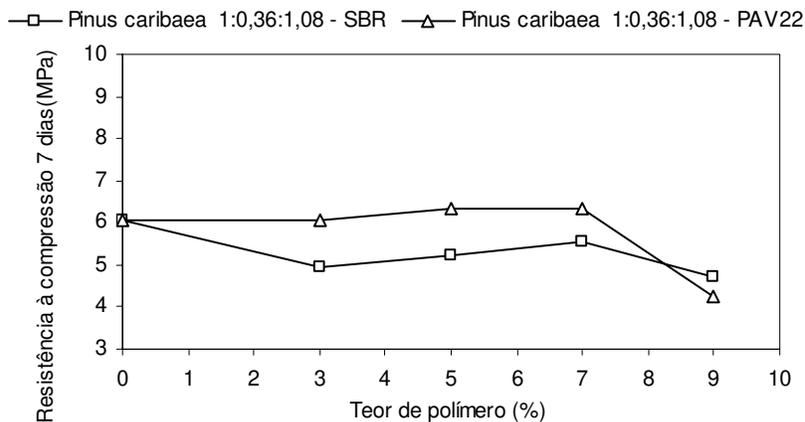
Figura 4.43 - Resistência à compressão (7 dias) do compósito de *Pinus caribaea*.

Tabela 4.29 - Resistência à compressão (7 dias) do compósito de casca de arroz.

Resistência à compressão aos 7 dias (MPa) - Compósito Casca de arroz traço 1:0,28:0,65									
Teor de polímero SBR (%)	C1	C2	C3	Média	Teor de polímero PAV22 (%)	C1	C2	C3	Media
0	4,37	4,70	4,33	4,47	0	4,37	4,70	4,33	4,47
3	5,23	4,21	3,79	4,41	3	4,14	3,61	4,87	4,21
5	4,53	4,30	4,60	4,48	5	4,30	4,36	4,41	4,36
7	4,80	4,56	5,27	4,88	7	4,07	4,46	4,50	4,34
9	6,15	4,97	5,47	5,53	9	4,18	5,27	3,40	4,28

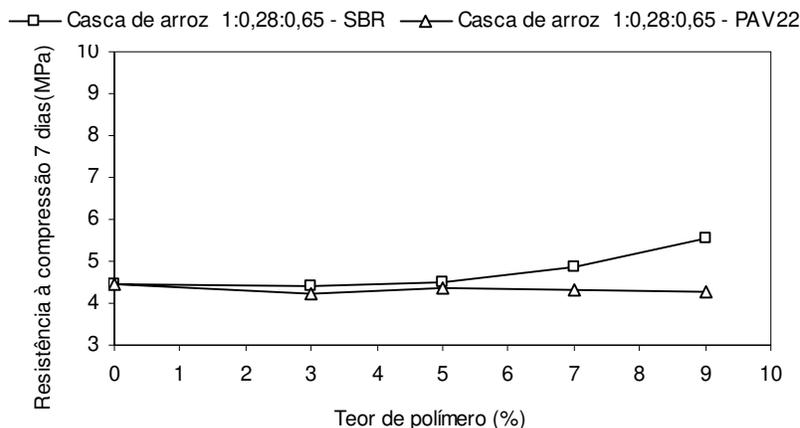
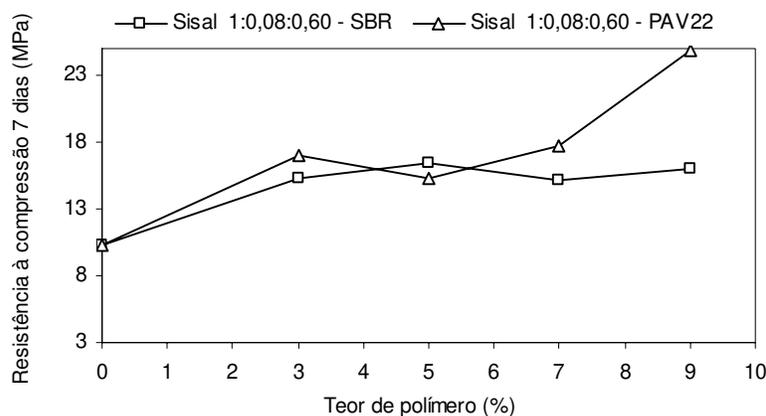


Figura 4.44 - Resistência à compressão (7 dias) do compósito de casca de arroz.

Tabela 4.30 - Resistência à compressão (7 dias) do compósito de *Agave sisalana* (sisal).

Resistência à compressão aos 7 dias (MPa) - Compósito <i>Agave sisalana</i> (sisal) traço 1:0,08:0,60									
Teor de polímero SBR (%)	C1	C2	C3	Média	Teor de polímero PAV22 (%)	C1	C2	C3	Media
0	11,32	11,77	7,73	10,27	0	11,32	11,77	7,73	10,27
3	15,17	14,92	15,61	15,23	3	17,02	16,22	17,58	16,94
5	15,39	17,54	16,49	16,47	5	15,76	14,34	15,72	15,27
7	16,24	15,05	14,31	15,20	7	16,02	17,69	19,55	17,75
9	15,97	15,61	16,24	15,94	9	23,84	24,02	26,51	24,79

Figura 4.45 - Resistência à compressão (7 dias) do compósito de *Agave sisalana* (sisal).

Os resultados da resistência à compressão dos compósitos de *Agave sisalana*, apresentados na Tabela 4.30 e na Figura 4.45, foram muito superiores àqueles valores determinados para os demais compósitos (*Eucalyptus grandis*, *Pinus caribaea* e Casca de arroz), conduzindo-os a outro patamar de avaliação, ou seja, a dos elementos compatíveis com os concretos estruturais. Em relação à Figura 4.45 foi observado que o valor da resistência correspondente à adição de 9% de PAV22 foi bem superior em relação aos outros teores.

4.4.4 Correlação entre resistência à compressão e o ultra-som

Os resultados dos ensaios de medição da VPU, utilizados para monitoramento das misturas durante seu endurecimento, estão diretamente relacionados ao ganho de resistência à compressão, ocorrida nos primeiros 7 dias após a moldagem dos compósitos. Desse modo, buscou-se correlacionar essas duas propriedades, cujos resultados estão apresentados nas Figuras 4.46 a 4.53. De um modo geral, em todos os compósitos analisados, as variações de resistência à compressão foram similares às variações das VPU monitoradas, ou seja, à medida que os valores de resistência aumentavam, as VPU também aumentavam.

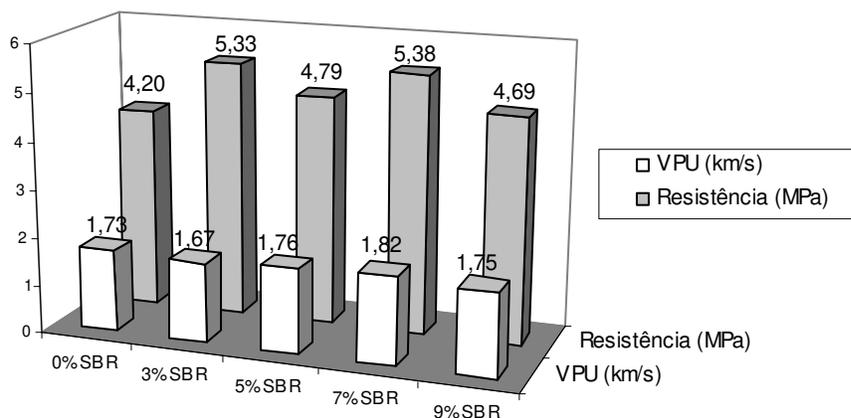


Figura 4.46 - Correlação entre resistência à compressão (7 dias) e a VPU (7 dias) dos compósitos de *Eucalyptus grandis* com adição de SBR.

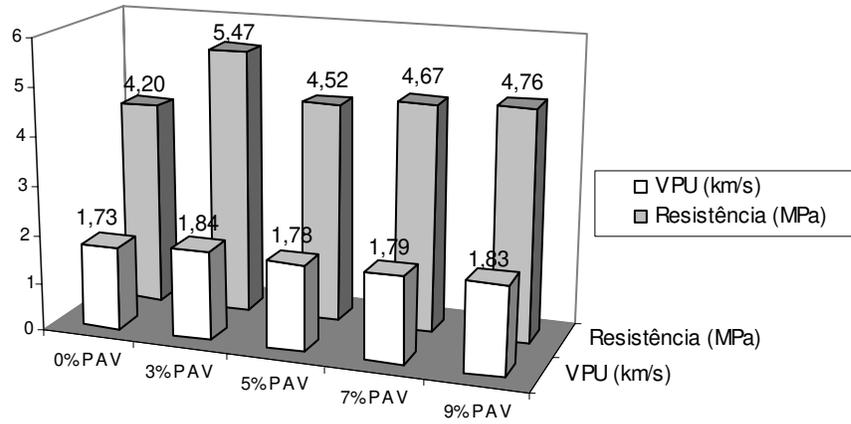


Figura 4.47 - Correlação entre resistência à compressão (7 dias) e a VPU (7 dias) dos compósitos de *Eucalyptus grandis* com adição de PAV22.

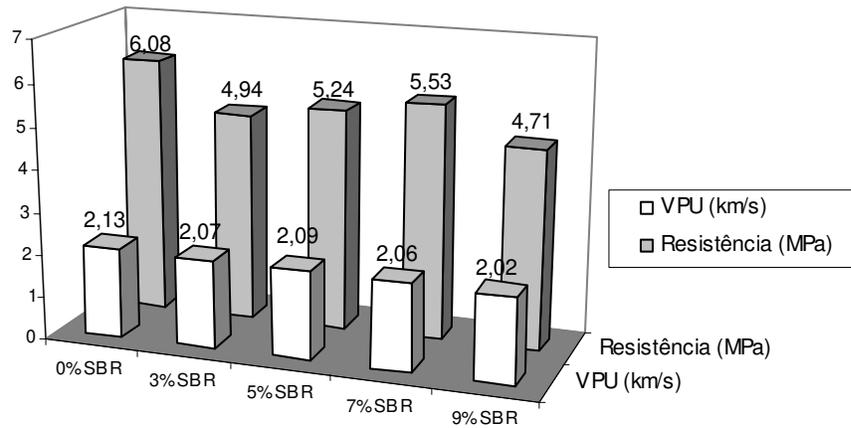


Figura 4.48 - Correlação entre resistência à compressão (7 dias) e a VPU (7 dias) dos compósitos de *Pinus caribaea* com adição de SBR.

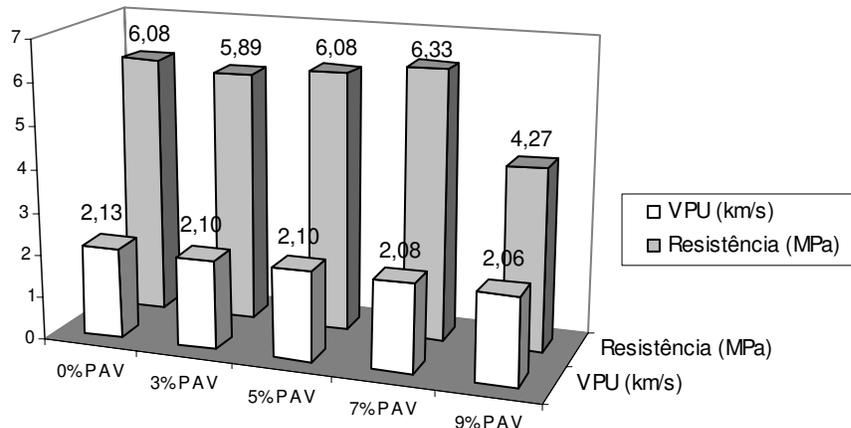


Figura 4.49 - Correlação entre resistência à compressão (7 dias) e a VPU (7 dias) dos compósitos de *Pinus caribaea* com adição de PAV22.

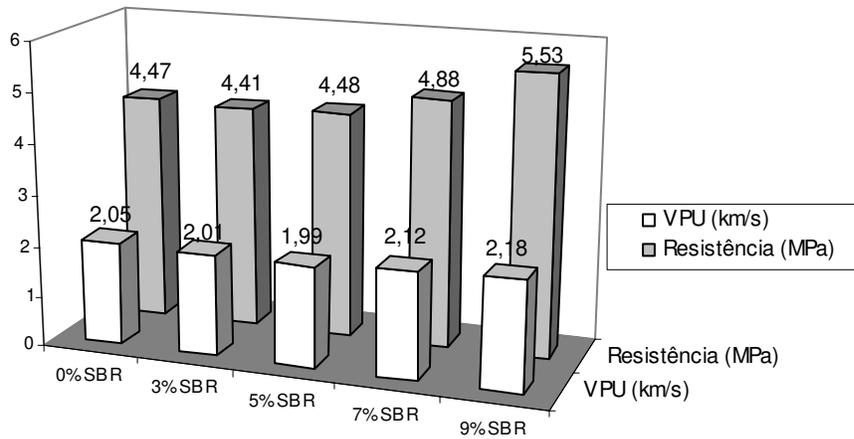


Figura 4.50 - Correlação entre resistência à compressão (7 dias) e a VPU (7 dias) dos compósitos de Casca de arroz com adição de SBR.

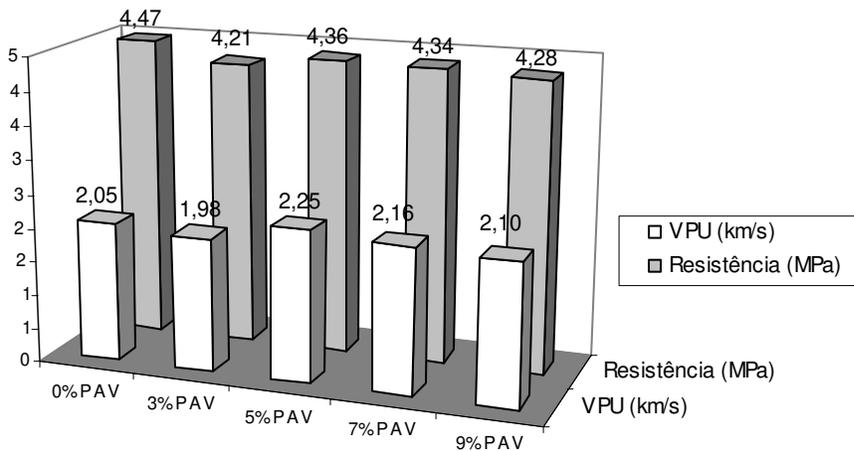


Figura 4.51 - Correlação entre resistência à compressão (7 dias) e a VPU (7 dias) dos compósitos de Casca de arroz com adição de PAV22.

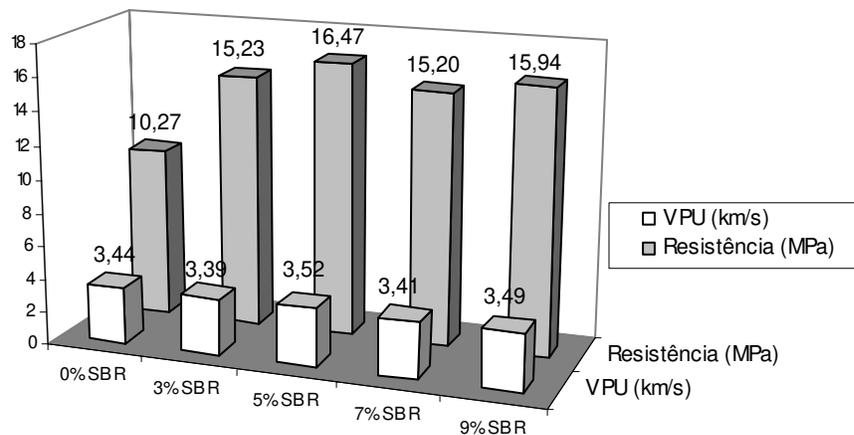


Figura 4.52 - Correlação entre resistência à compressão (7 dias) e a VPU (7 dias) dos compósitos de *Agave sisalana* com adição de SBR.

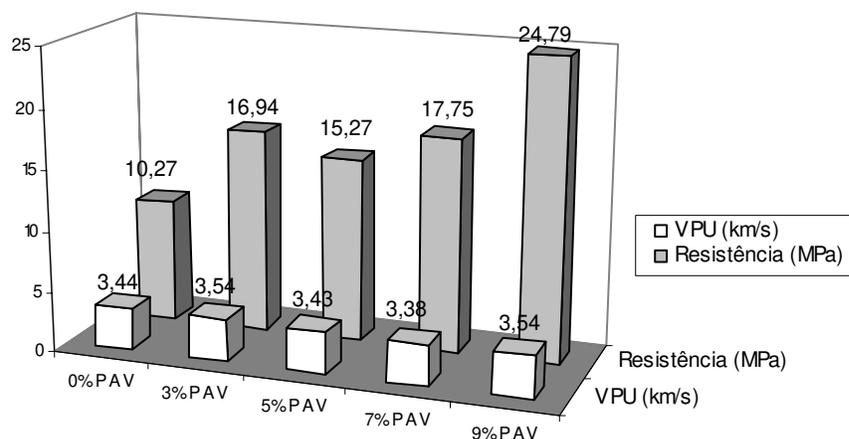


Figura 4.53 - Correlação entre resistência à compressão (7 dias) e a VPU (7 dias) dos compósitos de *Agave sisalana* com adição de PAV22.

4.4.5 Absorção de água por capilaridade

Nas tabelas 4.31 a 4.38 e nas Figuras 4.54 a 4.69 estão apresentadas as variações da absorção de água por capilaridade dos compósitos em função da raiz quadrada do tempo e as variações da penetração de água em função do teor de polímero. Os compósitos à base de *Eucalyptus grandis* apresentaram aumento da absorção de água com a adição de SBR e uma diminuição com a adição de PAV22. Nos compósitos à base de *Pinus caribaea* e casca de arroz houve uma diminuição da absorção com a adição dos polímeros; já para os compósitos à base de *Agave sisalana* (sisal) ocorreu uma ligeira diminuição da absorção.

Tabela 4.31 - Absorção de água por capilaridade do compósito de *Eucalyptus grandis* (SBR).

ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE DO COMPÓSITO DE EUCALYPTUS GRANDIS traço 1:0,36:0,84																
(Massa acumulada em gramas)																
Polímero	C.P.	Minicial	5 min	10 min	15 min	30 min	45 min	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h	24 h	Altura	
Estireno-butadieno (SBR)	0%	CP1	302,43	317,96	318,84	319,23	319,64	319,87	320,14	320,70	321,25	321,90	322,04	322,35	324,82	41,60
		CP2	315,18	331,10	331,88	332,37	332,77	333,01	333,24	333,72	334,28	334,82	335,00	335,32	337,73	38,95
		CP3	324,10	339,84	340,50	340,88	341,25	341,34	341,55	342,09	342,62	343,13	343,29	343,57	345,80	39,96
	3%	CP1	323,00	338,98	342,47	344,02	345,50	346,30	347,02	349,27	351,04	352,41	352,83	353,39	357,82	72,54
		CP2	331,89	348,75	352,09	353,48	355,21	356,03	356,91	359,48	361,62	362,52	364,00	364,58	369,11	65,69
		CP3	332,27	354,09	357,50	359,31	361,44	362,37	363,57	366,38	368,55	370,33	370,86	371,54	376,19	83,05
	5%	CP1	333,74	358,12	361,48	362,92	364,31	364,75	365,42	367,06	368,43	369,75	370,42	370,95	377,42	69,36
		CP2	350,83	375,44	379,74	381,66	383,44	384,14	384,86	386,86	388,49	390,40	390,99	391,67	398,91	87,00
		CP3	341,38	369,63	374,87	377,13	379,30	380,06	380,93	383,01	384,72	386,75	387,39	388,21	393,24	105,71
	7%	CP1	329,27	338,40	340,15	341,05	341,79	342,08	342,44	343,33	344,20	345,07	345,44	345,86	349,02	73,53
		CP2	341,21	365,93	369,44	371,14	372,84	373,67	374,56	376,64	378,60	380,75	381,50	382,32	390,06	93,84
		CP3	349,05	372,20	375,42	376,95	378,63	379,54	380,26	382,46	384,49	386,89	387,78	388,62	396,52	94,00
9%	CP1	340,73	363,45	366,13	367,28	368,41	369,03	369,49	370,88	372,31	374,02	374,48	375,16	382,16	82,92	
	CP2	343,98	366,35	369,11	370,47	371,78	372,30	373,08	374,55	375,96	377,35	377,82	378,40	384,53	72,65	
	CP3	348,37	371,70	374,64	376,01	377,47	378,08	378,73	380,42	381,97	383,56	384,03	384,76	391,08	88,95	

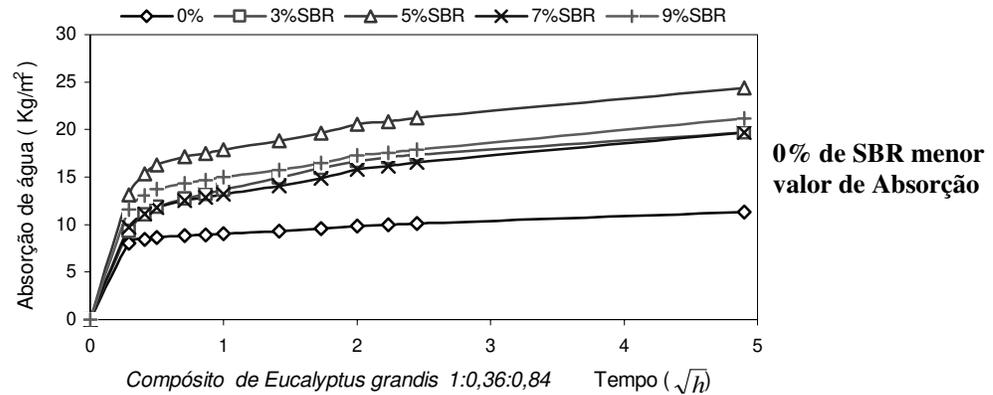


Figura 4.54 - Absorção de água por capilaridade do *Eucalyptus grandis* (SBR).

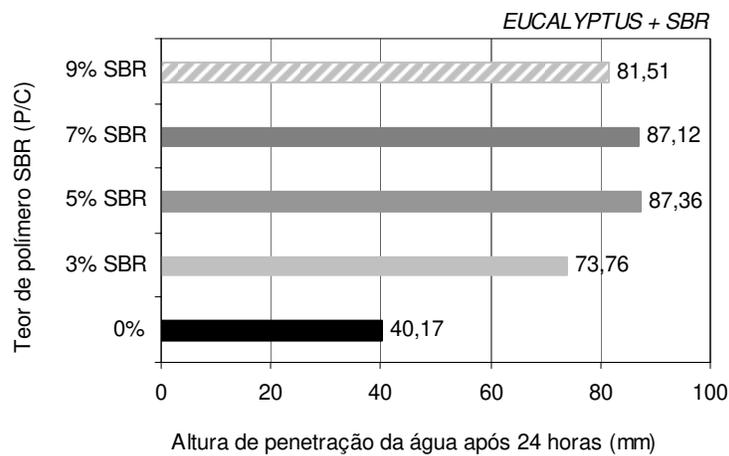


Figura 4.55 - Altura de penetração de água no compósito de *Eucalyptus grandis* (SBR).

Tabela 4.32 - Absorção de água por capilaridade do compósito de *Eucalyptus grandis* (PAV22).

ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE DO COMPÓSITO DE EUCALYPTUS GRANDIS traço 1:0,36:0,84																
(Massa acumulada em gramas)																
Polímero	C.P.	Minicial	5 min	10 min	15 min	30 min	45 min	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h	24 h	Altura *	
Acetato-versatato (PAV22)	0%	CP1	302,43	317,96	318,84	319,23	319,64	319,87	320,14	320,70	321,25	321,90	322,04	322,35	324,82	41,60
		CP2	315,18	331,10	331,88	332,37	332,77	333,01	333,24	333,72	334,28	334,82	335,00	335,32	337,73	38,95
		CP3	324,10	339,84	340,50	340,88	341,25	341,34	341,55	342,09	342,62	343,13	343,29	343,57	345,80	39,96
	3%	CP1	330,17	332,25	333,08	333,76	334,48	334,88	335,30	336,71	338,15	340,15	340,98	341,85	352,85	37,61
		CP2	337,50	339,42	340,38	341,01	341,65	342,18	342,60	344,14	345,66	347,44	348,10	348,93	359,51	34,88
		CP3	331,33	333,60	334,69	335,44	336,27	336,92	337,27	338,86	340,58	342,53	343,33	344,21	355,00	37,20
	5%	CP1	335,30	336,90	337,91	338,55	339,42	339,87	340,20	341,73	343,38	345,29	345,98	346,90	357,09	30,76
		CP2	334,86	337,07	338,84	339,86	341,14	341,79	342,39	344,42	346,44	348,90	349,77	350,89	363,20	41,07
		CP3	342,57	345,12	347,10	348,20	349,53	350,30	351,17	353,45	356,04	359,11	360,25	361,61	375,61	43,93
	7%	CP1	311,55	312,55	313,27	313,80	314,30	314,67	315,04	315,83	316,82	318,08	318,46	319,00	324,54	25,60
		CP2	316,44	317,64	318,40	318,98	319,57	319,86	320,28	321,36	322,46	323,85	324,36	325,02	331,61	27,20
		CP3	327,80	329,12	330,28	331,15	331,95	332,43	332,95	334,03	335,40	336,87	337,45	338,22	347,28	36,21
	9%	CP1	322,23	323,19	323,95	324,60	325,25	325,63	325,97	327,02	328,09	329,27	329,90	330,45	339,03	29,22
		CP2	321,49	322,60	323,53	324,08	324,68	324,95	325,33	326,51	327,70	329,18	329,86	330,49	339,62	39,55
		CP3	323,73	324,99	325,90	326,57	327,47	327,92	328,29	329,37	330,48	332,05	332,68	333,29	341,41	35,34

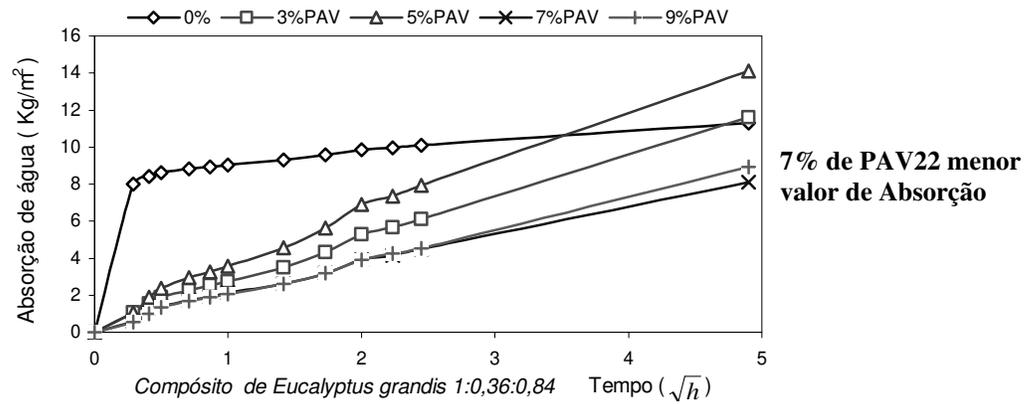


Figura 4.56 - Absorção de água por capilaridade do *Eucalyptus grandis* (PAV22).

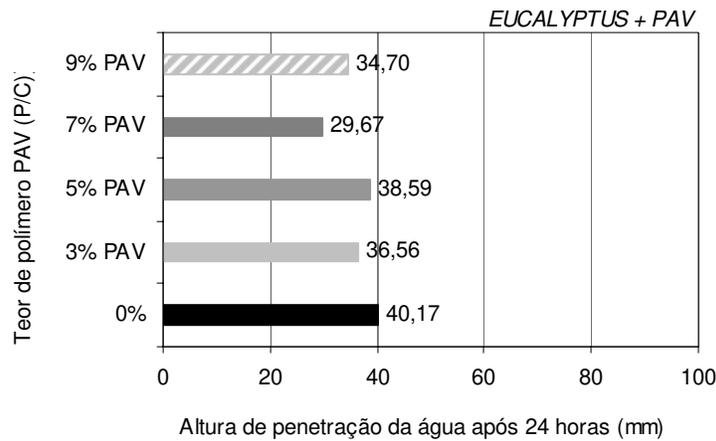


Figura 4.57 - Altura de penetração de água no compósito de *Eucalyptus grandis* (PAV22).

Tabela 4.33 - Absorção de água por capilaridade do compósito de *Pinus caribaea* (SBR).

ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE DO COMPÓSITO DE PINUS CARIBAEA traço 1:0,36:1,08																
(Massa acumulada em gramas)																
Polímero	C.P.	Minicial	5 min	10 min	15 min	30 min	45 min	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h	24 h	Altura	
Estireno-butadieno (SBR)	0%	CP1	320,32	324,80	325,54	325,69	325,96	326,26	326,38	327,03	327,73	328,42	328,66	329,15	332,27	25,54
		CP2	223,17	237,47	237,91	238,30	238,66	238,85	239,06	239,65	240,22	240,98	241,32	241,63	244,76	23,16
		CP3	328,08	330,22	330,66	331,02	331,43	331,52	331,74	332,38	333,03	333,66	333,87	334,18	337,36	23,80
	3%	CP1	343,46	346,96	347,66	347,97	348,38	348,53	348,72	349,43	350,15	350,81	351,09	351,48	354,84	26,54
		CP2	336,44	341,03	341,70	342,17	342,56	342,76	343,06	343,65	344,42	345,27	345,40	345,79	348,99	29,20
		CP3	350,74	353,94	354,49	354,92	355,34	355,54	355,70	356,69	357,22	358,03	358,31	358,73	362,13	23,73
	5%	CP1	325,14	326,72	327,17	327,53	327,87	328,01	328,24	329,07	329,47	330,17	330,40	330,71	333,65	19,23
		CP2	331,29	332,20	332,57	332,79	333,06	333,10	333,28	333,75	334,19	334,83	335,03	335,39	338,82	17,31
		CP3	331,61	333,31	333,67	334,10	334,31	334,50	334,60	335,12	335,67	336,28	336,52	336,84	339,55	20,74
	7%	CP1	351,25	353,67	354,13	354,51	354,87	355,10	355,38	356,13	356,79	357,92	358,11	358,56	362,50	25,90
		CP2	338,77	342,17	342,75	343,14	343,51	343,77	343,97	344,64	345,35	346,24	346,56	346,90	350,95	28,87
		CP3	344,25	350,08	350,98	351,47	351,96	352,28	352,66	353,61	354,45	355,65	356,07	356,57	362,97	43,02
	9%	CP1	343,48	345,75	346,30	346,73	347,10	347,44	347,73	348,38	349,31	350,44	350,76	351,28	357,02	31,27
		CP2	346,43	351,07	352,41	353,19	353,78	354,26	354,73	355,93	357,32	358,87	359,55	360,48	367,47	45,62
		CP3	339,88	348,13	349,01	349,74	350,33	350,76	351,25	352,53	354,10	355,84	356,50	357,40	365,11	51,95

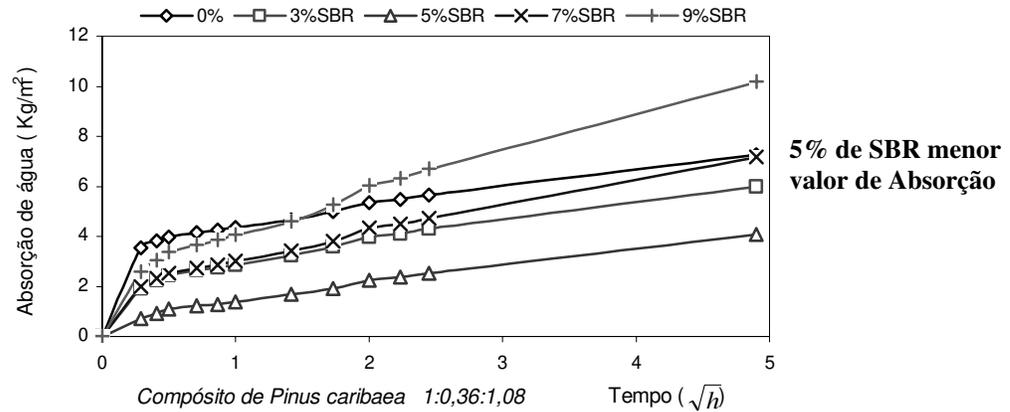


Figura 4.58 - Absorção de água por capilaridade do compósito de *Pinus caribaea* (SBR).

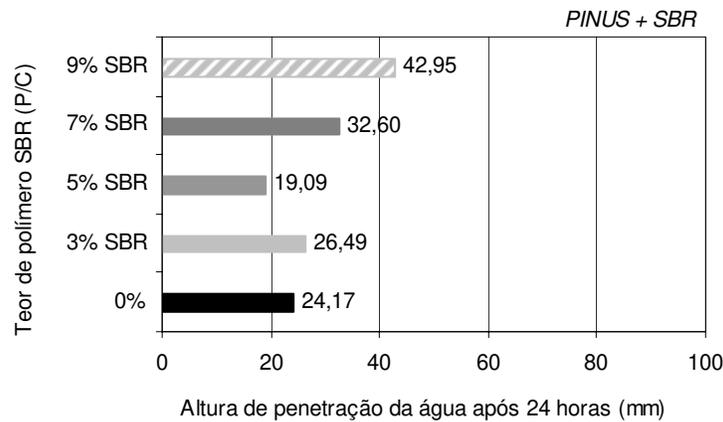


Figura 4.59 - Altura de penetração de água no compósito de *Pinus caribaea* (SBR).

Tabela 4.34 - Absorção de água por capilaridade do compósito de *Pinus caribaea* (PAV22).

ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE DO COMPÓSITO DE PINUS CARIBAEA traço 1:0,36:1,08																
(Massa acumulada em gramas)																
Polímero	C.P.	Inicial	5 min	10 min	15 min	30 min	45 min	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h	24 h	Altura	
Acetato-versatato (PAV22)	0%	CP1	320,32	324,80	325,54	325,69	325,96	326,26	326,38	327,03	327,73	328,42	328,66	329,15	332,27	25,54
		CP2	223,17	237,47	237,91	238,30	238,66	238,85	239,06	239,65	240,22	240,98	241,32	241,63	244,76	23,16
		CP3	328,08	330,22	330,66	331,02	331,43	331,52	331,74	332,38	333,03	333,66	333,87	334,18	337,36	23,80
	3%	CP1	337,23	338,71	339,18	339,50	339,92	340,12	340,31	341,12	341,98	342,97	343,38	343,77	348,60	27,17
		CP2	347,95	349,36	349,71	350,01	350,34	350,63	350,80	351,56	352,18	353,11	353,48	353,83	358,02	22,95
		CP3	350,78	352,66	353,08	353,45	353,80	354,12	354,31	355,04	355,80	356,72	357,17	357,55	361,75	24,46
	5%	CP1	342,64	344,06	344,52	344,90	345,25	345,43	345,66	346,42	347,16	348,20	348,52	348,95	353,65	22,07
		CP2	341,26	342,62	342,92	343,31	343,64	343,90	344,06	344,76	345,45	346,36	346,68	347,07	351,87	22,66
		CP3	331,50	332,86	333,16	333,41	333,75	333,92	334,05	334,68	335,27	336,06	336,31	336,67	340,85	22,64
	7%	CP1	340,19	341,25	341,66	341,94	342,37	342,55	342,81	343,48	344,20	345,08	345,56	345,86	350,71	22,57
		CP2	338,36	339,43	339,76	340,11	340,42	340,60	340,92	341,24	341,76	342,57	342,78	343,07	347,06	21,09
		CP3	339,89	341,17	341,55	341,88	342,12	342,29	342,46	343,20	343,70	344,64	344,90	345,26	350,60	25,04
	9%	CP1	347,92	349,45	349,81	350,24	350,55	350,77	351,00	351,80	352,54	353,50	353,87	354,40	359,78	22,08
		CP2	354,96	356,53	356,98	357,30	357,60	357,87	358,11	358,75	359,49	360,57	360,93	361,36	366,65	23,63
		CP3	345,53	346,95	347,37	347,77	348,01	348,16	348,56	349,19	349,86	350,78	351,13	351,50	356,30	22,07

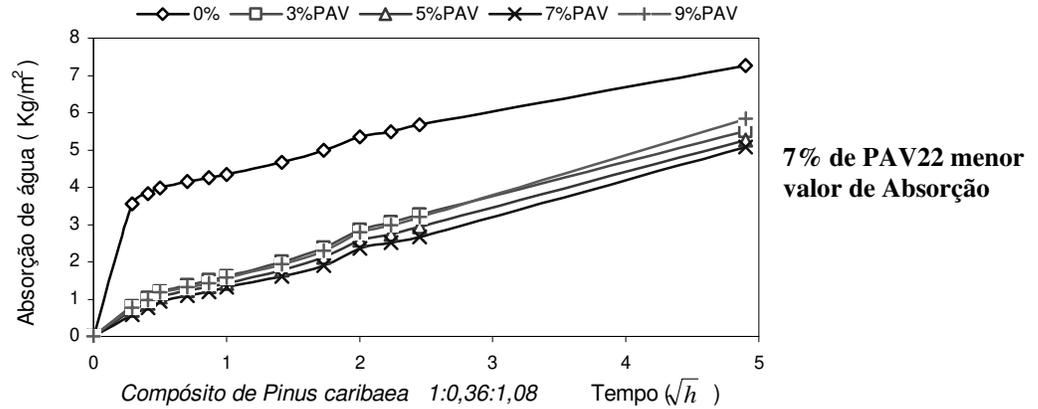


Figura 4.60 - Absorção de água por capilaridade do *Pinus caribaea* (PAV22).

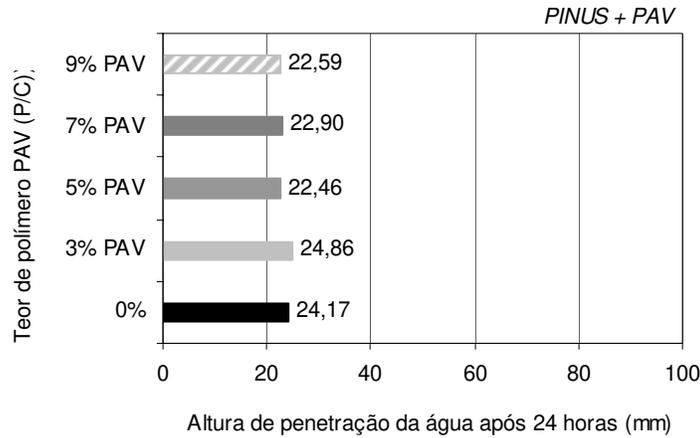


Figura 4.61 - Altura de penetração de água no compósito de *Pinus caribaea* (PAV22).

Tabela 4.35 - Absorção de água por capilaridade do compósito de casca de arroz (SBR).

ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE DO COMPÓSITO DE CASCA DE ARROZ traço 1:0,28:0,65
(Massa acumulada em gramas)

Polímero	C.P.	Minicial	5 min	10 min	15 min	30 min	45 min	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h	24 h	Altura	
Estireno-butadieno (SBR)	0%	CP1	338,45	344,77	345,39	345,79	346,03	346,25	346,48	347,01	347,47	348,08	348,38	348,58	350,65	26,48
		CP2	340,69	346,39	347,08	347,33	347,73	348,01	348,20	348,61	349,23	349,80	350,00	350,25	352,04	23,49
		CP3	355,20	361,75	363,38	363,81	364,30	364,66	364,87	365,09	365,59	365,87	366,43	366,65	368,44	27,85
	3%	CP1	368,10	368,98	369,61	369,94	370,50	370,75	370,95	371,35	371,97	372,27	372,83	373,23	375,89	22,20
		CP2	355,24	361,00	363,26	364,02	364,68	365,24	365,51	365,85	366,71	367,16	367,84	368,15	370,89	29,68
		CP3	359,06	360,09	360,45	360,91	361,20	361,52	361,61	362,00	362,42	362,93	363,36	363,69	366,29	19,74
	5%	CP1	362,20	363,01	363,30	363,60	363,89	364,21	364,54	364,62	365,15	365,46	365,91	366,18	368,22	18,82
		CP2	370,91	371,97	372,46	372,86	373,24	373,48	373,98	374,23	374,87	375,17	375,50	375,86	377,90	17,32
		CP3	371,44	373,44	373,94	374,43	374,81	375,22	375,43	375,72	376,43	376,80	377,19	377,50	379,88	19,03
	7%	CP1	367,28	367,83	368,12	368,30	368,50	368,66	368,79	369,01	369,19	369,52	369,96	370,07	371,93	14,43
		CP2	364,64	365,27	365,51	365,65	365,90	366,25	366,35	366,46	366,87	367,08	367,36	367,50	369,22	13,06
		CP3	365,94	366,72	367,04	367,24	367,44	367,74	367,85	368,00	368,39	368,70	368,91	368,98	371,53	12,33
9%	CP1	384,97	385,69	385,86	386,02	386,16	386,45	386,54	386,60	386,82	387,07	387,36	387,40	389,14	11,00	
	CP2	391,04	394,22	395,12	395,63	396,12	396,70	396,89	397,23	397,70	398,10	398,50	398,74	401,53	20,71	
	CP3	390,52	395,21	396,16	396,55	397,07	397,72	397,92	398,30	399,13	399,48	399,84	400,26	407,63	27,23	

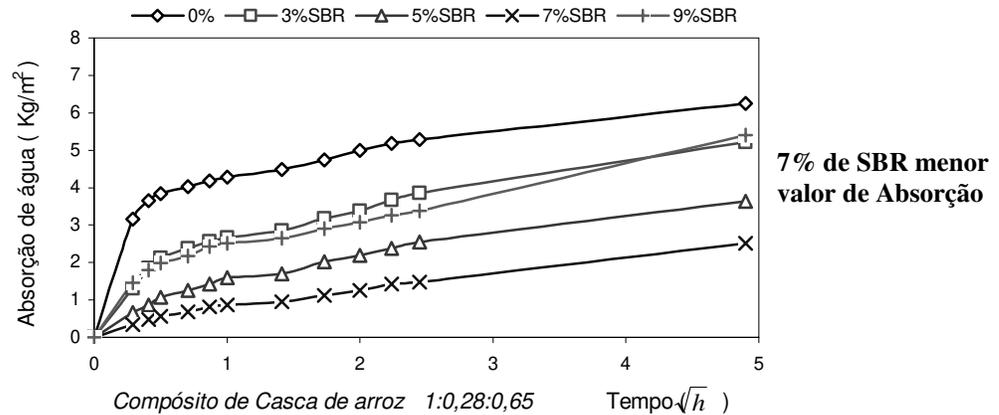


Figura 4.62 - Absorção de água por capilaridade do compósito de casca de arroz (SBR).

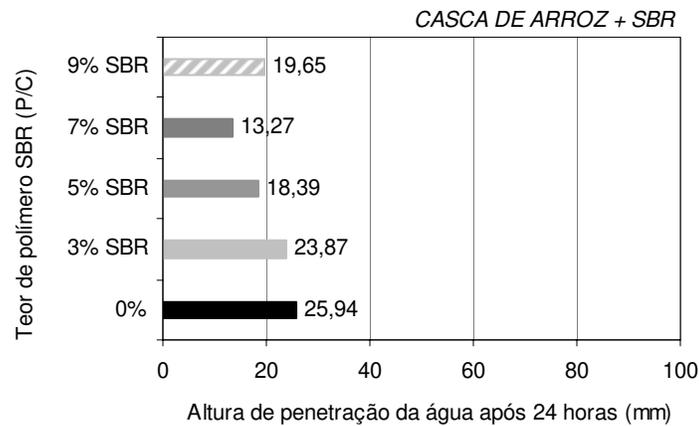


Figura 4.63 - Altura de penetração de água no compósito de casca de arroz (SBR).

Tabela 4.36 - Absorção de água por capilaridade do compósito de casca de arroz (PAV22).

ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE DO COMPÓSITO DE CASCA DE ARROZ traço 1:0,28:0,65																
(Massa acumulada em gramas)																
Polímero	C.P.	Minicial	5 min	10 min	15 min	30 min	45 min	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h	24 h	Altura	
Acetato-versátato (PAV22)	0%	CP1	338,45	344,77	345,39	345,79	346,03	346,25	346,48	347,01	347,47	348,08	348,38	348,58	350,65	26,48
		CP2	340,69	346,39	347,08	347,33	347,73	348,01	348,20	348,61	349,23	349,80	350,00	350,25	352,04	23,49
		CP3	355,20	361,75	363,38	363,81	364,30	364,66	364,87	365,09	365,59	365,87	366,43	366,65	368,44	27,85
	3%	CP1	394,14	395,80	396,03	396,48	396,65	396,89	397,00	397,38	397,74	397,92	398,44	398,60	401,46	16,30
		CP2	366,71	367,92	368,30	368,54	368,58	368,93	368,95	369,12	369,43	369,67	369,76	370,03	371,58	12,00
		CP3	395,87	397,34	397,70	398,01	398,25	398,49	398,53	398,68	399,14	399,49	399,68	399,82	402,17	13,87
	5%	CP1	381,94	383,42	383,67	383,87	384,15	384,36	384,53	384,69	385,01	385,25	385,84	385,94	389,51	16,92
		CP2	380,14	381,82	382,26	382,70	383,05	383,49	383,81	384,27	385,54	386,30	387,32	388,14	395,09	33,10
		CP3	376,39	377,95	378,34	378,60	378,95	379,20	379,42	379,70	380,40	380,51	381,71	382,28	388,07	23,70
	7%	CP1	392,84	394,17	394,59	394,92	395,26	395,42	395,58	396,01	396,55	396,97	397,45	397,81	401,87	19,06
		CP2	381,55	383,00	383,39	383,58	384,01	384,40	384,63	384,85	385,44	385,85	386,52	386,82	390,81	19,80
		CP3	385,93	387,20	387,60	387,78	388,22	388,48	388,58	388,98	389,43	389,81	390,36	390,85	395,17	19,44
	9%	CP1	399,10	400,40	400,59	400,86	401,02	401,50	401,61	401,81	402,32	402,67	403,23	403,64	407,88	20,15
		CP2	397,17	398,19	398,44	398,77	399,01	399,40	399,50	399,70	400,10	400,53	401,18	401,51	405,59	18,97
		CP3	396,39	397,63	397,98	398,39	398,68	399,05	399,09	399,38	399,88	400,20	400,78	401,06	405,25	17,94

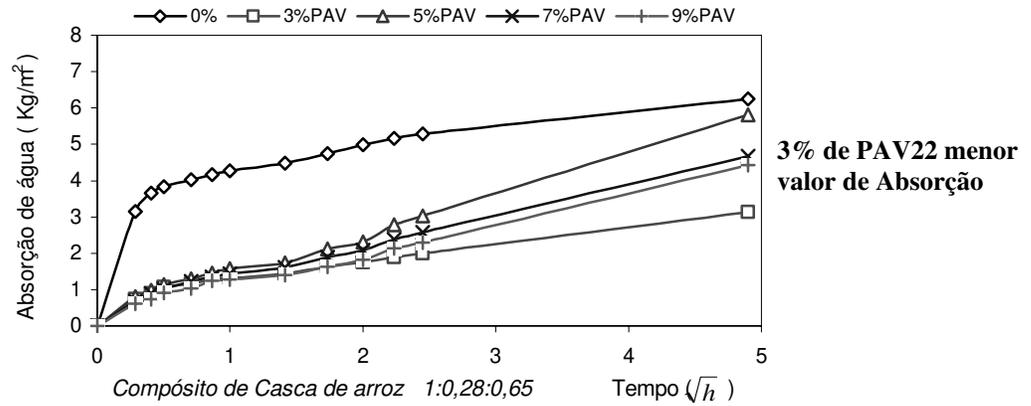


Figura 4.64 - Absorção de água por capilaridade do compósito de casca de arroz (PAV22).

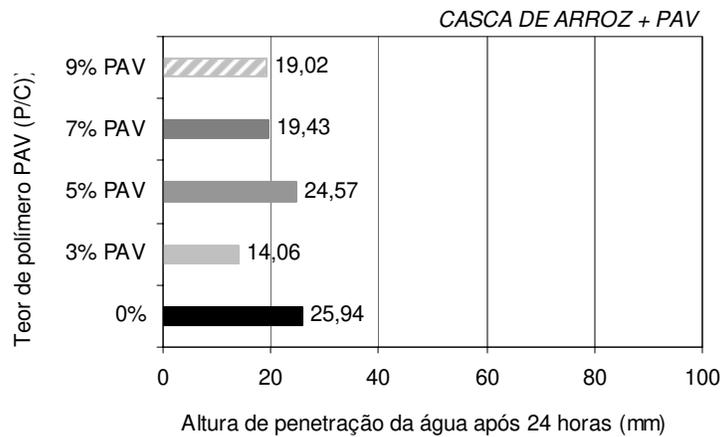


Figura 4.65 - Altura de penetração de água no compósito de casca de arroz (PAV22).

Tabela 4.37 - Absorção de água por capilaridade do compósito de *Agave sisalana* (SBR).

ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE DO COMPÓSITO DE AGAVE SISALANA (sisal) traço 1:0,08:0,60																
(Massa acumulada em gramas)																
Polímero	C.P.	Minicial	5 min	10 min	15 min	30 min	45 min	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h	24 h	Altura	
Estireno-butadieno (SBR)	0%	CP1	469,74	471,02	471,04	471,30	471,49	471,66	471,77	471,95	472,34	472,50	472,78	472,92	474,84	14,55
		CP2	475,46	477,37	477,64	477,72	478,01	478,23	478,28	478,46	478,86	479,10	479,56	479,73	481,56	12,01
		CP3	488,69	490,37	490,57	490,70	490,94	491,29	491,45	491,63	491,97	492,23	492,52	492,83	494,91	14,22
	3%	CP1	467,12	468,82	468,94	469,07	469,28	469,51	469,74	469,96	470,20	470,45	470,85	470,89	472,68	14,24
		CP2	471,64	472,66	472,79	472,86	473,08	473,22	473,26	473,35	473,60	473,74	474,14	474,20	475,81	10,97
		CP3	472,08	473,63	473,90	473,95	474,07	474,15	474,44	474,55	474,90	475,00	475,50	475,61	477,05	15,78
	5%	CP1	464,85	466,29	466,48	466,65	466,84	467,25	467,28	467,41	467,74	468,05	468,43	468,79	471,45	18,59
		CP2	471,37	472,80	473,16	473,29	473,51	473,62	473,73	473,86	474,25	474,33	474,64	474,80	476,79	17,61
		CP3	476,59	478,04	478,10	478,22	478,40	478,70	478,72	478,87	479,10	479,14	479,44	479,59	481,25	15,26
	7%	CP1	454,53	456,01	456,23	456,41	456,69	456,97	457,00	457,25	457,55	457,67	458,04	458,32	460,46	18,48
		CP2	459,05	460,18	460,25	460,48	460,52	460,62	460,73	460,78	460,82	460,98	461,29	461,41	462,74	15,36
		CP3	477,60	479,19	479,45	479,57	479,75	479,80	480,01	480,08	480,21	480,43	480,66	480,76	482,58	16,21
9%	CP1	454,11	455,08	455,28	455,46	455,69	455,73	455,76	455,89	456,15	456,21	456,54	456,65	458,34	13,56	
	CP2	471,01	472,36	472,45	472,80	472,95	472,99	473,00	473,14	473,31	473,51	473,77	473,81	475,48	16,46	
	CP3	474,47	475,00	475,32	475,36	475,55	475,64	475,67	475,70	475,84	475,98	476,30	476,39	478,14	15,08	

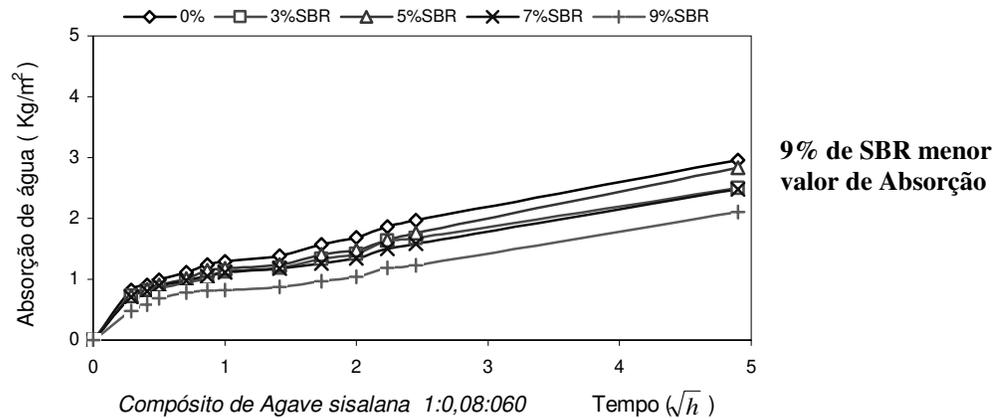


Figura 4.66 - Absorção de água por capilaridade do compósito *Agave sisalana* (SBR).

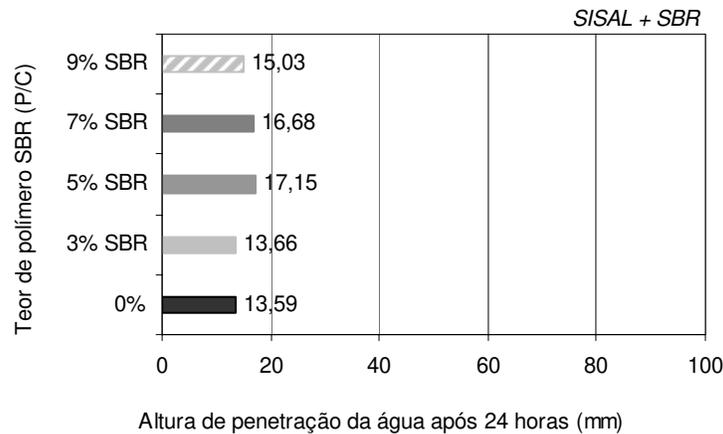


Figura 4.67 - Altura de penetração de água no compósito de *Agave sisalana* (SBR).

Tabela 4.38 - Absorção de água por capilaridade do compósito de *Agave sisalana* (PAV22).

ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE DO COMPÓSITO DE AGAVE SISALANA (sisal) traço 1:0,08:0,60																
(Massa acumulada em gramas)																
Polímero	C.P.	Minicial	5 min	10 min	15 min	30 min	45 min	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h	24 h	Altura	
Acetato-versatiato (PAV22)	0%	CP1	469,74	471,02	471,04	471,30	471,49	471,66	471,77	471,95	472,34	472,50	472,78	472,92	474,84	14,55
		CP2	475,46	477,37	477,64	477,72	478,01	478,23	478,28	478,46	478,86	479,10	479,56	479,73	481,56	12,01
		CP3	488,69	490,37	490,57	490,70	490,94	491,29	491,45	491,63	491,97	492,23	492,52	492,83	494,91	14,22
	3%	CP1	448,26	449,72	450,01	450,13	450,37	450,45	450,50	450,55	450,91	450,93	451,23	451,37	452,71	14,20
		CP2	452,37	453,48	453,68	453,40	453,97	454,14	454,14	454,40	454,45	454,47	454,89	454,91	455,99	11,93
		CP3	454,04	455,37	455,51	455,72	455,89	455,93	456,00	456,04	456,15	456,24	456,55	456,56	457,67	10,67
	5%	CP1	459,11	460,48	460,76	460,97	461,05	461,23	461,30	461,47	462,00	462,14	462,60	463,02	466,27	21,50
		CP2	469,22	470,55	470,71	471,04	471,16	471,33	471,46	471,71	472,06	472,33	473,05	473,24	477,70	25,10
		CP3	461,88	463,28	463,72	463,97	464,30	464,52	464,63	464,83	465,20	465,53	466,10	466,52	469,65	20,40
	7%	CP1	451,89	453,12	453,30	453,46	453,65	453,75	453,63	453,94	454,43	454,52	455,00	455,34	458,32	20,60
		CP2	461,73	462,75	462,90	463,20	463,40	463,48	463,55	463,73	464,12	464,28	464,70	465,00	467,61	17,22
		CP3	457,09	458,51	458,82	459,18	459,30	459,50	459,53	459,88	460,21	460,44	461,03	461,10	464,16	21,63
	9%	CP1	428,33	429,16	429,24	429,43	429,51	429,70	429,91	430,05	430,14	430,33	430,60	430,76	432,79	16,00
		CP2	428,92	429,92	429,97	430,26	430,31	430,63	430,50	430,63	430,92	431,10	431,37	431,55	433,60	15,90
		CP3	432,17	433,18	433,41	433,51	433,66	433,80	433,96	434,10	434,24	434,37	434,65	434,80	436,65	14,40

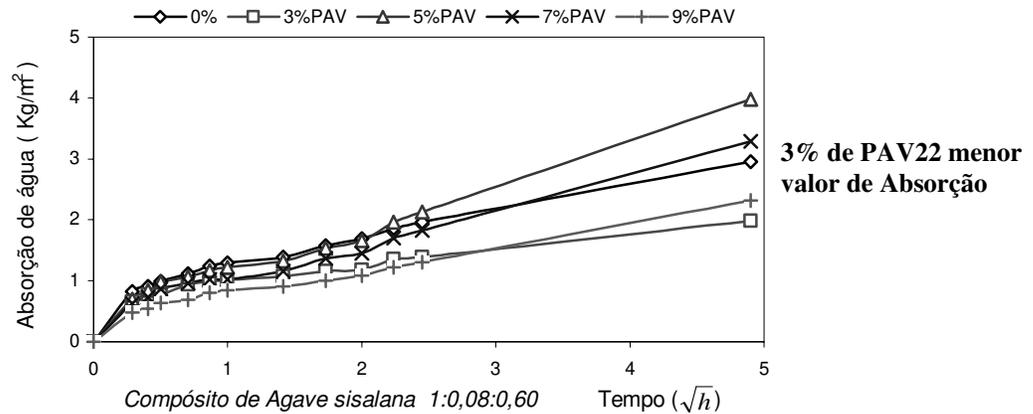


Figura 4.68 - Absorção de água por capilaridade do compósito *Agave sisalana* (PAV22).

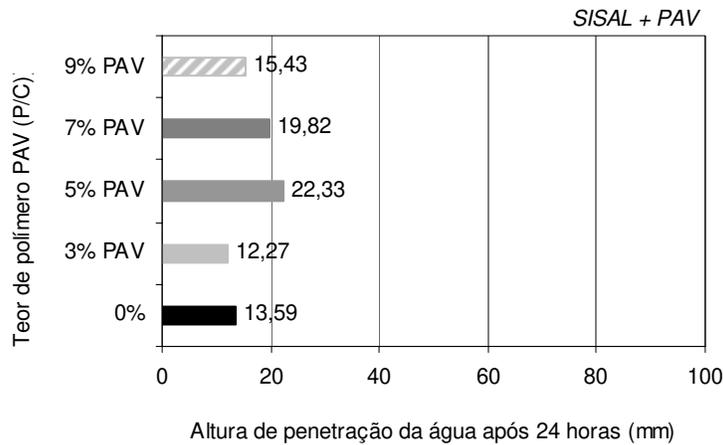


Figura 4.69 - Altura de penetração de água no compósito de *Agave sisalana* (PAV22).

4.4.6 Densidade de massa aparente no estado endurecido

Nas Tabelas 4.39 a 4.46 e nas Figuras 4.70 a 4.77 estão apresentadas as variações das densidades de massa aparente dos compósitos com a adição de polímeros. Os ensaios foram feitos em amostras secas em estufa a partir de corpos-de-prova cilíndricos nas dimensões de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Os compósitos de *Eucalyptus grandis* e de *Pinus caribaea* apresentaram comportamento similar, relacionado à essa propriedade, embora esses resíduos possuam características diferentes, pois as distribuições dos tamanhos das partículas são provenientes de processos diferentes de produção, possuindo capacidades distintas de absorção para cada compósito.

Tabela 4.39 - Densidade de massa aparente do compósito de *Eucalyptus grandis* (SBR).

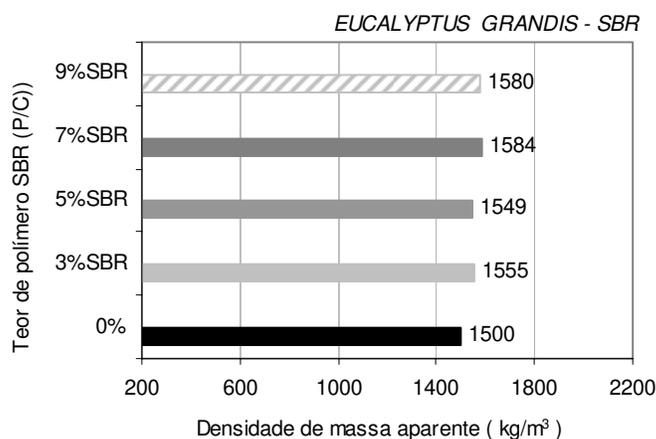
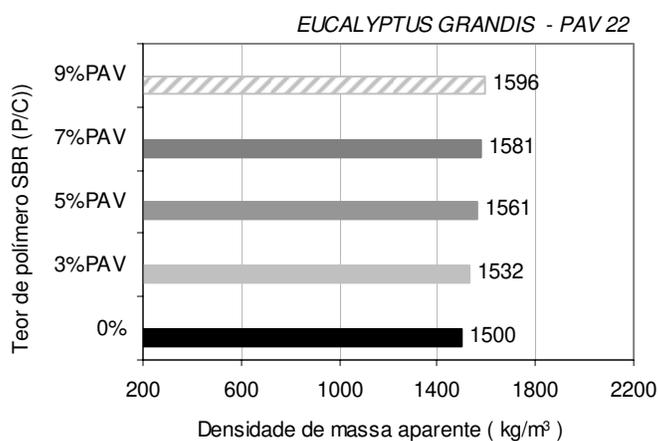
DENSIDADE DE MASSA APARENTE DO COMPÓSITO DE EUCALYPTUS GRANDIS - 1:0,36:0,84 (kg/m³)

Pol.	Teor	C.P.	Média diâmetros	Média alturas	Massa seca	Volume	D.M.A.	D.M.A. Médio
Estireno-butadieno - SBR	0%	CP1	50,17	102,33	294,29	0,000202	1454,77	1500
		CP2	50,31	103,43	307,51	0,000206	1495,59	
		CP3	50,15	103,55	316,71	0,000205	1548,38	
	3%	CP1	50,53	102,45	317,07	0,000205	1543,31	1555
		CP2	50,82	102,04	324,95	0,000207	1569,95	
		CP3	50,98	102,76	325,39	0,000210	1551,28	
	5%	CP1	50,57	105,90	325,76	0,000213	1531,53	1549
		CP2	50,75	106,95	341,72	0,000216	1579,53	
		CP3	51,19	105,27	332,82	0,000217	1536,19	
	7%	CP1	50,59	102,41	322,68	0,000206	1567,51	1584
		CP2	50,05	107,05	333,75	0,000211	1584,66	
		CP3	50,74	105,76	342,31	0,000214	1600,69	
9%	CP1	50,20	107,08	333,29	0,000212	1572,59	1580	
	CP2	50,16	106,18	335,83	0,000210	1600,56		
	CP3	50,63	107,85	340,45	0,000217	1567,93		

Tabela 4.40 - Densidade de massa aparente do compósito de *Eucalyptus grandis* (PAV22).

DENSIDADE DE MASSA APARENTE DO COMPÓSITO DE EUCALYPTUS GRANDIS - 1:0,36:0,84 (kg/m³)

Pol.	Teor	C.P.	Média diâmetros	Média alturas	Massa seca	Volume	D.M.A.	D.M.A. Médio
Acetato-versatato - PAV 22	0%	CP1	50,17	102,33	294,29	0,000202	1454,77	1500
		CP2	50,31	103,43	307,51	0,000206	1495,59	
		CP3	50,15	103,55	316,71	0,000205	1548,38	
	3%	CP1	50,50	107,75	322,76	0,000216	1495,51	1532
		CP2	50,33	106,78	330,14	0,000212	1554,04	
		CP3	50,21	106,83	327,16	0,000212	1546,66	
	5%	CP1	50,05	108,01	326,35	0,000213	1535,75	1561
		CP2	50,04	108,10	334,66	0,000213	1574,17	
		CP3	50,04	108,10	334,66	0,000213	1574,17	
	7%	CP1	50,02	99,67	304,33	0,000196	1553,82	1581
		CP2	49,97	100,21	309,39	0,000197	1574,29	
		CP3	50,09	100,61	320,03	0,000198	1614,20	
9%	CP1	50,12	100,34	314,55	0,000198	1588,92	1596	
	CP2	49,90	100,16	312,57	0,000196	1595,74		
	CP3	49,97	100,20	315,36	0,000197	1604,83		

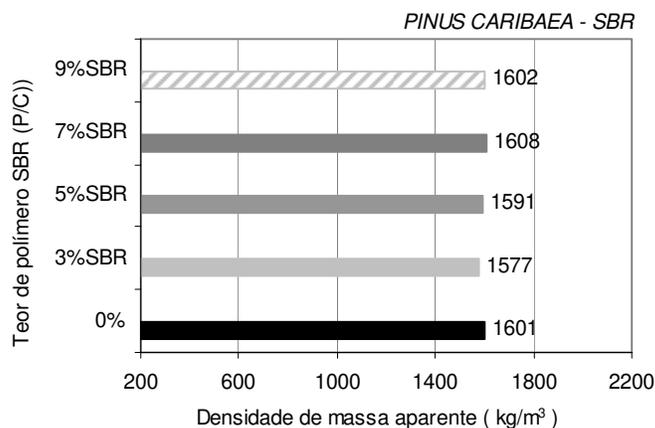
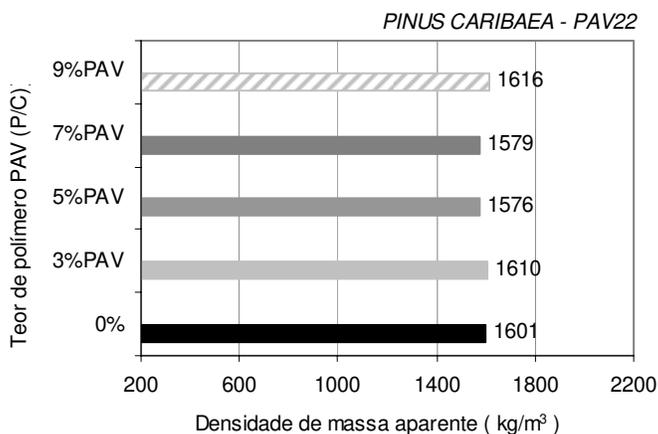
Figura 4.70 - Densidade de massa aparente do compósito de *Eucalyptus grandis* (SBR).Figura 4.71 - Densidade de massa aparente do compósito de *Eucalyptus grandis* (PAV22).Tabela 4.41 - Densidade de massa aparente do compósito de *Pinus caribaea* (SBR).

DENSIDADE DE MASSA APARENTE DO COMPÓSITO DE PINUS CARIBAEA - 1:0,36:1,08 (kg/m³)

Pol.	Teor	C.P.	Média diâmetros	Média alturas	Massa seca	Volume	D.M.A.	D.M.A. Médio
Estireno-butadieno - SBR	0%	CP1	50,1	100,48	313,26	0,000198	1581,46	1601
		CP2	50,45	72,38	228,13	0,000145	1576,71	
		CP3	50,12	100,78	327,04	0,000199	1644,80	
	3%	CP1	50,64	107,50	335,64	0,000217	1550,20	1577
		CP2	50,16	106,19	326,74	0,000210	1557,09	
		CP3	50,20	106,34	341,77	0,000210	1623,82	
	5%	CP1	49,94	102,21	316,86	0,000200	1582,65	1591
		CP2	50,28	102,18	323,49	0,000203	1594,46	
		CP3	50,22	102,42	323,58	0,000203	1594,97	
	7%	CP1	50,43	106,74	342,34	0,000213	1605,69	1608
		CP2	50,00	105,39	330,25	0,000207	1595,93	
		CP3	50,01	105,29	335,26	0,000207	1621,03	
9%	CP1	50,27	106,10	335,56	0,000211	1593,48	1602	
	CP2	50,20	106,76	339,22	0,000211	1605,37		
	CP3	50,00	105,40	332,68	0,000207	1607,52		

Tabela 4.42 - Densidade de massa aparente do compósito de *Pinus caribaea* (PAV22).

DENSIDADE DE MASSA APARENTE DO COMPÓSITO DE PINUS CARIBAEA - 1:0,36:1,08 (kg/m ³)								
Pol.	Teor	C.P.	Média diâmetros	Média alturas	Massa seca	Volume	D.M.A.	D.M.A. Médio
Acetato-versatato - PAV 22	0%	CP1	50,1	100,48	313,26	0,000198	1581,46	1601
		CP2	50,45	72,38	228,13	0,000145	1576,71	
		CP3	50,12	100,78	327,04	0,000199	1644,80	
	3%	CP1	50,11	104,92	329,72	0,000207	1593,48	1610
		CP2	50,27	105,28	339,75	0,000209	1625,94	
		CP3	50,33	106,82	342,12	0,000213	1609,83	
	5%	CP1	50,40	107,27	334,63	0,000214	1563,63	1576
		CP2	50,18	107,16	334,38	0,000212	1577,81	
		CP3	49,79	104,82	323,63	0,000204	1585,73	
	7%	CP1	50,09	106,43	331,84	0,000210	1582,24	1579
		CP2	50,24	105,74	330,39	0,000210	1576,15	
		CP3	50,22	106,22	332,08	0,000210	1578,31	
9%	CP1	49,88	107,74	339,57	0,000211	1612,90	1616	
	CP2	50,17	107,16	348,26	0,000212	1643,96		
	CP3	50,24	107,17	338,03	0,000212	1591,08		

Figura 4.72 - Densidade de massa aparente do compósito de *Pinus caribaea* (SBR).Figura 4.73 - Densidade de massa aparente do compósito de *Pinus caribaea* (PAV22).

Os compósitos com resíduos provenientes da casca de arroz, cujos resultados estão apresentados nas Tabelas 4.43 e 4.44 e nas Figuras 4.74 e 4.75, indicaram maior densidade de massa aparente em relação aos compósitos com resíduos provenientes das espécies *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea*, mesmo considerando que foi utilizada uma porcentagem menor de resíduos nos compósitos, ou seja, correspondente a 28% em massa em relação ao teor de cimento, em comparação ao teor de 36% para o compósito de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea*. Esta diferença pode ser atribuída ao resultado obtido com a determinação da massa unitária no estado seco e solto para a casca de arroz, que representou, aproximadamente, o dobro do valor relativo aos demais resíduos. A densidade de massa aparente passa a ser interessante quando o objetivo é a redução de cargas, produzindo-se elementos construtivos mais leves, sem prejuízo da sua resistência mecânica.

Tabela 4.43 - Densidade de massa aparente do compósito de casca de arroz (SBR).

DENSIDADE DE MASSA APARENTE DO COMPÓSITO DE CASCA DE ARROZ - 1:0,28:0,65 (kg/m ³)								
Pol.	Teor	C.P.	Média diâmetros	Média alturas	Massa seca	Volume	D.M.A.	D.M.A. Médio
Estireno-butadieno - SBR	0%	CP1	50,06	100,55	329,68	0,000198	1665,86	1689
		CP2	50,17	101,86	332,08	0,000201	1649,15	
		CP3	50,06	100,46	346,63	0,000198	1753,07	
	3%	CP1	50,73	101,33	359,74	0,000205	1756,43	1752
		CP2	50,07	101,11	346,74	0,000199	1741,66	
		CP3	50,13	100,85	350,05	0,000199	1758,60	
	5%	CP1	50,49	101,33	355,02	0,000203	1749,90	1790
		CP2	50,16	102,48	364,64	0,000203	1800,61	
		CP3	50,20	101,28	364,98	0,000200	1820,74	
	7%	CP1	50,21	100,94	361,16	0,000200	1807,03	1801
		CP2	50,00	101,20	357,93	0,000199	1801,30	
		CP3	50,08	101,60	359,33	0,000200	1795,48	
9%	CP1	49,87	102,52	378,13	0,000200	1888,26	1833	
	CP2	50,11	108,28	383,77	0,000214	1797,14		
	CP3	50,00	107,60	383,12	0,000211	1813,39		

Tabela 4.44 - Densidade de massa aparente do compósito de casca de arroz (PAV22).

DENSIDADE DE MASSA APARENTE DO COMPÓSITO DE CASCA DE ARROZ - 1:0,28:0,65 (kg/m ³)								
Pol.	Teor	C.P.	Média diâmetros	Média alturas	Massa seca	Volume	D.M.A.	D.M.A. Médio
Acetato-versatato - PAV 22	0%	CP1	50,06	100,55	329,68	0,000198	1665,86	1689
		CP2	50,17	101,86	332,08	0,000201	1649,15	
		CP3	50,06	100,46	346,63	0,000198	1753,07	
	3%	CP1	50,56	107,93	386,20	0,000217	1782,24	1795
		CP2	50,02	103,13	358,79	0,000203	1770,42	
		CP3	50,19	106,68	386,45	0,000211	1830,99	
	5%	CP1	50,21	105,50	373,67	0,000209	1788,81	1770
		CP2	49,86	107,19	371,05	0,000209	1772,89	
		CP3	50,41	105,52	367,93	0,000211	1747,05	
	7%	CP1	50,24	108,83	384,43	0,000216	1781,88	1787
		CP2	50,24	106,69	373,70	0,000212	1766,89	
		CP3	50,14	105,70	378,43	0,000209	1813,22	
	9%	CP1	50,07	106,83	392,10	0,000210	1864,05	1845
		CP2	50,02	105,52	389,74	0,000207	1879,58	
		CP3	50,58	107,72	387,50	0,000216	1790,30	

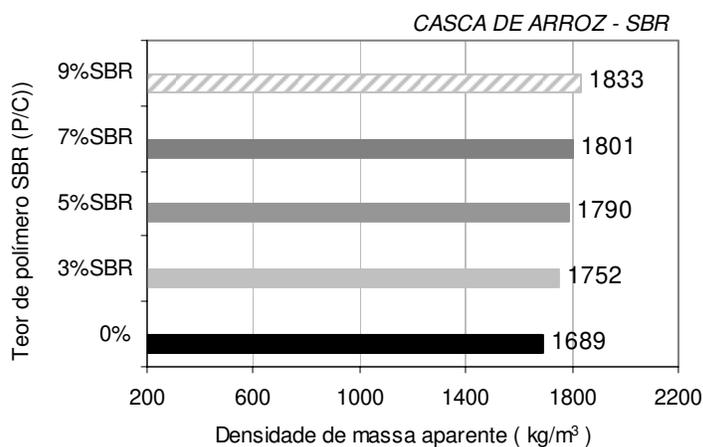


Figura 4.74 - Densidade de massa aparente do compósito de casca de arroz (SBR).

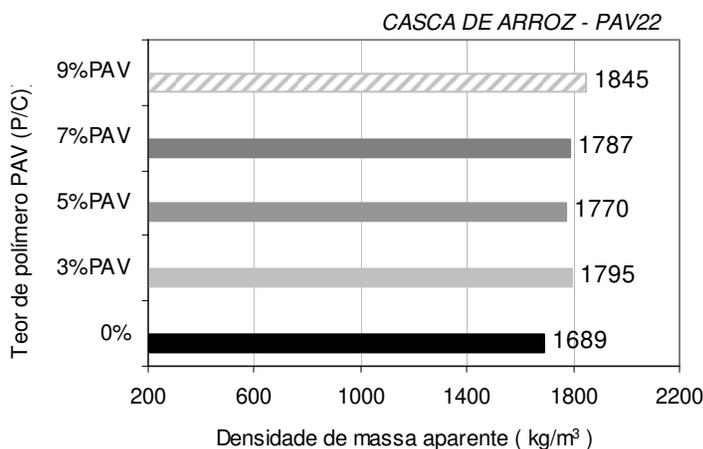


Figura 4.75 - Densidade de massa aparente do compósito de casca de arroz (PAV22).

Tabela 4.45 - Densidade de massa aparente do compósito de *Agave sisalana* (SBR).

DENSIDADE DE MASSA APARENTE DO COMPÓSITO DE AGAVE SISALANA - 1:0,08:0,60 (kg/m³)

Pol.	Teor	C.P.	Média diâmetros	Média alturas	Massa seca	Volume	D.M.A.	D.M.A. Médio
Estireno-butadieno - SBR	0%	CP1	50,57	106,47	461,14	0,000214	2156,40	2183
		CP2	50,44	107,06	467,07	0,000214	2183,30	
		CP3	50,77	107,05	478,93	0,000217	2209,94	
	3%	CP1	50,76	105,68	457,97	0,000214	2141,46	2167
		CP2	50,51	106,44	462,63	0,000213	2169,12	
		CP3	50,64	105,20	464,05	0,000212	2190,13	
	5%	CP1	50,26	107,10	456,16	0,000212	2146,80	2176
		CP2	50,59	107,45	466,71	0,000216	2160,83	
		CP3	50,38	106,67	472,44	0,000213	2221,76	
	7%	CP1	50,48	105,67	449,53	0,000211	2125,58	2177
		CP2	49,90	104,90	453,97	0,000205	2212,89	
		CP3	50,53	107,60	472,81	0,000216	2191,21	
9%	CP1	50,06	105,11	448,80	0,000207	2169,38	2188	
	CP2	50,51	106,77	465,35	0,000214	2175,13		
	CP3	50,28	106,18	468,10	0,000211	2220,31		

Tabela 4.46 - Densidade de massa aparente do compósito de *Agave sisalana* (PAV22).

DENSIDADE DE MASSA APARENTE DO COMPÓSITO DE AGAVE SISALANA - 1:0,08:0,60 (kg/m³)

Pol.	Teor	C.P.	Média diâmetros	Média alturas	Massa seca	Volume	D.M.A.	D.M.A. Médio
Acetato-versatato - PAV 22	0%	CP1	50,57	106,47	461,14	0,000214	2156,40	2183
		CP2	50,44	107,06	467,07	0,000214	2183,30	
		CP3	50,77	107,05	478,93	0,000217	2209,94	
	3%	CP1	50,44	102,23	442,25	0,000204	2164,95	2177
		CP2	50,47	103,41	445,18	0,000207	2151,87	
		CP3	50,06	102,28	445,82	0,000201	2214,60	
	5%	CP1	50,32	106,37	451,31	0,000212	2133,46	2156
		CP2	50,32	106,95	460,59	0,000213	2165,52	
		CP3	50,40	105,18	455,39	0,000210	2170,19	
	7%	CP1	50,46	105,44	445,89	0,000211	2114,64	2144
		CP2	50,00	106,90	455,81	0,000210	2171,58	
		CP3	50,29	106,00	451,51	0,000211	2144,41	
9%	CP1	50,19	101,60	421,99	0,000201	2099,34	2119	
	CP2	50,28	100,36	422,92	0,000199	2122,35		
	CP3	50,13	100,96	425,27	0,000199	2134,17		

Os compósitos provenientes dos resíduos da espécie *Agave sisalana* (sisal), de acordo com os resultados das Tabelas 4.45 e 4.46 e das Figuras 4.76 e 4.77, apresentaram os maiores valores para densidade de massa aparente em comparação aos demais compósitos. A adição de 8% em massa foi o menor teor de resíduo utilizado dentre os compósitos, porém, esta quantidade constituiu em um teor limite, a partir do qual seria comprometido o processo de mistura e sua homogeneização. A resistência à compressão do compósito é influenciada pela densidade de massa aparente, ou seja, quanto maior for a densidade maior será a resistência à compressão. Um compósito com maior densidade pode apresentar algumas desvantagens, entre elas, um aumento da mão-de-obra no assentamento de blocos vazados em razão do maior tempo utilizado para este fim.

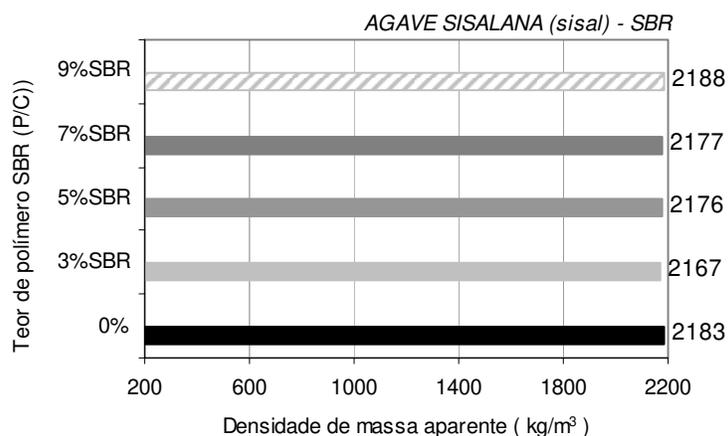


Figura 4.76 - Densidade de massa aparente do compósito de *Agave sisalana* “sisal” (SBR).

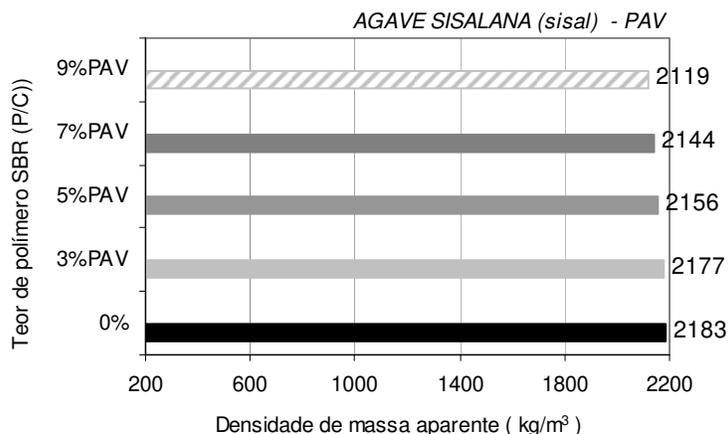


Figura 4.77 - Densidade de massa aparente do compósito de *Agave sisalana* “sisal” (PAV22).

4.5 Caracterização específica dos compósitos

Nas Tabelas 4.47 a 4.50 e nas Figuras 4.78 a 4.81 estão apresentados os resultados obtidos dos ensaios de porosidade e permeabilidade dos compósitos com a adição dos polímeros SBR e PAV22.

4.5.1 Análise da porosidade e da permeabilidade.

Na Figura 4.78 (a) verificou-se que no compósito de *Eucalyptus grandis* ocorreu um aumento da porosidade com a adição de SBR e uma diminuição com a adição de PAV 22, com exceção da adição de 5% de PAV22; o menor valor correspondeu à adição de 7% de PAV22. Na Figura 4.78 (b) verificou-se um aumento da permeabilidade com a adição de SBR, com exceção da adição de 3% de SBR, e uma diminuição da permeabilidade com a adição de PAV 22, com o menor valor correspondendo à adição de 3% de PAV22.

Tabela 4.47 - Porosidade e permeabilidade do compósito de *Eucalyptus grandis*.

COMPÓSITO DE EUCALYPTUS GRANDIS - Traço 1:0,36:0,84										
	POLÍMERO ESTIRENO-BUTADIENO (SBR)					POLÍMERO ACETATO-VERSATATO (PAV22)				
Teor de polímero	0%	3%	5%	7%	9%	0%	3%	5%	7%	9%
Porosidade (%)	35,7	36,99	71,55	62,16	66,77	35,7	33,57	44,54	25,51	28,17
Permeabilidade (mildarcies)	1337,1	998,2	2789,0	2899,9	2713,0	1337,1	677,3	1284,4	987,6	1155,1

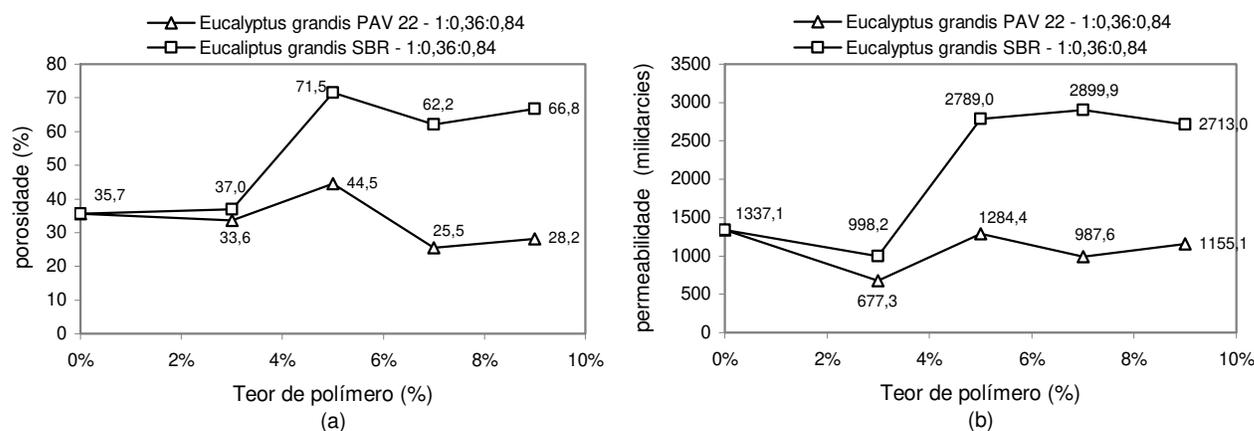


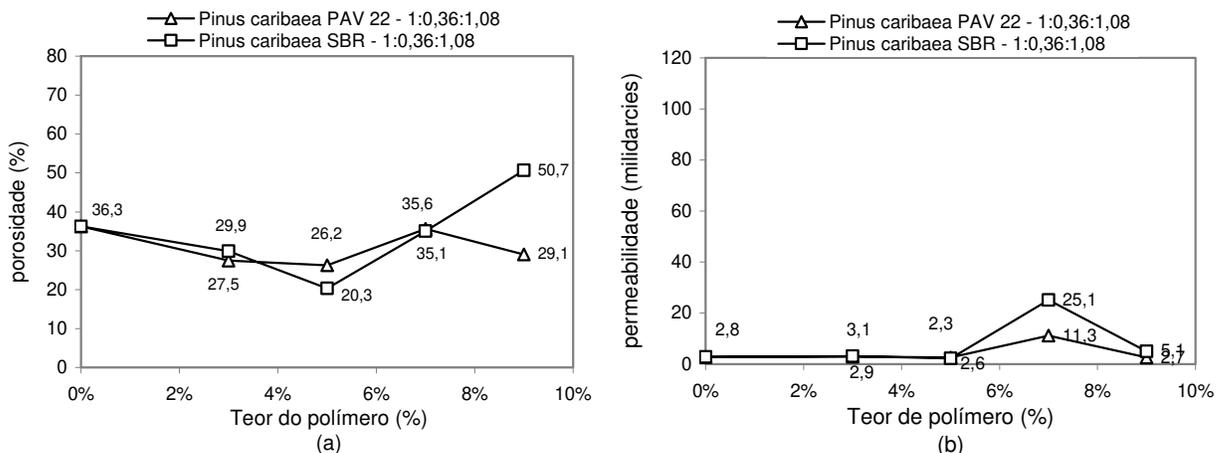
Figura 4.78 - Porosidade e permeabilidade do compósito de *Eucalyptus grandis*.

(a) variação da porosidade (b) variação da permeabilidade.

Na Figura 4.79 (a) observou-se que no compósito de *Pinus caribaea* ocorreu uma diminuição da porosidade com a adição de SBR, com o menor valor correspondendo à adição de 5% de SBR, e uma diminuição da porosidade com a adição de PAV 22, exceto com a adição de 9%, com menor valor correspondendo à adição de 5% de SBR. Na Figura 4.79 (b) verificou-se um aumento da permeabilidade com a adição de SBR, com exceção da adição de 5% que correspondeu ao menor valor de permeabilidade. A adição do polímero PAV22 conferiu um aumento da permeabilidade com os teores de 3% e 7% e uma diminuição com os teores de 5% e 9%. Os valores de permeabilidade obtidos com a adição de 7% foram maiores em relação àqueles encontrados com a adição de 5%. Esta diferença pode ser atribuída às condições de contorno inerentes ao ensaio de permeabilidade. De acordo com o ensaio, a passagem do gás N₂ deve ser efetuada através da amostra e não pelas laterais. Isto pode ter ocorrido em decorrência de uma eventual irregularidade existente na superfície da mesma, embora o porta-amostra possua uma vedação de borracha para impedir que esse fluxo aconteça.

Tabela 4.48- Porosidade e permeabilidade do compósito de *Pinus caribaea*.

COMPÓSITO DE PINUS CARIBAEA - Traço 1:0,36:1,08										
	POLÍMERO ESTIRENO-BUTADIENO (SBR)					POLÍMERO ACETATO-VERSATATO (PAV22)				
Teor de polímero	0%	3%	5%	7%	9%	0%	3%	5%	7%	9%
Porosidade (%)	36,3	29,92	20,31	35,07	50,66	36,3	27,45	26,23	35,61	29,07
Permeabilidade (mildarcies)	2,8	3,1	2,3	25,1	5,1	2,8	2,9	2,6	11,3	2,7

Figura 4.79 - Porosidade e permeabilidade do compósito *Pinus caribaea*.

(a) variação da porosidade (b) variação da permeabilidade.

Na Figura 4.80 (a) observou-se que no compósito de casca de arroz ocorreu uma diminuição da porosidade com a adição de SBR, com menor valor correspondendo à adição de 7% de SBR. Com a adição de PAV22, também houve uma diminuição da porosidade com menor valor correspondendo à adição de 5% de PAV22. Na Figura 4.80 (b) observou-se uma diminuição da permeabilidade com a adição de SBR, com menor valor correspondendo à adição de 7% de SBR. A porosidade diminuiu com a adição de PAV22, com menor valor correspondendo a 5%.

Tabela 4.49 - Porosidade e permeabilidade do compósito de casca de arroz.

COMPÓSITO DE CASCA DE ARROZ - Traço 1:0,28:0,65										
	POLÍMERO ESTIRENO-BUTADIENO (SBR)					POLÍMERO ACETATO-VERSATATO (PAV22)				
Teor de polímero	0%	3%	5%	7%	9%	0%	3%	5%	7%	9%
Porosidade (%)	30,6	25,49	17,83	12,32	28,60	30,6	15,37	29,39	25,80	25,40
Permeabilidade (mildarcies)	504,2	464,1	357,5	255,4	336,8	504,2	273,2	228,4	377,8	382,7

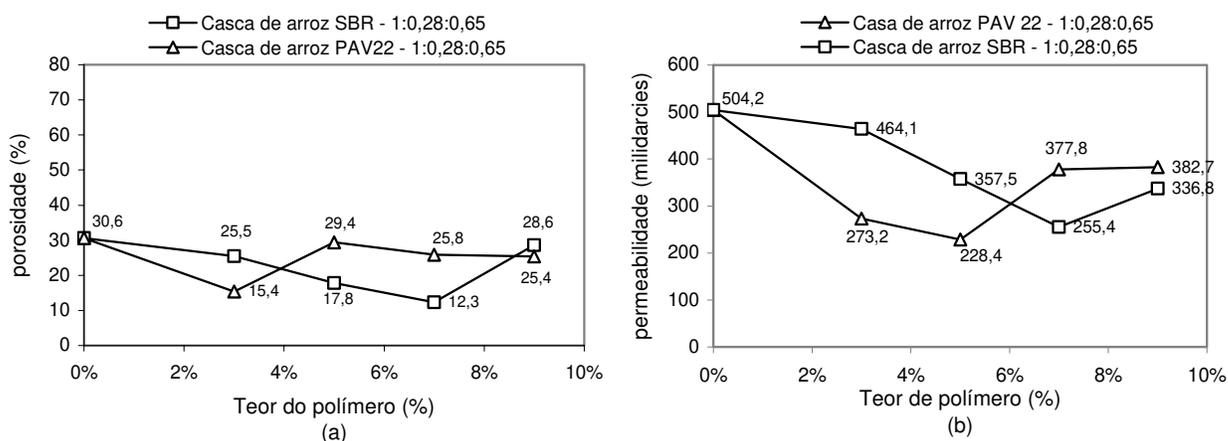


Figura 4.80 - Porosidade e permeabilidade do compósito de casca de arroz.

(a) variação da porosidade (b) variação da permeabilidade.

Em relação ao compósito de *Agave sisalana* (sisal) observou-se na Figura 4.81 (a) que ocorreu, inicialmente, uma ligeira diminuição, seguida por um pequeno aumento da porosidade com a adição de SBR, com o menor valor correspondendo à adição de 3% de SBR. Com a adição de PAV22 houve uma diminuição da porosidade com o menor valor correspondendo à adição de 9% de PAV22. Na Figura 4.81 (b) observou-se um aumento da permeabilidade com a adição de SBR, com exceção da adição de 3%, correspondendo ao menor valor encontrado. Na adição de PAV22 houve, inicialmente, uma ligeira diminuição com a adição de 3% e, em seguida, um

aumento da permeabilidade com as adições de 5% e 7%, voltando a diminuir quando da adição de 9%.

Tabela 4.50 - Porosidade e permeabilidade do compósito *Agave sisalana* (SBR e PAV22).

COMPÓSITO DE AGAVE SISALANA (sisal) - Traço 1:0,08:0,60										
	POLÍMERO ESTIRENO-BUTADIENO (SBR)					POLÍMERO ACETATO-VERSATATO (PAV22)				
Teor de polímero	0%	3%	5%	7%	9%	0%	3%	5%	7%	9%
Porosidade (%)	18,9	15,99	16,29	15,88	13,46	18,9	12,73	25,46	21,08	17,87
Permeabilidade (mildarcies)	65,3	65,7	76,2	80,2	72,3	65,3	60,0	107,3	95,2	63,5

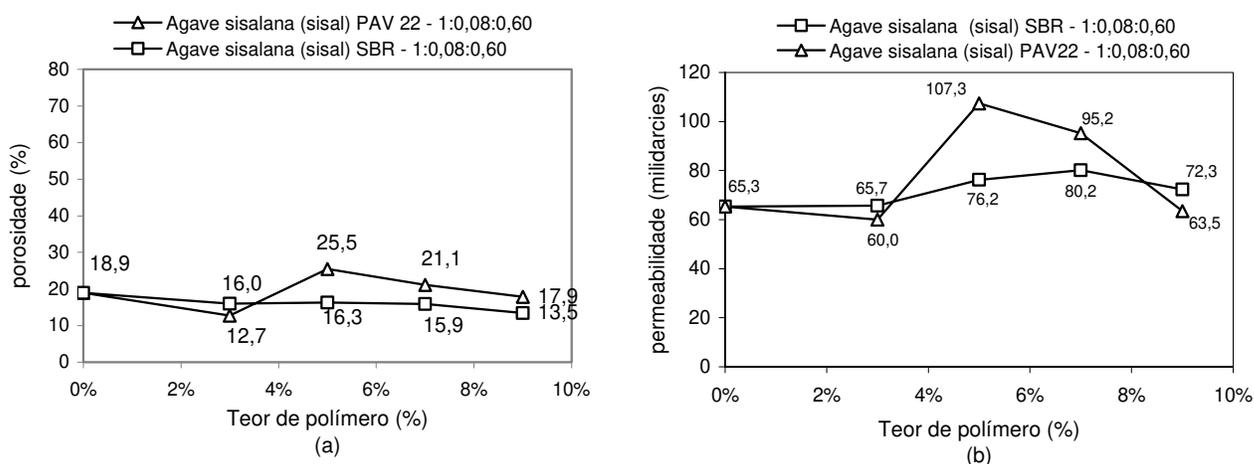


Figura 4.81 - Porosidade e permeabilidade do compósito de *Agave sisalana*.

(a) variação da porosidade (b) variação da permeabilidade.

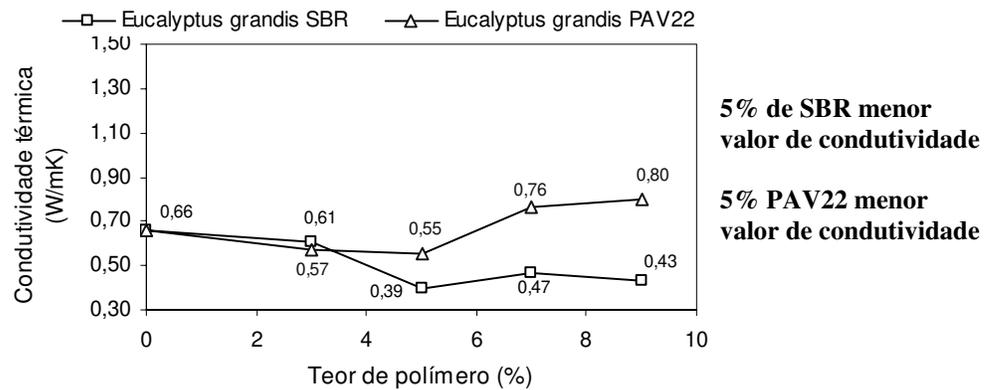
A variação dos valores da porosidade nos compósitos à base de resíduos está em conformidade com a variação dos valores obtidos com os ensaios de absorção de água por capilaridade. A adição de SBR aumentou a absorção e a porosidade nos compósitos de *Eucalyptus grandis* e as reduziu para os demais compósitos, o que pode ser atribuído à capacidade de absorção do resíduo. A adição de PAV22 reduziu a absorção e a porosidade dos compósitos em geral. A permeabilidade acompanhou coerentemente a tendência dos valores de altura de penetração de água dos compósitos determinados com os ensaios de absorção. Os compósitos de *Eucalyptus grandis* apresentaram valores significativamente maiores em relação aos demais compósitos, assim como os compósitos de casca de arroz em relação aos do *Pinus caribaea* e da *Agave sisalana*.

4.5.2 Análise da condutividade térmica

Os resultados obtidos com os ensaios de condutividade térmica estão apresentados nas Tabelas 4.51 a 4.54 e Figuras 4.82 a 4.85. Nos compósitos de *Eucalyptus grandis* a condutividade diminuiu com a adição de SBR, com o menor valor correspondendo à adição de 5% de SBR. Porém, com a adição de PAV22 a condutividade térmica diminuiu até o teor de 5% e, em seguida, aumentou com a adição de 7%, até atingir o maior valor correspondendo à adição de 9%. Isto pode ser atribuído a uma das propriedades que o polímero possui que é a de incorporar ar na mistura (OHAMA, 1998). A adição de maior teor de polímero conferiu melhor impermeabilização ao compósito, proveniente do fenômeno de formação da película polimérica. Nos compósitos de *Pinus caribaea* a condutividade aumentou com a adição de polímeros, com o maior valor correspondendo à adição de 5% de SBR e, em seguida, diminuiu com o teor de 7% e 9%, sendo este último correspondente ao menor valor alcançado. Neste caso, inicialmente o teor de polímero foi adequado para impermeabilizar a mistura, porém, a partir do momento em que se adicionou mais polímero o efeito passou a ser inverso, prevalecendo mais a incorporação de ar no compósito devido à presença do polímero. Na adição de PAV22 ocorreu aumento da condutividade com maior valor correspondendo à adição de 5% e 9%. Para os compósitos de casca de arroz ocorreu aumento com a adição de SBR com o valor maior correspondente a 7%, exceto para o teor de 9% para qual ocorreu uma diminuição. Para a adição de PAV22 houve inicialmente um aumento da condutividade, com o maior valor correspondendo a 3%, e diminuindo para as adições de 7% e 9%, sendo este último o menor valor de condutividade encontrado. Nos compósitos de sisal a variação dos valores para condutividade não foram significativos, permanecendo sempre com valores compatíveis com os valores determinados para as argamassas convencionais (argamassa mista). Os resíduos vegetais são materiais que possuem maior resistividade à condução de calor e, incorporados à matriz cimentícia, transmitem de modo direto essas mesmas características ao compósito formado. Em contrapartida, a adição dos polímeros apresentou outra dinâmica em relação aos fenômenos ocorridos, interferindo na estrutura de formação e nas propriedades dos compósitos. Os maiores valores de condutividade térmica determinados foram dos compósitos de *Agave sisalana* com 1,14 W/mK, em média, seguido pelos compósitos de casca de arroz com 0,72 W/mK, os compósitos de *Pinus caribaea* com 0,68 W/mK e os compósitos de *Eucalyptus grandis* com 0,59 W/mK.

Tabela 4.51 - Condutividade térmica do compósito de *Eucalyptus grandis*.

Condutividade térmica - Compósito <i>Eucalyptus grandis</i> 1:0,36:0,84									
Teor de SBR (%)	C1	C2	C3	Média	Teor de PAV22 (%)	C1	C2	C3	Média
0	0,65	0,64	0,67	0,66	0	0,65	0,64	0,67	0,66
3	0,60	0,63	0,61	0,61	3	0,61	0,57	0,54	0,57
5	0,39	0,38	0,41	0,39	5	0,55	0,57	0,54	0,55
7	0,45	0,47	0,49	0,47	7	0,76	0,77	0,75	0,76
9	0,43	0,42	0,45	0,43	9	0,81	0,80	0,80	0,80

Figura 4.82 - Condutividade térmica do compósito de *Eucalyptus grandis*.Tabela 4.52 - Condutividade térmica do compósito de *Pinus caribaea*.

Condutividade térmica - Compósito <i>Pinus caribaea</i> 1:0,36:1,08									
Teor de SBR (%)	C1	C2	C3	Média	Teor de PAV22 (%)	C1	C2	C3	Média
0	0,63	0,60	0,61	0,61	0	0,63	0,60	0,61	0,61
3	0,66	0,65	0,66	0,66	3	0,79	0,78	0,80	0,79
5	0,80	0,82	0,80	0,81	5	0,79	0,82	0,80	0,80
7	0,57	0,60	0,59	0,59	7	0,62	0,63	0,62	0,62
9	0,49	0,50	0,50	0,50	9	0,80	0,78	0,82	0,80

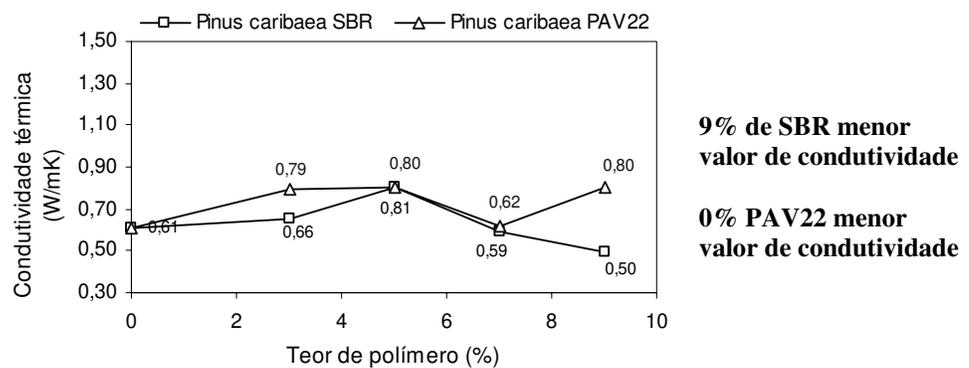
Figura 4.83 - Condutividade térmica do compósito de *Pinus caribaea*.

Tabela 4.53 - Condutividade térmica do compósito de casca de arroz.

Condutividade térmica - Compósito Casca de arroz 1:0,28:0,65									
Teor de SBR (%)	C1	C2	C3	Média	Teor de PAV22 (%)	C1	C2	C3	Média
0	0,67	0,62	0,65	0,65	0	0,67	0,62	0,65	0,65
3	0,82	0,84	0,82	0,83	3	0,95	0,94	0,97	0,95
5	0,93	0,92	0,88	0,91	5	0,67	0,70	0,69	0,69
7	0,98	0,98	0,96	0,97	7	0,45	0,48	0,47	0,47
9	0,60	0,64	0,62	0,62	9	0,46	0,45	0,46	0,46

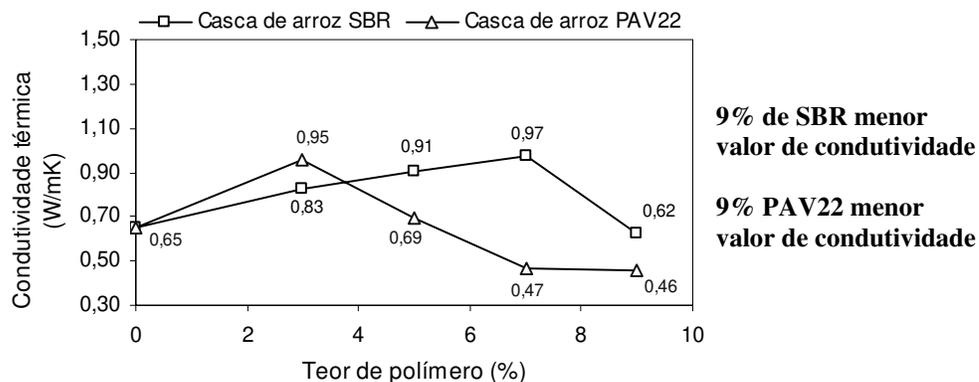
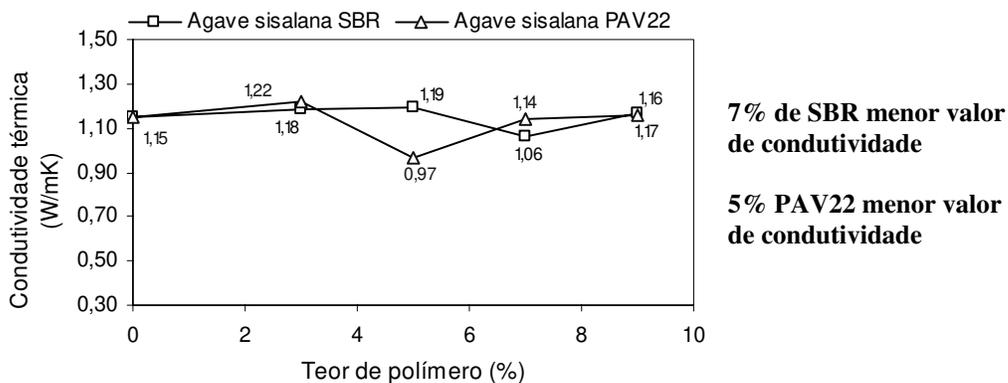


Figura 4.84 - Condutividade térmica do compósito de casca de arroz.

Tabela 4.54 - Condutividade térmica do compósito de *Agave sisalana*.

Condutividade térmica - Compósito <i>Agave sisalana</i> (sisal) 1:0,08:0,60									
Teor de SBR (%)	C1	C2	C3	Média	Teor de PAV22 (%)	C1	C2	C3	Média
0	1,16	1,14	1,15	1,15	0	1,16	1,14	1,15	1,15
3	1,17	1,18	1,20	1,18	3	1,22	1,21	1,23	1,22
5	1,17	1,21	1,19	1,19	5	0,95	0,99	0,96	0,97
7	1,08	1,05	1,06	1,06	7	1,12	1,14	1,17	1,14
9	1,15	1,17	1,18	1,17	9	1,19	1,13	1,16	1,16

Figura 4.85 - Condutividade térmica do compósito de *Agave sisalana*.

4.5.3 Análise de imagens por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Através das imagens das Figuras 4.86 a 4.105 verificou-se a influência causada pela adição dos polímeros nos compósitos. Para efeito de comparação foram utilizados os compósitos com e sem resíduos, e sem adição de polímeros, que serviram como referência para se observar as diferenças existentes na interface entre os resíduos e a pasta cimentícia, assim como, na própria pasta cimentícia. Em vista das dificuldades existentes na interpretação das imagens optou-se por adotar um procedimento que focasse, principalmente, as modificações na matriz cimentícia, já conhecidas através de literatura específica, por meio de técnicas de microscopia eletrônica de varredura e das inúmeras informações necessárias para sua completa interpretação. Com o objetivo de se identificar e diferenciar a ação dos polímeros realizaram ensaios de MEV com amostras das pastas cimentícias confeccionadas a partir dos componentes envolvidos (cimento, areia lavada e os polímeros SBR e PAV22). Possíveis combinações utilizadas na formação dos compósitos foram observadas, todavia, com o intuito de simplificar a análise visual, utilizando-se a combinação da mistura de dois componentes por vez. Inicialmente, a micrografia da mistura do cimento com a água (PC), na Figura 4.86, apresentou estruturas usualmente identificadas, dos produtos formados com a hidratação do cimento, tais como, silicato de cálcio hidratado (C-S-H), hidróxido de cálcio (C-H) e agulhas de etringita. Na Figura 4.87 essas mesmas estruturas formadas também podem ser observadas.

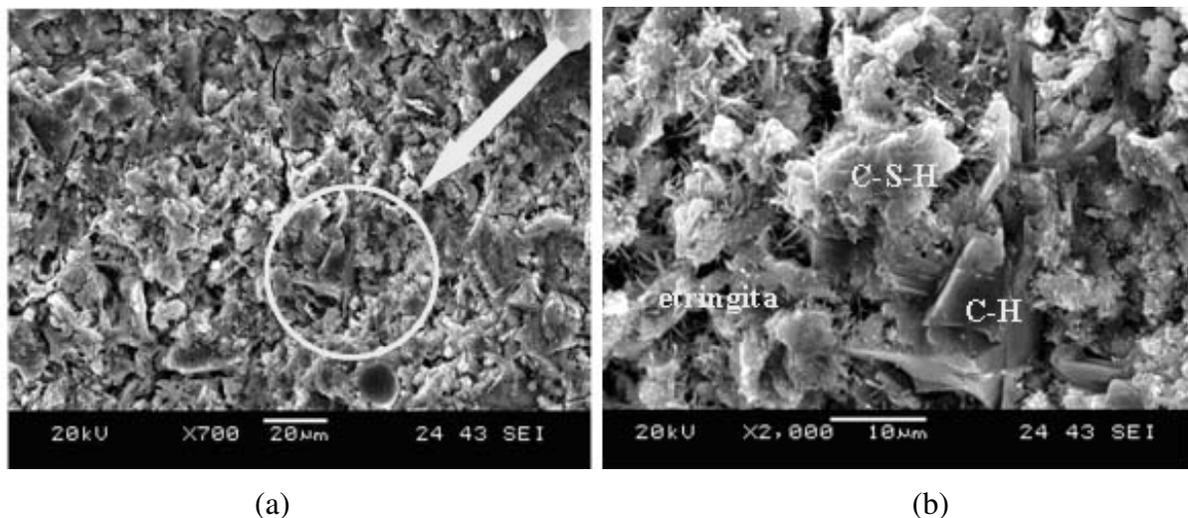


Figura 4.86 - Micrografia da pasta de cimento (PC), idade de 28 dias: (a) ampliação 700 x; (b) produtos da hidratação (C-S-H, C-H, agulhas de etringita) ampliação 2000 x.

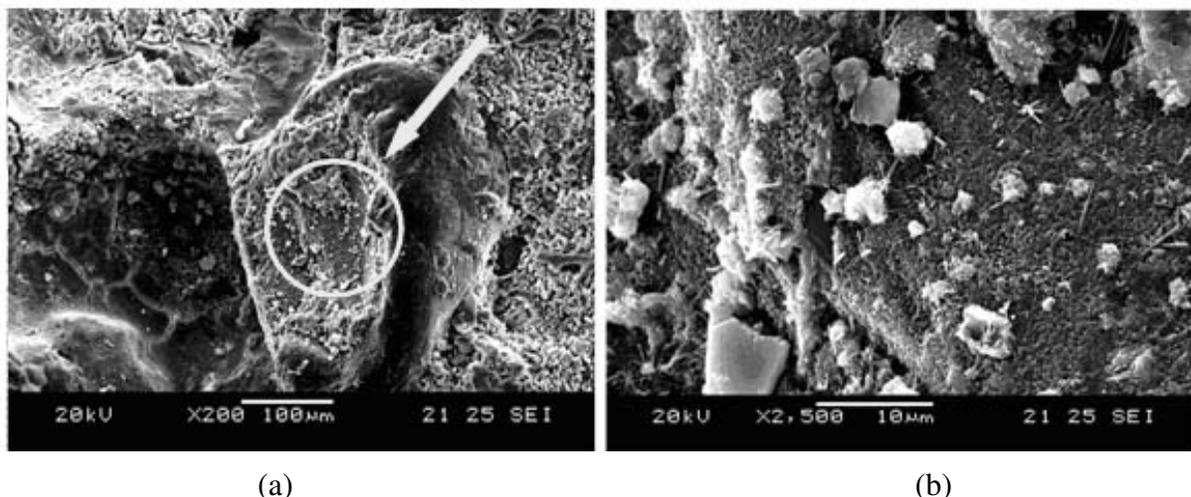


Figura 4.87 - Micrografia da pasta de cimento e areia (PCA), idade de 28 dias: (a) ampliação 200 x; (b) produtos da hidratação ampliação 2500 x.

Como apresentado na Figura 4.88, a influência dos polímeros foi observada em pasta de cimento impregnada com 5% de SBR, verificando-se a formação da película (filme polimérico) de SBR envolvendo os produtos, provenientes da hidratação do cimento, descaracterizando suas formas e dificultando a identificação de cada composto. Apenas uma ou outra forma pode ser identificada como, por exemplo, na Figura 4.88 (b), pode ser observada uma estrutura de etringita (tipo “agulha”). A figura 4.89 referente à micrografia da pasta de cimento com adição de 5% de PAV22 mostra a impregnação do polímero nos produtos de hidratação, observando-se algumas formas identificadas como C-H.

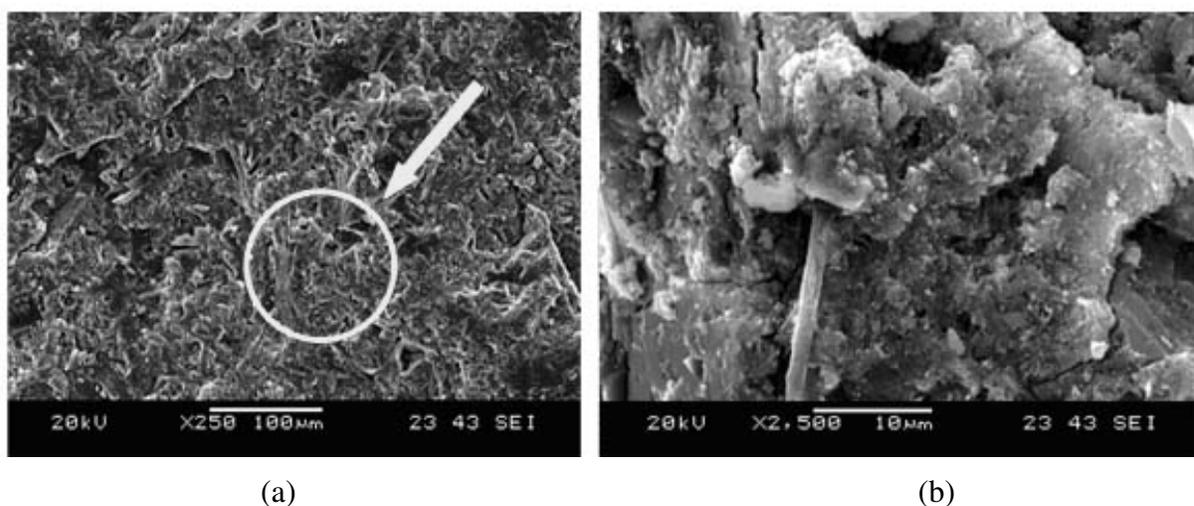


Figura 4.88 - Micrografia da pasta de cimento com 5% de SBR (PCS), idade de 28 dias: (a) ampliação 250 x ; (b) ampliação 2500 x mostra produtos da hidratação impregnados.

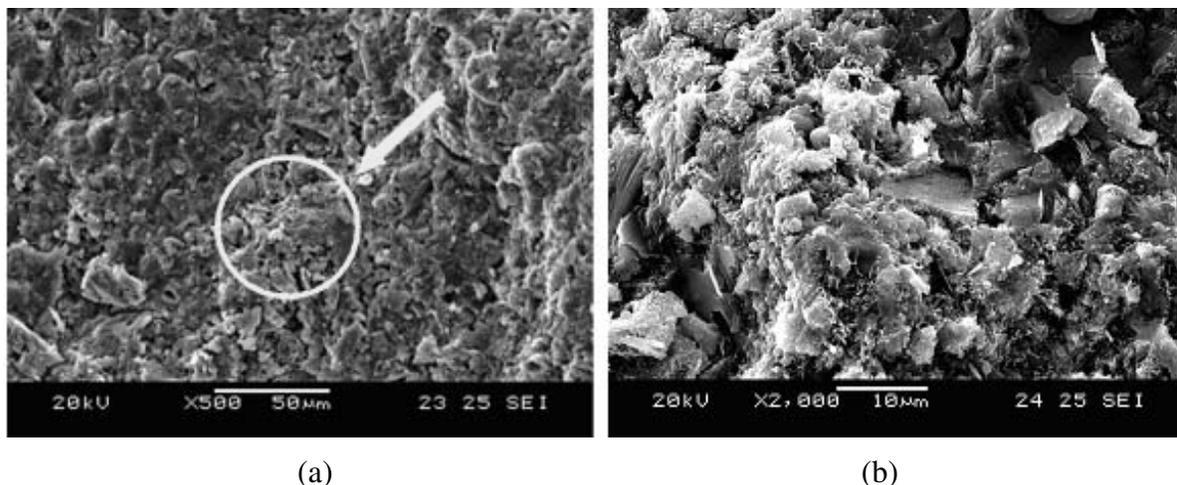


Figura 4.89 - Micrografia da pasta de cimento com 5% de PAV22 (PCP), idade de 28 dias: (a) ampliação 500 x; (b) ampliação 2000 x mostra produtos da hidratação impregnados.

Além da observação das pastas buscou-se, também, observar cada partícula dos resíduos vegetais, impregnadas ou não com o polímero SBR. Nas Figuras de 4.90 a 4.93 observou-se que a região impregnada com polímero encobre sua superfície com uma película. Esta diferença pôde ser verificada comparando-se, na mesma micrografia, as fases com e sem a adição do polímero SBR. A impregnação das partículas pode ser atribuída à capacidade de dispersão do polímero, encobrindo, praticamente, toda a área superficial das partículas. Possivelmente, isso pode se constituir em uma camada de proteção contra eventuais penetrações de água, proveniente dos fenômenos de transporte, aumentando a durabilidade das partículas vegetais.

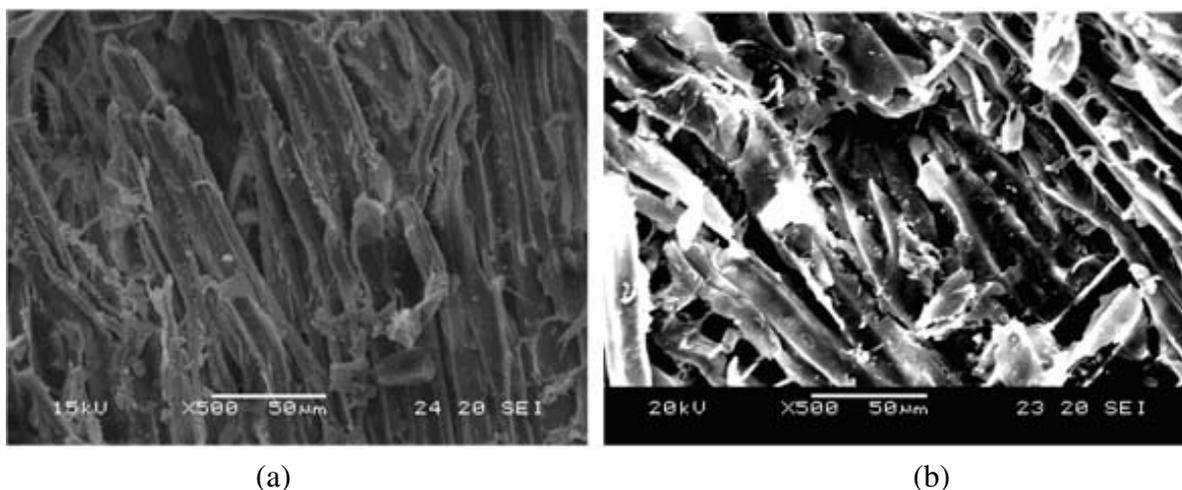


Figura 4.90 - Micrografia (MEV) com ampliação de 500 x das partículas de *Eucalyptus grandis*: (a) partículas sem adição de polímero e (b) partículas com adição de SBR.

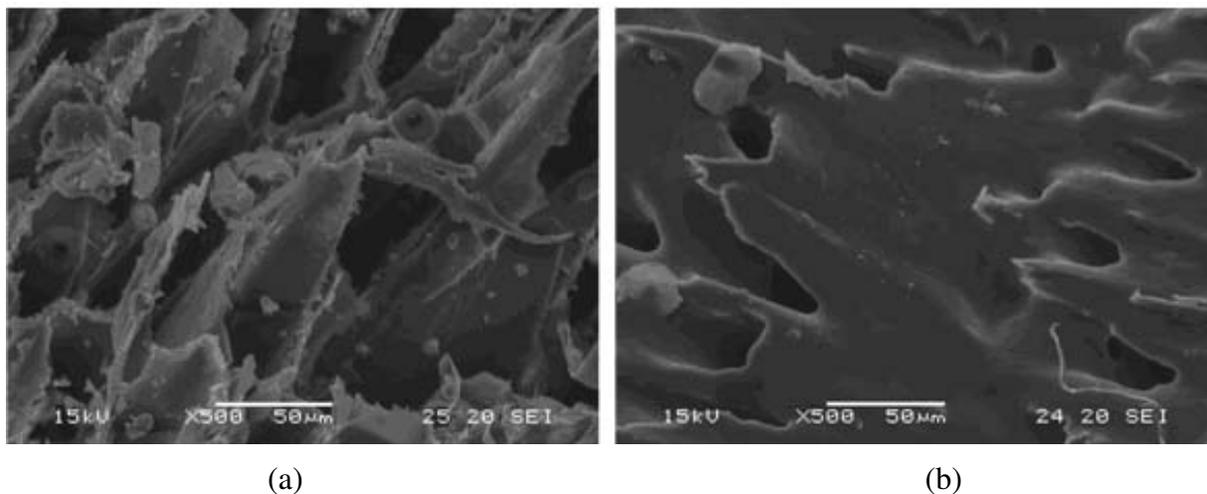


Figura 4.91 - Micrografia (MEV) com ampliação de 500 x das partículas de *Pinus caribaea*: (a) partículas sem adição de polímero e (b) partículas com adição de SBR.

Tanto na Figura 4.91 (b) como na Figura 4.92 (b) observou-se que o efeito de impregnação do polímero conferiu uma película de recobrimento sobre o resíduo, evidenciando o aumento da impermeabilização sobre a superfície do mesmo. Este fato está em concordância com os resultados de redução da absorção de água por capilaridade e da porosidade, proveniente da adição dos polímeros na mistura de formação desses compósitos.

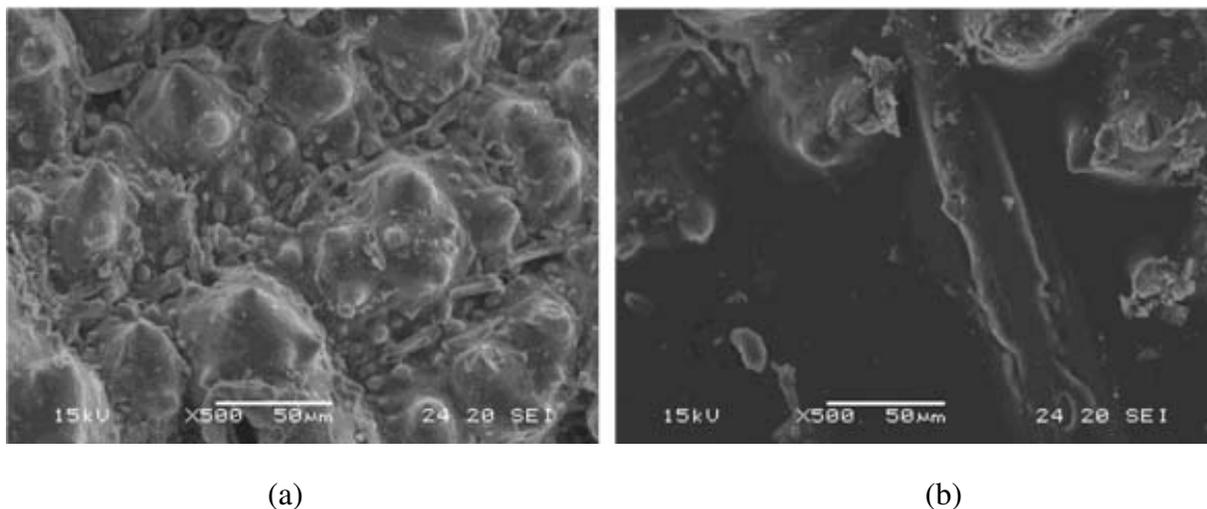


Figura 4.92 - Micrografia (MEV) com ampliação de 500 x das partículas de casca de arroz: (a) partículas sem adição de polímero e (b) partículas com adição de SBR.

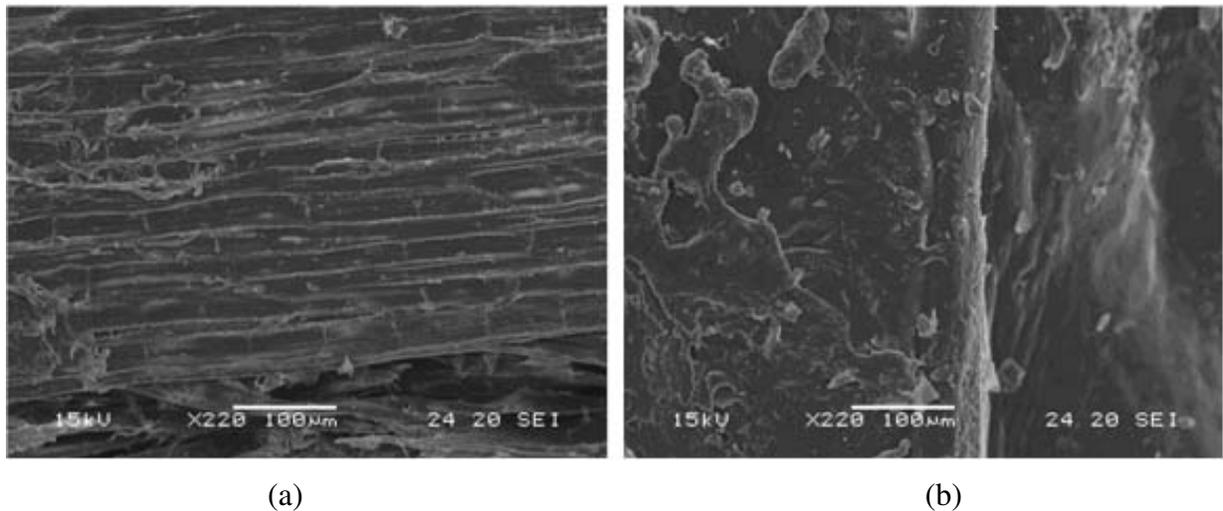


Figura 4.93 - Micrografia (MEV) com ampliação de 220 x das partículas de *Agave sisalana*: (a) partículas sem adição de polímero e (b) partículas com adição de SBR.

Nas Figuras 4.94 a 4.105 estão apresentadas as micrografias dos compósitos com resíduos, com e sem adição dos polímeros. A seqüência apresentada se refere aos compósitos de *Eucalyptus grandis*, *Pinus caribaea*, Casca de arroz e *Agave sisalana* (sisal). As ampliações focaram, em primeira instância, a interface entre os resíduos e a matriz cimentícia. Em vista das dimensões das partículas e dos detalhes desejados utilizou-se uma variação das ampliações numa faixa de 200 x até a ordem de 2500 x. Na figura 4.94 (b) foram observados alguns produtos, provenientes da hidratação do cimento, aderidos em torno da superfície das partículas de *Eucalyptus grandis*.

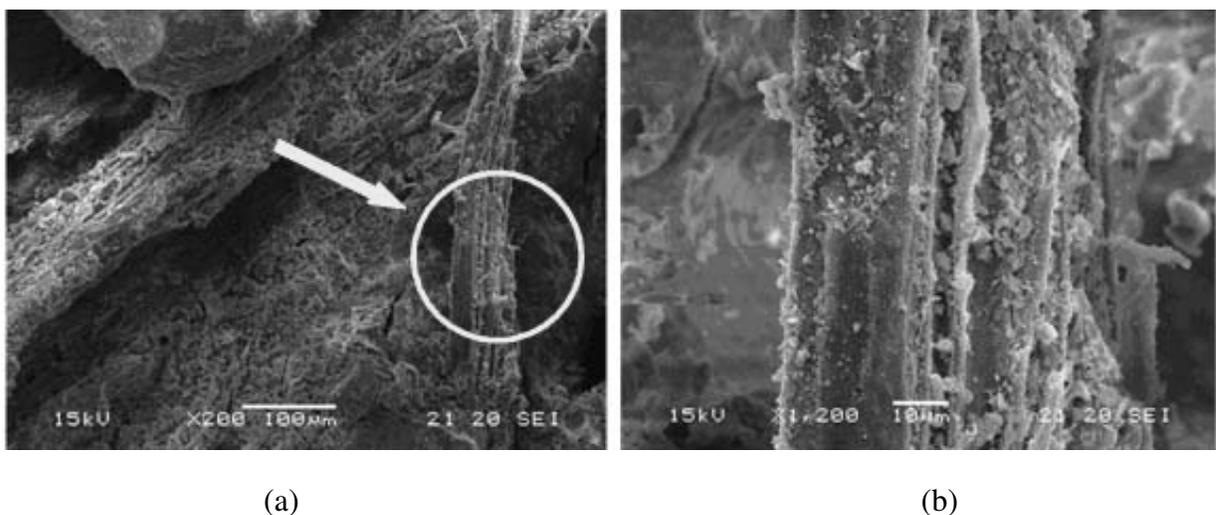


Figura 4.94 - Micrografia (MEV) do compósito de *Eucalyptus grandis* sem adição de polímeros na idade de 133 dias: (a) ampliação de 200 x e (b) ampliação de 1200 x.

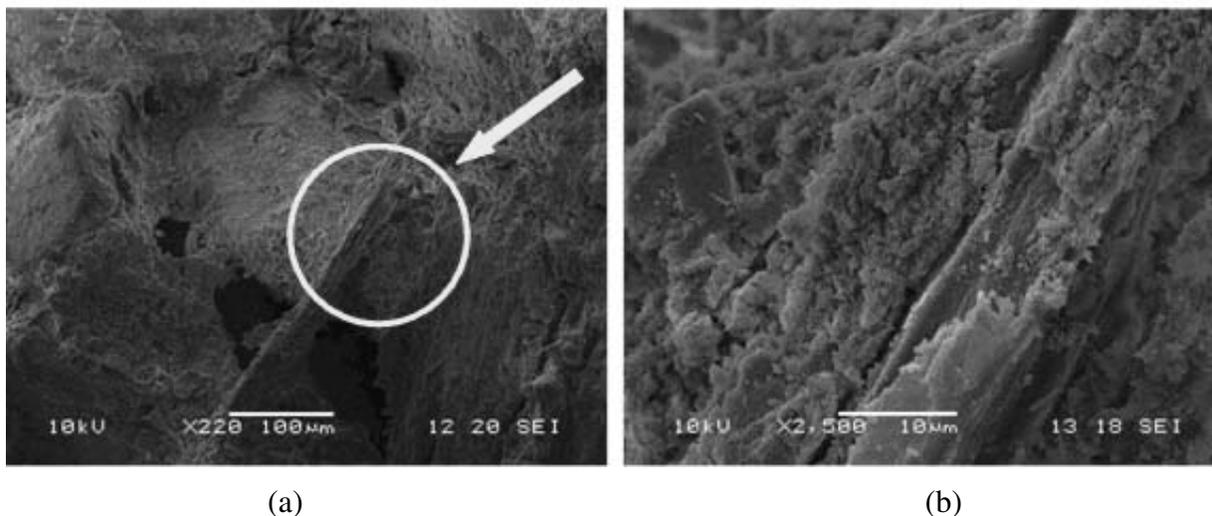


Figura 4.95 - Micrografia (MEV) do compósito de *Eucalyptus grandis* com adição de SBR na idade de 133 dias: (a) ampliação de 220 x e (b) ampliação de 2500 x.

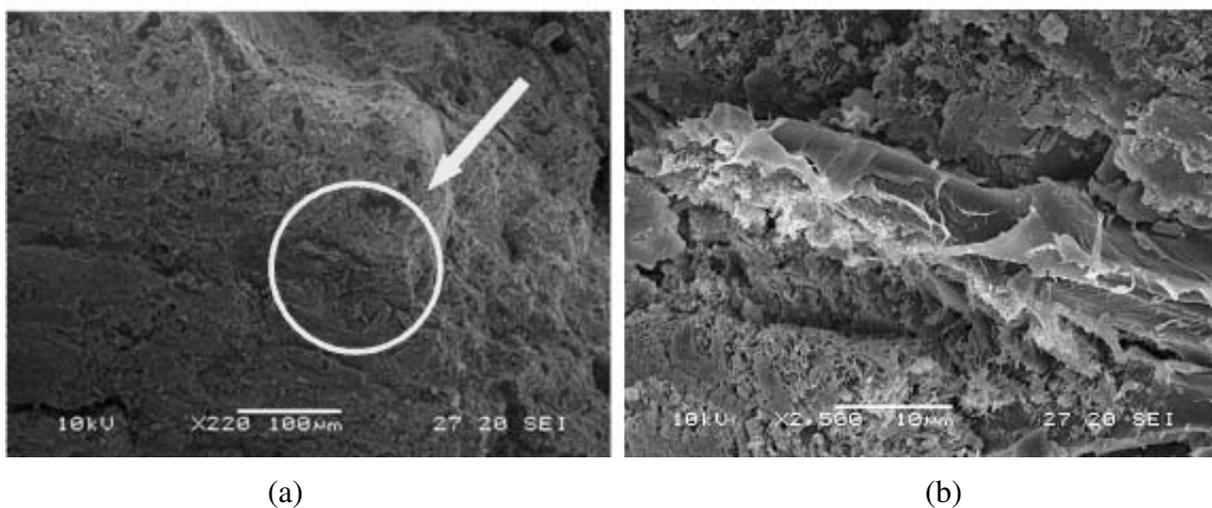


Figura 4.96 - Micrografia (MEV) do compósito de *Eucalyptus grandis* com adição de PAV22 na idade de 138 dias: (a) ampliação de 220 x e (b) ampliação de 2500 x.

Observando-se a formação polimérica nos compósitos de *Eucalyptus grandis*, quando se comparam as Figuras 4.95 (b) e 4.96 (b), fica mais evidente a presença do polímero SBR em contato com as partículas vegetais em relação ao polímero PAV22. As infiltrações provenientes da emulsão polimérica não foram observadas nos poros das partículas, pelo menos nestas micrografias, porém, a área de contato da pasta impregnada com as partículas é bem maior e mais abrangente em relação ao compósito sem adição.

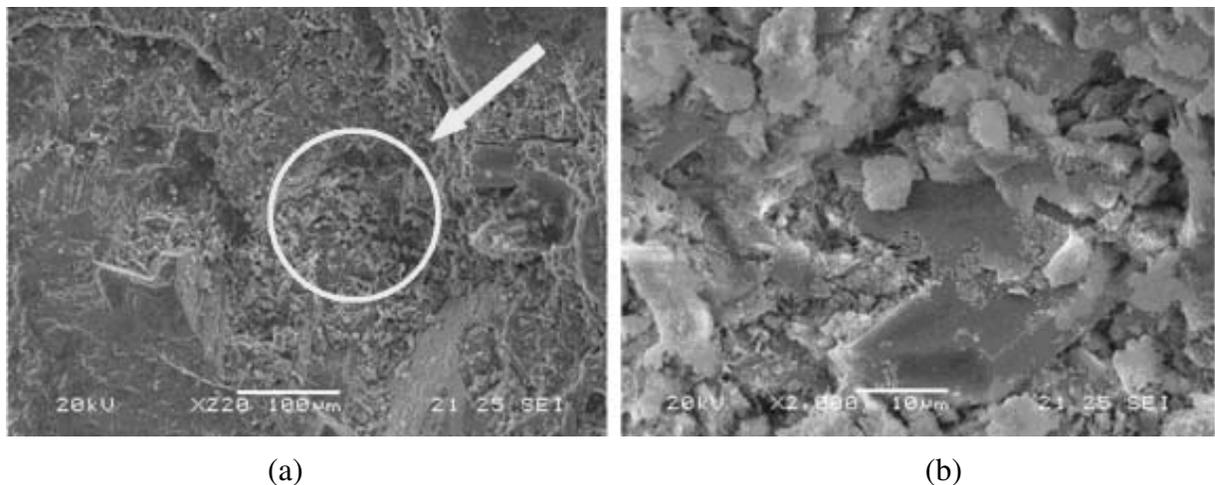


Figura 4.97 - Micrografia (MEV) do compósito de *Pinus caribaea* sem adição de polímeros na idade de 56 dias: (a) ampliação de 220 x e (b) ampliação de 2000 x.

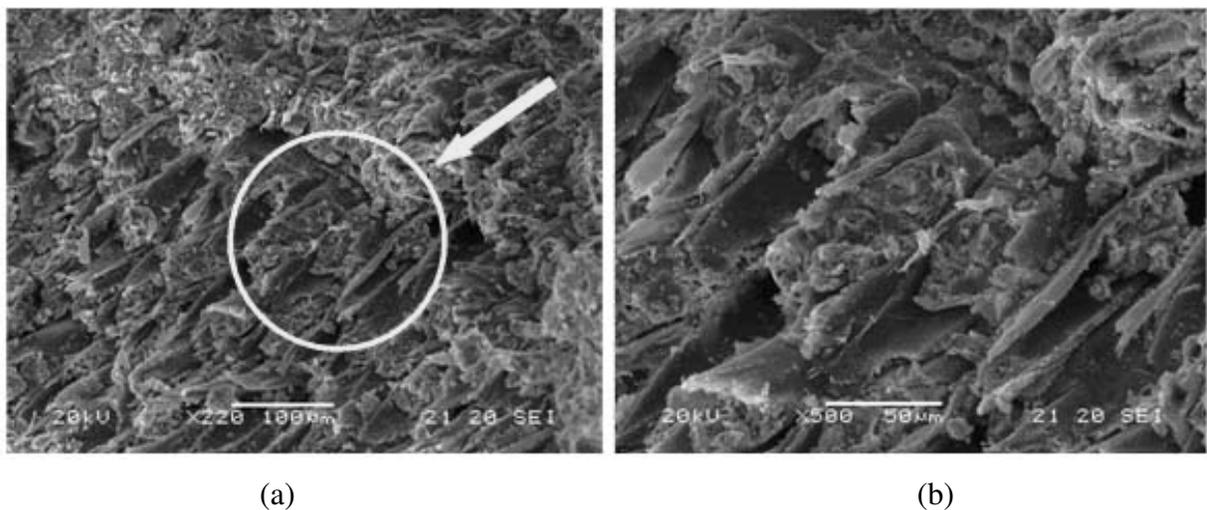


Figura 4.98 - Micrografia (MEV) do compósito de *Pinus caribaea* com adição de SBR, na idade de 56 dias: (a) ampliação de 220 x e (b) ampliação de 500 x.

A formação polimérica também pôde ser observada nas Figuras 4.98 (b) e 4.99 (b) em relação à Figura 4.97 (b), que apresentou as formas bem definidas dos produtos formados, tal como o hidróxido de cálcio (C-H). Pôde ser visto, principalmente na Figura 4.98 (b), a presença do polímero no interior das partículas de *Pinus caribaea* e em torno das mesmas, juntamente com os produtos de hidratação. Pelo fato de estarem preenchidas com a formação polimérica, ao invés dos espaços vazios, é bem provável que, em presença de água ou em contato com ela, não haja inchamento das partículas, como ocorre costumeiramente em compósitos com partículas sem a adição de polímeros à matriz cimentícia.

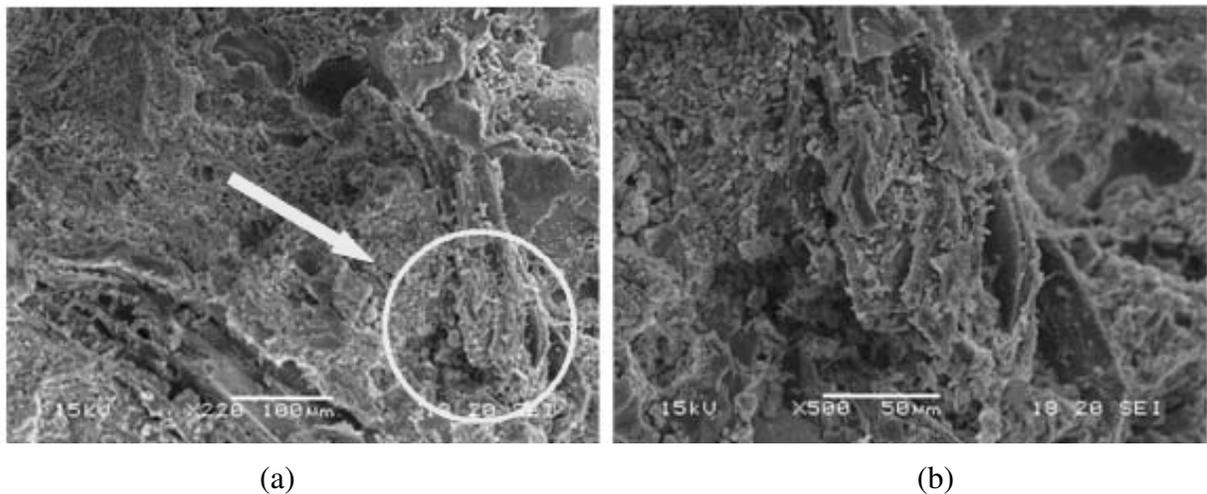


Figura 4.99 - Micrografia (MEV) do compósito de *Pinus caribaea* com adição de PAV22, na idade de 56 dias: (a) ampliação de 220 x e (b) ampliação de 500 x.

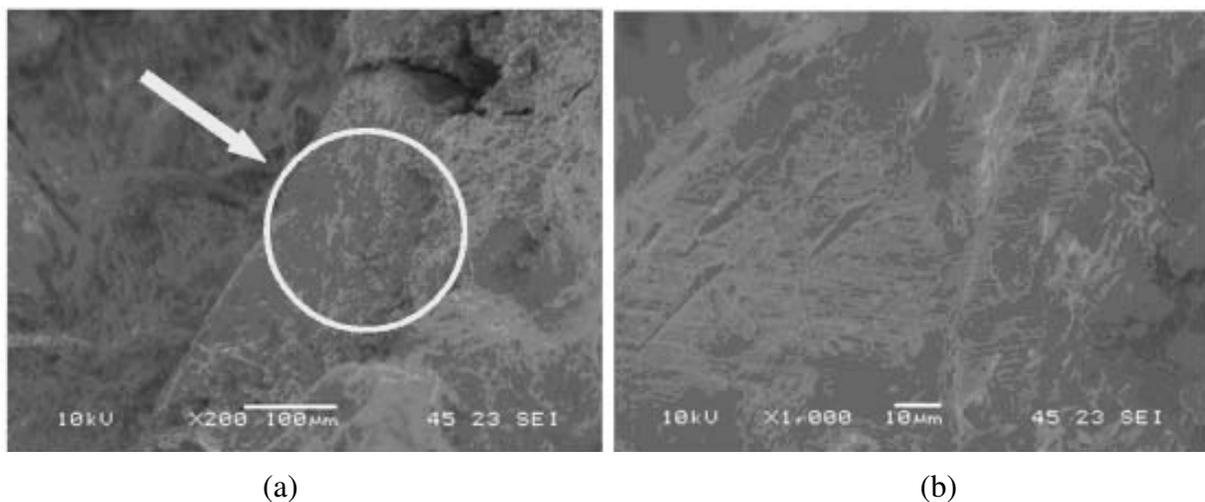


Figura 4.100 - Micrografia (MEV) do compósito de casca de arroz sem adições, na idade de 60 dias: (a) ampliação de 200 x e (b) ampliação de 1000 x.

Nas micrografias dos compósitos de casca de arroz (Figura 4.100) observou-se um bom fechamento da matriz cimentícia com o processo de hidratação, mesmo sem adição de polímeros na mistura. Analogamente, as Figuras 4.101 (b) e 4.102 (b) também apresentaram conformação similar de fechamento da matriz. A microfissura apresentada na Figura 101 (b) mostra certa dificuldade de evolução com maior capacidade de resistência à tração do compósito em vista da adição dos polímeros. De acordo com Ohama (1998), as argamassas e concreto modificados com a adição de polímeros apresentam menores valores para o módulo de elasticidade em relação às argamassas e concretos sem modificação.

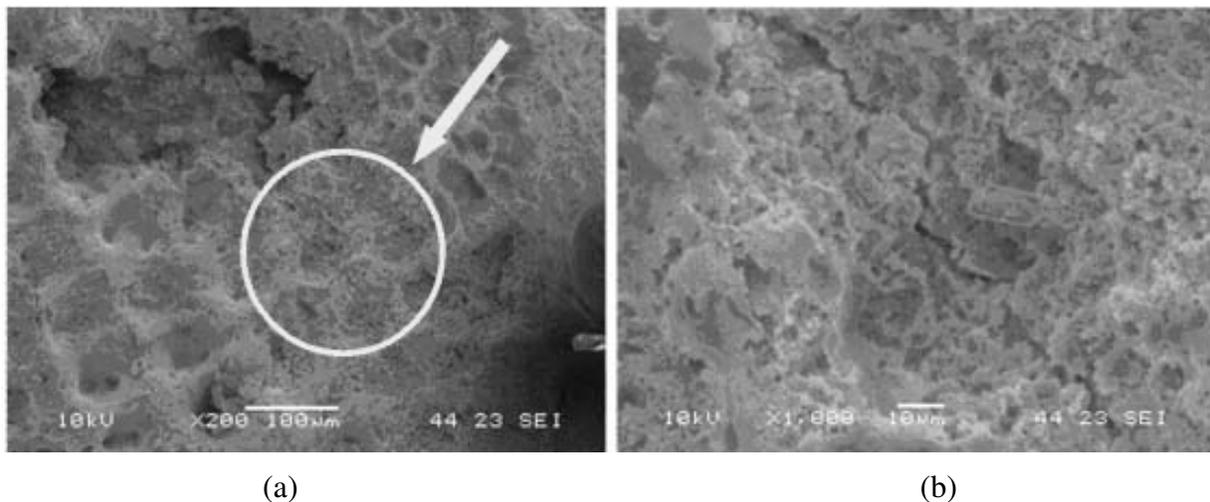


Figura 4.101 - Micrografia (MEV) do compósito de casca de arroz com adição de SBR, na idade de 60 dias: (a) ampliação de 200 x e (b) ampliação de 1000 x.

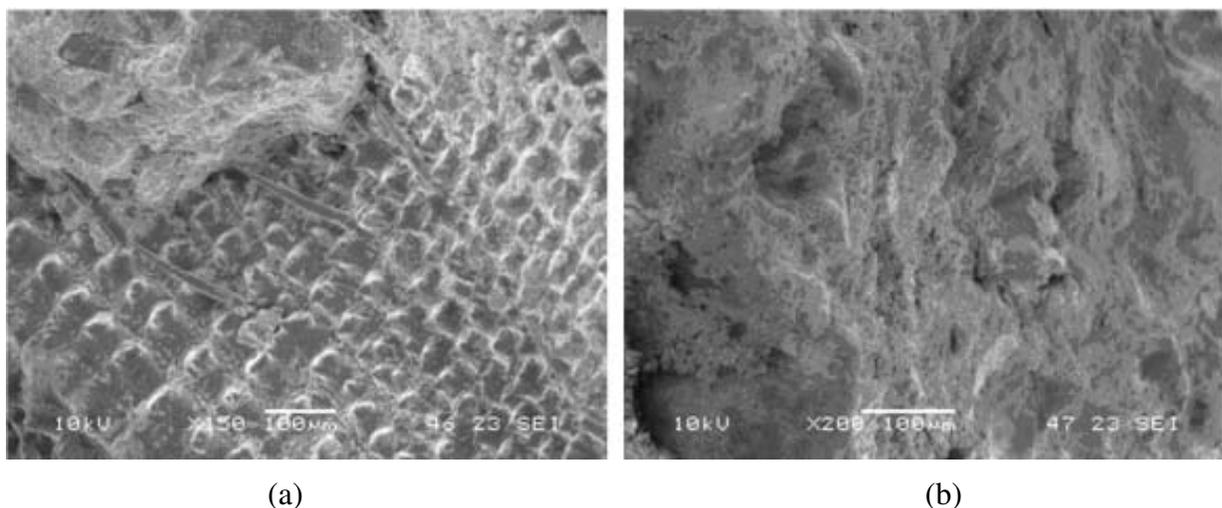


Figura 4.102 - Micrografia (MEV) do compósito de casca de arroz com adição de PAV22, na idade de 60 dias: (a) ampliação de 150 x e (b) ampliação de 200 x.

Os compósitos de *Agave sisalana* (sisal) apresentaram, em comparação aos demais compósitos, uma menor porosidade, o que confirma os maiores resultados obtidos com os ensaios de resistência à compressão. Por intermédio das micrografias adquiridas, observou-se maior homogeneidade da matriz com adição dos polímeros em relação ao compósito sem adição, o que pode ser observado nas Figuras 4.103 (b), 4.104 (b) e 4.105 (b). Na figura 4.105 observou-se, também, a deposição da película polimérica sobre a superfície das fibras de sisal, provenientes da adição de PAV22.

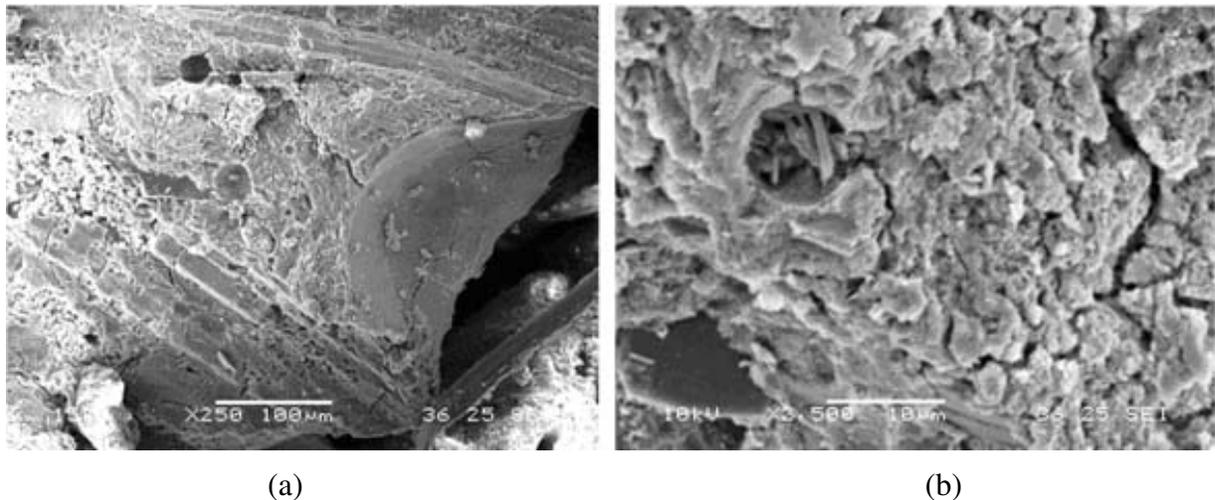


Figura 4.103 - Micrografia (MEV) do compósito de *Agave sisalana* (sisal) sem adições, na idade de 70 dias: (a) ampliação de 250 x e (b) ampliação de 2500 x .

A matriz cimentícia dos compósitos provenientes da espécie *Agave sisalana* (sisal) sem adições de polímeros apresentou microfissuras, de acordo com a Figura 4.103 (b), evidenciando maior rigidez da mistura. Embora as fibras de sisal possuam grande capacidade de resistência à tração, o aproveitamento das fibras curtas em blocos vazados, utilizadas neste trabalho, não se mostrou adequado. A proporção utilizada em relação ao volume do bloco foi relativamente baixa em relação ao teor utilizado dos outros resíduos nos compósitos, em vista da dificuldade da sua homogeneização durante o processo de mistura.

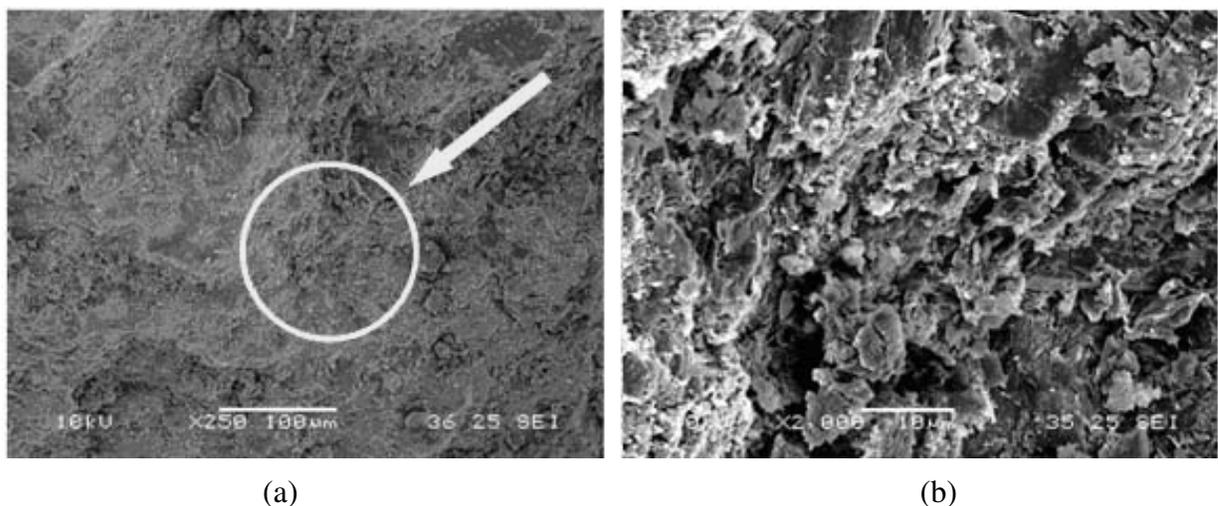


Figura 4.104 - Micrografia (MEV) do compósito de *Agave sisalana* (sisal) com adição de SBR, na idade de 70 dias: (a) ampliação de 250 x e (b) ampliação de 2000 x .

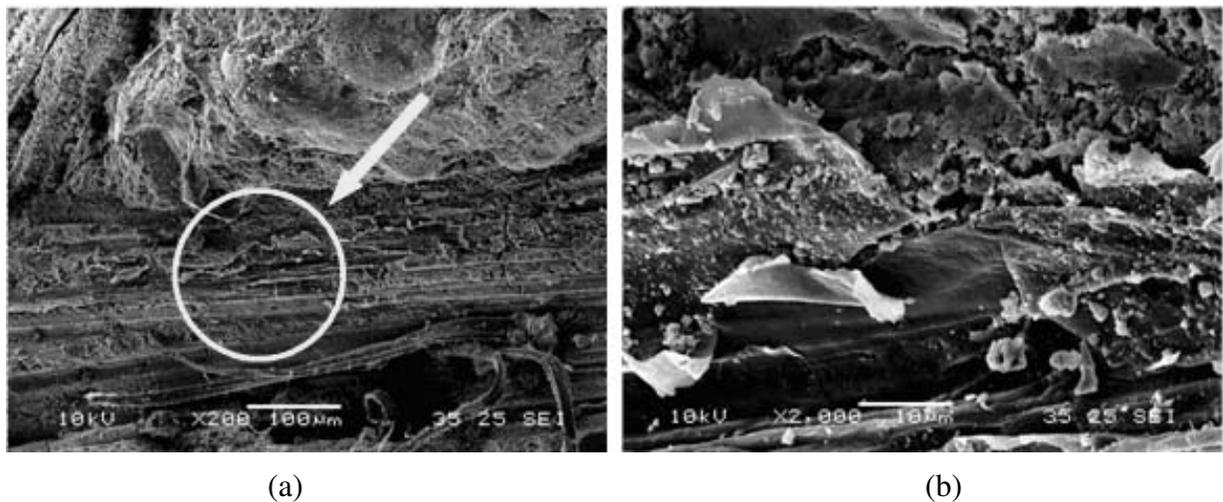


Figura 4.105 - Micrografia (MEV) do compósito de *Agave sisalana* (sisal) com adição de PAV22, na idade de 70 dias: (a) ampliação de 200 x e (b) ampliação de 2000 x.

O procedimento de análise das amostras, dos ensaios de microscopia eletrônica de varredura, não foi diretamente correlacionado às propriedades físicas e mecânicas dos compósitos e, por esta razão, não houve a preocupação de se relacionar as influências decorrentes das idades das amostras com estas propriedades.

4.6 Resultados dos ensaios dos blocos vazados com resíduos vegetais.

4.6.1 Resistência à compressão e absorção de água dos blocos.

Nas Tabelas de 4.55 a 4.58 estão apresentados os valores determinados para resistência à compressão (NBR-7184), para os blocos confeccionados na fábrica, em comparação aos blocos moldados em laboratório. Nas tabelas 4.55 a 4.57 ficou evidente que os valores de resistência à compressão dos blocos moldados em laboratório satisfizeram aos valores mínimos exigidos pela norma dos blocos de vedação no que diz respeito aos valores individuais (2,0 MPa). No caso dos blocos com os resíduos de *Pinus caribaea* não foram satisfeitos nem mesmo os valores individuais. Os mesmos traços para os blocos moldados na fábrica não satisfizeram os parâmetros mínimos de resistência, valores médios e individuais. Os procedimentos de cura foram diferenciados; na fábrica consistiu na cura ao ar com molhamento duas vezes ao dia por três dias consecutivos após a moldagem. Em laboratório os blocos ficaram em câmara úmida por 7 dias e o restante em ambiente de laboratório. Portanto, o processo de cura dos blocos

moldados na fábrica não é um procedimento adequado, em vista dos resultados de resistência à compressão obtidos.

Tabela 4.55 - Resistência à compressão aos 28 dias dos blocos de *Eucalyptus grandis*.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (NBR-7184) - EUCALYPTUS GRANDIS 1:0,36:0,84											
Blocos moldados e curados na fábrica de blocos						Blocos moldados e curados em laboratório					
	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Área (cm ²)	Força de ruptura (kgf)	Compressão (MPa)	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Área (cm ²)	Força de ruptura (kgf)	Compressão (MPa)	
REF	0%	8,8	39	343,2	3000,00	0,89	8,8	39	343,2	7900,00	2,35
		8,8	39	343,2	3400,00	1,01	8,8	39	343,2	9000,00	2,68
		8,8	39	343,2	3100,00	0,92	8,8	39	343,2	8000,00	2,38
SBR	3%	8,8	39	343,2	4000,00	1,19	8,8	39	343,2	9150,00	2,72
		8,8	39	343,2	3800,00	1,13	8,8	39	343,2	8610,00	2,56
		8,8	39	343,2	3900,00	1,16	8,8	39	343,2	8780,00	2,61
PAV22	3%	8,8	39	343,2	3700,00	1,10	8,8	39	343,2	7570,00	2,25
		8,8	39	343,2	4000,00	1,19	8,8	39	343,2	9480,00	2,82
		8,8	39	343,2	4200,00	1,25	8,8	39	343,2	9790,00	2,91

Tabela 4.56 - Resistência à compressão aos 28 dias dos blocos de *Pinus caribaea*.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (NBR-7184) - PINUS CARIBAEA 1:0,36:1,08											
Blocos moldados e curados na fábrica de blocos						Blocos moldados e curados em laboratório					
	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Área (cm ²)	Força de ruptura (kgf)	Compressão (MPa)	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Área (cm ²)	Força de ruptura (kgf)	Compressão (MPa)	
REF	0%	8,8	39	343,2	7400,00	2,20	8,8	39	343,2	8610,00	2,56
		8,8	39	343,2	6900,00	2,05	8,8	39	343,2	7530,00	2,24
		8,8	39	343,2	5000,00	1,49	8,8	39	343,2	7060,00	2,10
SBR	7%	8,8	39	343,2	4800,00	1,43	8,8	39	343,2	5780,00	1,72
		8,8	39	343,2	5200,00	1,55	8,8	39	343,2	6250,00	1,86
		8,8	39	343,2	5000,00	1,49	8,8	39	343,2	6050,00	1,80
PAV22	7%	8,8	39	343,2	4800,00	1,43	8,8	39	343,2	5780,00	1,72
		8,8	39	343,2	5800,00	1,72	8,8	39	343,2	7030,00	2,09
		8,8	39	343,2	5800,00	1,72	8,8	39	343,2	7060,00	2,10

Tabela 4.57 - Resistência à compressão aos 28 dias dos blocos de casca de arroz.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (NBR-7184) - CASCA DE ARROZ 1:0,28:0,65											
Blocos moldados e curados na fábrica de blocos						Blocos moldados e curados em laboratório					
	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Área (cm ²)	Força de ruptura (kgf)	Compressão (MPa)	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Área (cm ²)	Força de ruptura (kgf)	Compressão (MPa)	
REF	0%	8,8	39	343,2	5000,00	1,49	8,8	39	343,2	7100,00	2,11
		8,8	39	343,2	4800,00	1,43	8,8	39	343,2	6900,00	2,05
		8,8	39	343,2	5000,00	1,49	8,8	39	343,2	7000,00	2,08
SBR	9%	8,8	39	343,2	6200,00	1,84	8,8	39	343,2	8610,00	2,56
		8,8	39	343,2	6200,00	1,84	8,8	39	343,2	8610,00	2,56
		8,8	39	343,2	5000,00	1,49	8,8	39	343,2	6962,00	2,07
PAV22	5%	8,8	39	343,2	5600,00	1,67	8,8	39	343,2	7063,00	2,10
		8,8	39	343,2	4900,00	1,46	8,8	39	343,2	6827,00	2,03
		8,8	39	343,2	6400,00	1,90	8,8	39	343,2	8845,00	2,63

Na Tabela 4.58, onde estão apresentados os valores de resistência à compressão referente aos blocos com resíduos provenientes da espécie *Agave sisalana* (sisal), os resultados obtidos foram bem acima dos valores mínimos fixados pela norma técnica de blocos de vedação (2,0 MPa mínimo individual e 2,5 MPa média mínima). Em vista do baixo teor de resíduo presente na mistura, ou seja, 8% em relação ao teor de cimento, não teve importância o procedimento de cura praticado para a obtenção das resistências mínimas. A quantidade de resíduo adicionado à mistura foi o máximo teor conseguido, considerando-se a dificuldade encontrada no processo de mistura, visto que, na betoneira convencional os resíduos de sisal tendem a não se misturar com o restante dos componentes. Considerando-se os resíduos utilizados, é importante que seja relatado que o consumo de cimento foi relativamente baixo em comparação aos blocos de cimento sem resíduos.

Blocos c/ resíduos	<i>Eucalyptus grandis</i>	<i>Pinus caribaea</i>	<i>Casca</i>	<i>Sisal</i>
consumo de cimento	241 kg/m ³	241 kg/m ³	268 kg/m ³	354 kg/m ³

Tabela 4.58 - Resistência à compressão aos 28 dias dos blocos de *Agave sisalana* (sisal).

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (NBR-7184) - AGAVE SISALANA 1:0,08:0,60						
<i>Blocos moldados e curados na fábrica de blocos</i>						
<i>Compósito</i>	<i>Teor</i>	<i>Largura (cm)</i>	<i>Comprimento (cm)</i>	<i>Área (cm²)</i>	<i>Força de ruptura (kgf)</i>	<i>Compressão (MPa)</i>
REF	0%	8,8	39	343,2	32000	9,51
		8,8	39	343,2	32800	9,75
		8,8	39	343,2	29200	8,68
SBR	5%	8,8	39	343,2	19800	5,89
		8,8	39	343,2	17500	5,20
		8,8	39	343,2	27600	8,21
PAV22	9%	8,8	39	343,2	15200	4,52
		8,8	39	343,2	17800	5,29
		8,8	39	343,2	22400	6,66

Nas Tabelas de 4.59 a 4.62 estão apresentados os valores determinados da absorção de água, do teor de umidade e da área líquida, de acordo com a norma NBR-12118, para os blocos confeccionados na fábrica de pré-moldados e, analogamente, em comparação aos blocos moldados nas instalações do laboratório. Nas Tabelas de 4.59 a 4.61 observou-se uma diferença significativa dos valores de absorção dos blocos moldados na fábrica em relação aos blocos moldados em laboratório, evidenciando novamente a importância do procedimento de cura.

Tabela 4.59 - Absorção de água, teor de umidade e área líquida - *Eucalyptus grandis*.

ABSORÇÃO, UMIDADE E ÁREA LÍQUIDA (NBR-12118) - EUCALYPTUS GRANDIS 1:0,36:0,84											
		Massa com umidade natural m_3 (g)	Densidade (kg/m^3)	Massa seca m_1 (g)	Massa saturada m_2 (g)	Massa aparente m_4 (g)	Umidade u (%)	Absorção a (%)	Área líquida $Aliq$ (cm^2)	Altura h (mm)	
Moldados na fábrica	REF	0%	6840	1708	6600	7660	22,64	16,06	178,29	190,0	
			5720	1444	5580	6400	3352,50	17,07	14,70	159,55	190,0
			6580	1646	6360	7380	4014,90	21,57	16,04	178,05	191,0
	SBR	3%	5860	1475	5700	6780	3411,50	14,81	18,95	176,36	190,0
			5860	1454	5620	6760	3459,40	21,05	20,28	173,72	190,0
			5720	1423	5500	6600	3402,10	20,00	20,00	170,10	190,0
	PAV22	3%	5980	1496	5780	6760	3485,30	20,41	16,96	171,45	191,0
			6040	1527	5900	6900	3441,50	14,00	16,95	181,07	190,0
			5840	1465	5660	6720	3374,50	16,98	18,73	175,16	190,0
Moldados em laboratório	REF	0%	5470	1374	5310	5950	3391,50	25,00	12,05	134,66	190,0
			5350	1351	5220	5810	3311,70	22,03	11,30	130,80	190,0
			5430	1359	5250	5860	3340,20	29,51	11,62	133,32	191,0
	SBR	3%	6020	1537	5940	6720	3830,40	10,26	13,13	151,29	190,0
			5780	1473	5690	6410	3653,70	12,50	12,65	145,07	190,0
			5720	1460	5640	6350	3619,50	11,27	12,59	145,24	190,0
	PAV22	3%	6150	1573	6080	6820	3887,40	9,46	12,17	153,54	191,0
			6110	1558	6020	6780	3864,60	11,84	12,62	152,64	190,0
			6210	1586	6130	6880	3921,60	10,67	12,23	154,89	190,0

Tabela 4.60 - Absorção de água, teor de umidade e área líquida - *Pinus caribaea*.

ABSORÇÃO, UMIDADE E ÁREA LÍQUIDA (NBR-12118) - PINUS CARIBAEA 1:0,36:1,08											
		Massa com umidade natural m_3 (g)	Densidade (kg/m^3)	Massa seca m_1 (g)	Massa saturada m_2 (g)	Massa aparente m_4 (g)	Umidade u (%)	Absorção a (%)	Área líquida $Aliq$ (cm^2)	Altura h (mm)	
Moldados na fábrica	REF	0%	6460	1641	6340	7460	3356,80	10,71	17,67	214,83	188,0
			6480	1630	6300	7400	3323,70	16,36	17,46	214,54	190,0
			5920	1501	5800	6880	3004,00	11,11	18,62	202,93	190,0
	SBR	7%	6240	1584	6120	7280	3340,50	10,34	18,95	206,26	190,0
			6120	1542	5960	7100	3126,20	14,04	19,13	208,05	190,0
			6160	1563	6040	7240	3196,00	10,00	19,87	211,73	190,0
	PAV22	7%	6020	1517	5860	6980	3028,10	14,29	19,11	207,99	190,0
			6140	1527	5900	7160	3121,90	19,05	21,36	212,53	189,0
			5820	1439	5560	6840	2928,60	20,31	23,02	205,86	188,0
Moldados em laboratório	REF	0%	6050	1542	5960	6760	3853,20	11,25	13,42	152,19	188,0
			5860	1493	5770	6580	3750,60	11,11	14,04	148,92	190,0
			5980	1524	5890	6670	3801,90	11,54	13,24	150,16	190,0
	SBR	7%	6280	1597	6170	7170	4132,50	11,00	16,21	159,03	190,0
			6230	1592	6150	7180	4149,60	7,77	16,75	158,66	190,0
			6150	1563	6040	6990	3927,30	11,58	15,73	160,35	190,0
	PAV22	7%	6160	1573	6080	7010	3995,70	8,60	15,30	158,65	190,0
			6220	1581	6110	7120	4058,40	10,89	16,53	161,14	189,0
			6210	1576	6090	7200	4104,00	10,81	18,23	162,95	188,0

Tabela 4.61 - Absorção de água, teor de umidade e área líquida - casca de arroz.

ABSORÇÃO, UMIDADE E ÁREA LÍQUIDA (NBR-12118) - CASCA DE ARROZ 1:0,28:0,65											
		Massa com umidade natural m_3 (g)	Densidade (kg/m^3)	Massa seca m_1 (g)	Massa saturada m_2 (g)	Massa aparente m_4 (g)	Umidade u (%)	Absorção a (%)	Área líquida $Aliq$ (cm^2)	Altura h (mm)	
Moldados na fábrica	REF	0%	6640	1630	6300	7280	3562,90	34,69	15,56	195,64	190,0
			6600	1610	6220	7220	3527,50	38,00	16,08	194,34	191,0
			6360	1615	6240	7160	3500,20	13,04	14,74	192,62	189,3
	SBR	9%	6400	1636	6320	7240	3896,10	8,70	14,56	175,99	191,0
			6960	1698	6560	7540	3739,80	40,82	14,94	200,01	190,0
			6560	1594	6160	7120	3519,90	41,67	15,58	189,48	188,0
	PAV22	5%	6500	1651	6380	7360	3545,90	12,24	15,36	199,69	191,0
			6760	1667	6440	7360	3557,60	34,78	14,29	200,13	191,0
			6860	1703	6580	7440	3589,60	32,56	13,07	202,65	191,0
Moldados em laboratório	REF	0%	6180	1568	6060	6950	3961,50	13,48	14,69	157,29	190,0
			6220	1592	6150	6980	3978,60	8,43	13,50	157,97	191,0
			6340	1617	6250	7180	4164,40	9,68	14,88	158,72	189,3
	SBR	9%	6580	1674	6470	7340	4183,80	12,64	13,45	166,12	191,0
			6610	1687	6520	7360	4195,20	10,71	12,88	166,57	190,0
			6550	1667	6440	7190	4098,30	14,67	11,65	162,72	188,0
	PAV22	5%	6450	1646	6360	7140	4069,80	11,54	12,26	160,74	191,0
			6530	1659	6410	7180	4092,60	15,58	12,01	162,49	191,0
			6590	1674	6470	7210	4109,70	16,22	11,44	163,17	191,0

Na tabela 4.62, referente aos blocos com resíduos provenientes da espécie *Agave sisalana* (sisal), os resultados obtidos se mantiveram numa faixa de valores abaixo dos valores máximos fixados pela norma técnica de blocos de vedação (15% mínimo individual e 10% média mínima). O baixo teor de resíduos utilizado (8% em massa) acabou produzindo um bloco com características similares àqueles dos blocos convencionais.

Tabela 4.62 - Absorção de água, teor de umidade e área líquida - *Agave sisalana* (sisal).

ABSORÇÃO, UMIDADE E ÁREA LÍQUIDA (NBR-12118) - AGAVE SISALANA 1:0,08:0,60											
		Massa com umidade natural m_3 (g)	Densidade (kg/m^3)	Massa seca m_1 (g)	Massa saturada m_2 (g)	Massa aparente m_4 (g)	Umidade u (%)	Absorção a (%)	Área líquida $Aliq$ (cm^2)	Altura h (mm)	
Moldados na fábrica	REF	0%	9510	2402	9280	9840	5640,00	41,07	6,03	223,40	191,0
			9260	2360	9120	9640	5560,00	26,92	5,70	214,74	190,0
			9080	2283	8820	9580	5360,00	34,21	8,62	222,11	191,0
	SBR	5%	8710	2210	8540	9220	5280,00	25,00	7,96	207,37	191,0
			9270	2345	9060	9620	5520,00	37,50	6,18	215,79	191,0
			8180	2065	7980	8700	4820,00	27,78	9,02	204,21	191,0
	PAV22	9%	8350	2122	8200	8980	5100,00	19,23	9,51	204,21	190,0
			7110	1801	6960	7720	4260,00	19,74	10,92	183,07	190,0
			8120	2060	7960	8660	4880,00	22,86	8,79	201,06	190,0

4.6.2 Velocidade do pulso ultra-sônico (VPU) através dos blocos.

Os resultados dos ensaios de medição da velocidade do pulso ultra-sônico (VPU) estão apresentados a seguir, considerando-se 3 direções possíveis de medição da propagação da onda (longitudinal, transversal e perpendicular). A Figura 4.106 apresenta um esquema da medição da VPU na direção longitudinal e os resultados estão apresentados nas Tabelas 4.63 a 4.66 e nas Figuras 4.107 a 4.110.

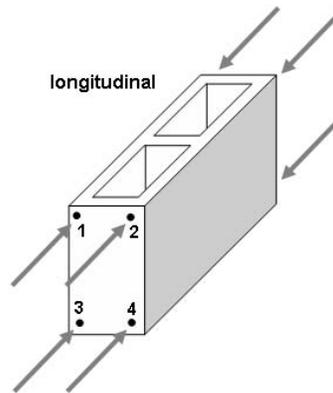


Figura 4.106 - Medição da VPU na direção longitudinal do bloco.

Tabela 4.63 - VPU longitudinal do bloco de *Eucalyptus grandis*.

VPU EM BLOCOS (km/s) - EUCALYPTUS GRANDIS traço: 1:0,36:0,84												
Pontos	0%				3% SBR				3% PAV			
	C1	C2	C3	Média	C1	C2	C3	Média	C1	C2	C3	Média
1	1,69	1,68	1,69	1,69	1,54	1,72	1,69	1,65	1,59	1,61	1,74	1,65
2	1,86	1,66	1,59	1,71	1,74	1,64	1,71	1,70	1,69	1,66	1,79	1,71
3	2,09	2,31	2,31	2,24	2,11	2,14	2,17	2,14	2,36	2,31	2,50	2,39
4	2,26	2,32	2,40	2,33	2,10	2,10	2,21	2,14	2,36	2,33	2,48	2,39

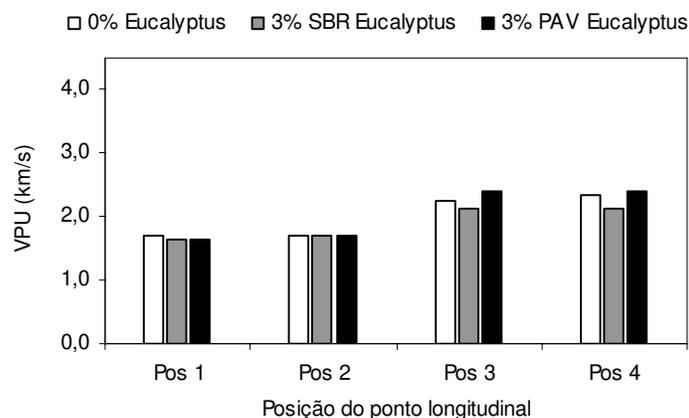


Figura 4.107 - VPU longitudinal do bloco de *Eucalyptus grandis*.

Tabela 4.64 - VPU longitudinal do bloco de *Pinus caribaea*.

VPU EM BLOCOS (km/s) - PINUS CARIBAEA traço: 1:0,36:1,08

Pontos	0%				7% SBR				7% PAV			
	C1	C2	C3	Média	C1	C2	C3	Média	C1	C2	C3	Média
1	2,01	2,10	1,67	1,93	1,76	1,77	1,83	1,79	1,75	1,69	1,72	1,72
2	2,09	2,06	1,75	1,96	1,61	1,82	1,86	1,77	1,74	1,79	1,75	1,76
3	2,21	2,17	1,96	2,11	1,77	1,76	1,88	1,81	1,93	1,89	1,90	1,90
4	2,14	2,22	1,95	2,11	1,55	1,74	1,76	1,68	1,86	1,94	1,89	1,90

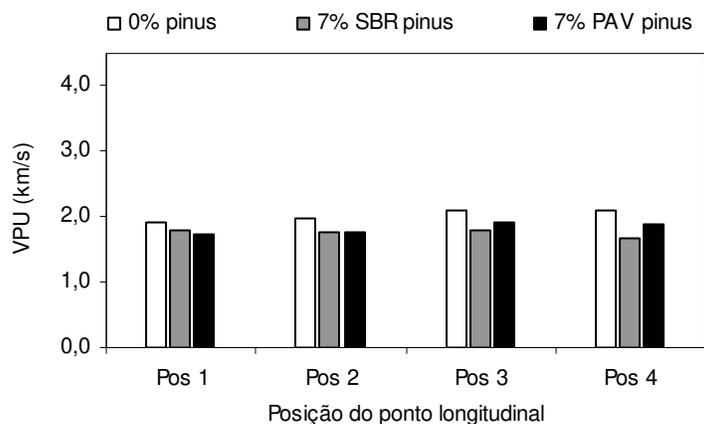
Figura 4.108 - VPU longitudinal do bloco de *Pinus caribaea*.

Tabela 4.65 - VPU longitudinal do bloco de casca de arroz.

VPU EM BLOCOS (km/s) - CASCA DE ARROZ traço: 1:0,28:0,65

Pontos	0%				9% SBR				5% PAV			
	C1	C2	C3	Média	C1	C2	C3	Média	C1	C2	C3	Média
1	2,37	2,32	2,29	2,33	2,65	2,46	2,21	2,44	2,40	2,44	2,53	2,46
2	2,22	2,32	2,47	2,34	2,45	2,45	2,30	2,40	2,37	2,26	2,51	2,38
3	2,86	2,91	2,83	2,87	3,06	2,96	2,88	2,97	2,88	2,81	2,91	2,87
4	2,90	2,91	2,89	2,90	3,08	2,78	2,85	2,90	2,81	2,84	2,97	2,87

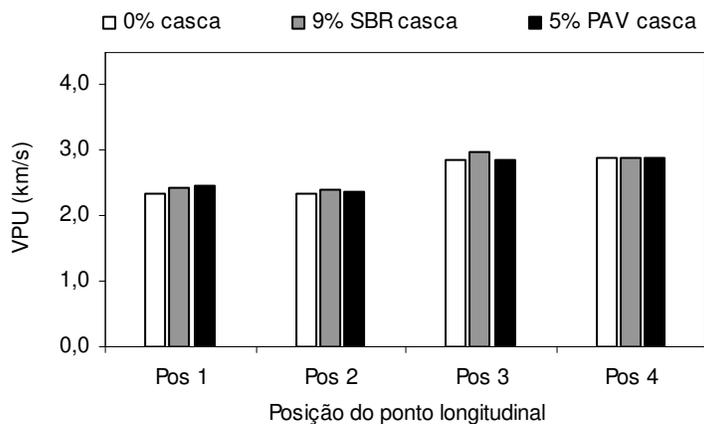
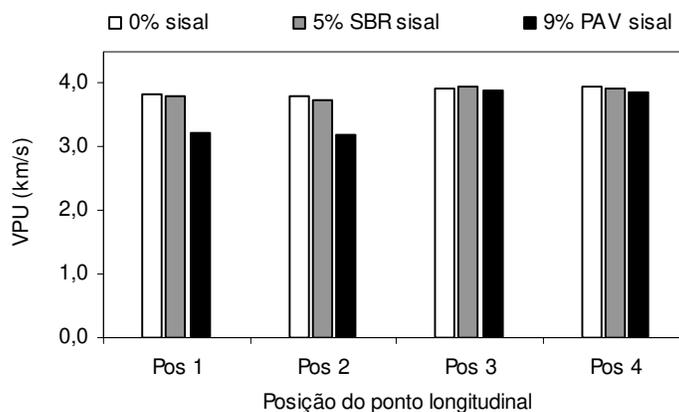


Figura 4.109 - VPU longitudinal do bloco de casca de arroz.

Tabela 4.66 - VPU longitudinal do bloco de *Agave sisalana*.

VELOCIDADE DO PULSO ULTRA-SÔNICO EM BLOCOS (km/s) - AGAVE SISALANA traço: 1:0,08:0,60													
Pontos	0%				5% SBR				9% PAV				
	C1	C2	C3	Média	C1	C2	C3	Média	C1	C2	C3	Média	
1	3,89	3,70	3,89	3,83	3,69	3,87	3,83	3,79	2,90	3,42	3,32	3,21	
2	3,89	3,83	3,70	3,81	3,46	3,90	3,82	3,73	3,23	3,05	3,26	3,18	
3	3,89	3,97	3,92	3,93	4,02	3,93	3,87	3,94	3,82	3,94	3,91	3,89	
4	4,02	3,94	3,94	3,97	3,93	3,93	3,88	3,91	3,90	3,79	3,89	3,86	

Figura 4.110 - VPU longitudinal do bloco de *Agave sisalana*.

Nos blocos confeccionados com *Eucalyptus grandis* e casca de arroz ocorreram diferenças dos valores de VPU entre as posições 1 e 2 (parte superior do bloco) e as posições 3 e 4 (parte inferior do bloco) com os maiores valores correspondendo à parte inferior dos blocos, para a mesma idade (7 dias). Os maiores valores de VPU na parte inferior dos blocos podem ser atribuídos à posição dos blocos durante o procedimento de cura que acabou favorecendo maior concentração de umidade (Figuras 4.121 e 4.122) e menor porosidade em relação à parte superior, mesmo considerando que o processo de compactação do equipamento foi realizado de cima para baixo. Para os blocos de *Pinus caribaea* e *Agave sisalana*, praticamente, não houve diferença significativa. Sob o ponto de vista dos valores da VPU, a medição longitudinal apresentou maiores valores para os blocos de *Agave sisalana* correspondendo em média, aproximadamente, a 3,75 km/s. Os menores valores de VPU foram obtidos com os blocos de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* correspondendo em média, aproximadamente, a 1,97 km/s e 1,87 km/s, respectivamente. A medição dos blocos de casca de arroz correspondeu em média, aproximadamente, a 2,64 km/s. A adição dos polímeros não teve influência significativa nos resultados da VPU, porém, foi observada uma redução da velocidade com a adição de 9% de PAV22 (acetato-versatato), especificamente nos pontos de medição correspondentes às

posições 1 e 2 localizados na face dos blocos vazados, ou seja, na parte superior dos mesmos. A Figura 4.111 apresenta um esquema da medição da velocidade do pulso ultra-sônico na direção transversal, aferindo o endurecimento das paredes transversais dos blocos em uma dada idade específica. Os resultados das medições da VPU estão apresentados nas Tabelas 4.67 a 4.70 e nas Figuras 4.112 a 4.115.

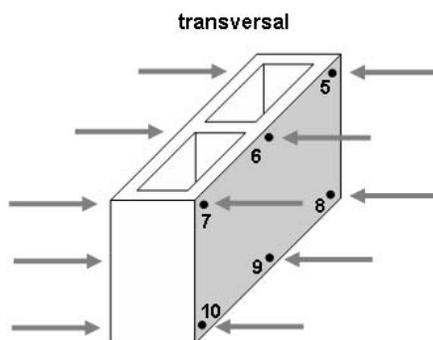


Figura 4.111 - Medição da VPU na direção transversal do bloco.

Tabela 4.67 - VPU transversal do bloco de *Eucalyptus grandis*.

VPU EM BLOCOS (km/s) - <i>EUCALYPTUS GRANDIS</i> traço: 1:0,36:0,84												
Pontos	0%				3% SBR				3% PAV			
	C1	C2	C3	Média	C1	C2	C3	Média	C1	C2	C3	Média
5	1,83	1,71	1,75	1,76	1,56	1,65	1,50	1,57	1,55	1,50	1,56	1,54
6	1,74	1,75	1,54	1,68	1,66	1,70	1,82	1,73	1,58	1,59	1,80	1,65
7	1,45	1,71	1,41	1,52	1,72	1,88	1,82	1,80	1,83	1,83	2,13	1,93
8	2,85	3,11	2,72	2,89	2,43	2,05	2,13	2,20	2,51	2,46	2,54	2,50
9	2,16	2,47	2,47	2,36	2,39	2,40	2,41	2,40	2,59	2,62	2,70	2,64
10	2,33	2,49	2,45	2,42	2,64	2,52	2,51	2,56	2,56	2,51	2,74	2,60

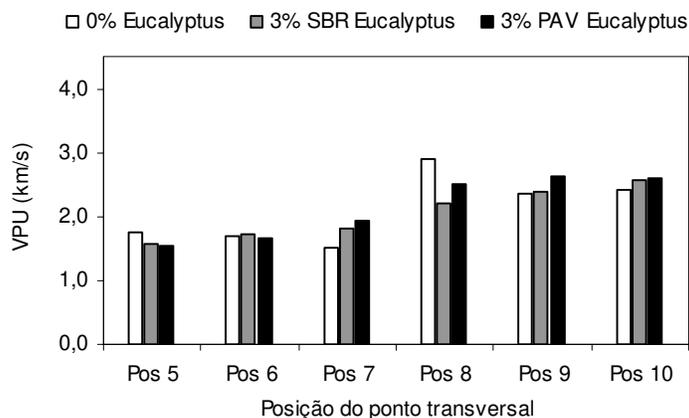


Figura 4.112 - VPU transversal do bloco de *Eucalyptus grandis*.

Tabela 4.68 - VPU transversal do bloco de *Pinus caribaea*.

VPU EM BLOCOS (km/s) - PINUS CARIBAEA traço: 1:0,36:1,08

Pontos	0%				7% SBR				7% PAV			
	C1	C2	C3	Média	C1	C2	C3	Média	C1	C2	C3	Média
5	2,29	2,07	1,71	2,02	1,80	1,83	2,06	1,90	1,84	2,01	2,09	1,98
6	2,12	2,24	1,67	2,01	1,70	1,84	1,91	1,82	1,76	1,88	1,79	1,81
7	1,94	2,01	1,82	1,93	1,70	1,81	1,64	1,72	1,61	1,71	1,46	1,60
8	2,49	2,51	2,24	2,41	2,12	2,13	2,24	2,16	2,31	2,24	2,23	2,26
9	2,47	2,45	2,13	2,35	1,91	2,01	2,07	2,00	2,03	2,11	2,15	2,10
10	2,34	2,38	2,31	2,35	2,06	2,20	2,23	2,16	2,06	2,18	2,15	2,13

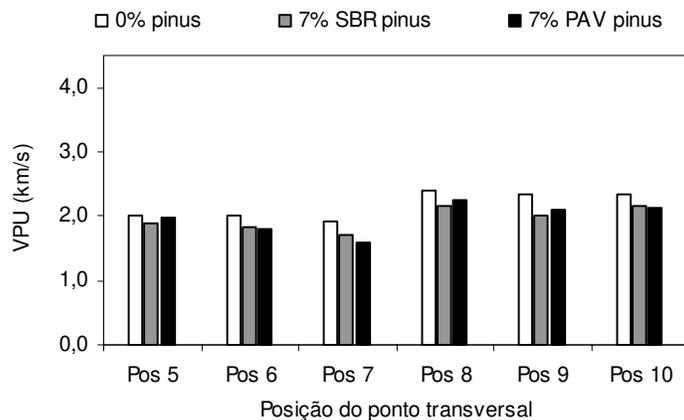
Figura 4.113 - VPU transversal do bloco de *Pinus caribaea*.

Tabela 4.69 - VPU transversal do bloco de casca de arroz.

VPU EM BLOCOS (km/s) - CASCA DE ARROZ traço: 1:0,28:0,65

Pontos	0%				9% SBR				5% PAV			
	C1	C2	C3	Média	C1	C2	C3	Média	C1	C2	C3	Média
5	2,29	2,09	2,29	2,22	2,86	2,54	2,41	2,60	2,39	2,41	2,57	2,46
6	2,44	2,30	2,45	2,40	2,79	2,66	2,41	2,62	2,41	2,29	2,88	2,52
7	2,47	2,70	2,46	2,54	2,75	2,34	2,22	2,44	2,29	2,31	2,37	2,32
8	3,04	3,03	3,08	3,05	3,54	3,33	3,17	3,35	3,03	3,11	3,14	3,09
9	3,09	3,11	3,03	3,08	3,17	3,05	3,11	3,11	3,07	2,95	3,21	3,08
10	3,14	3,23	3,27	3,21	3,21	3,19	3,07	3,16	3,10	3,03	3,32	3,15

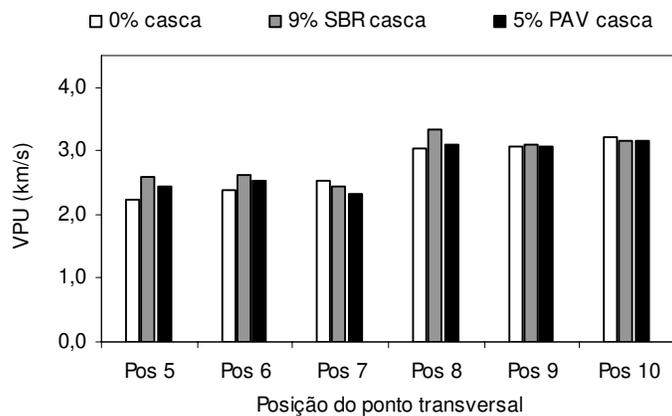
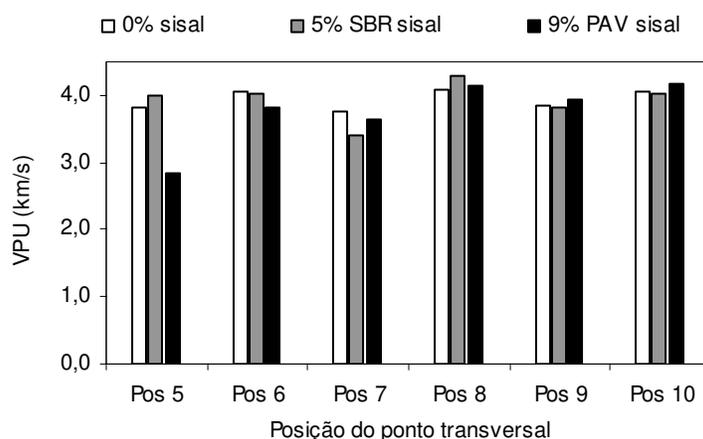


Figura 4.114 - VPU transversal do bloco de casca de arroz.

Tabela 4.70 - VPU transversal do bloco de *Agave sisalana*.

VPU (km/s) - AGAVE SISALANA traço: 1:0,08:0,60												
Pontos	0%				5% SBR				9% PAV			
	C1	C2	C3	Média	C1	C2	C3	Média	C1	C2	C3	Média
5	3,90	3,73	3,83	3,82	4,00	4,11	3,91	4,01	3,03	2,80	2,72	2,85
6	4,09	3,95	4,11	4,05	4,00	4,00	4,11	4,04	3,73	3,78	3,95	3,82
7	3,90	3,57	3,78	3,75	3,14	3,61	3,47	3,41	3,26	3,77	3,90	3,64
8	4,07	4,39	3,81	4,09	4,35	4,37	4,19	4,30	4,15	4,09	4,19	4,14
9	3,73	4,07	3,73	3,85	3,47	4,00	4,00	3,82	4,09	3,75	3,98	3,94
10	3,96	3,86	4,33	4,05	4,00	3,95	4,11	4,02	4,15	4,21	4,21	4,19

Figura 4.115 - VPU transversal do bloco de *Agave sisalana*.

De modo análogo ao ocorrido anteriormente, os blocos confeccionados com *Eucalyptus grandis* e casca de arroz apresentaram diferenças dos valores de VPU entre as posições 5, 6 e 7 (parte superior do bloco) e as posições 8, 9 e 10 (parte inferior do bloco), com os maiores valores correspondendo à parte inferior dos blocos, para a mesma idade (7 dias). Analogamente ao ocorrido aos blocos anteriores os maiores valores de VPU da parte inferior que podem ser atribuídos à concentração de umidade na parte inferior (Figuras 4.121 e 4.122). Para os blocos de *Pinus caribaea* e *Agave sisalana*, praticamente, também não houve diferença significativa. Os resultados da VPU proveniente da medição na direção longitudinal apresentaram maiores valores para os blocos de *Agave sisalana* correspondendo em média, aproximadamente, a 3,88 km/s. Os menores valores de VPU foram obtidos com os blocos de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* correspondendo, em média, aproximadamente, a 2,10 km/s e 2,04 km/s, respectivamente. A medição dos blocos de casca de arroz correspondeu em média, aproximadamente, a 2,80 km/s. A adição dos polímeros não teve influência significativa nos resultados da VPU.

A Figura 4.116 apresenta um esquema da medição da velocidade do pulso ultra-sônico na direção perpendicular, aferindo o endurecimento das paredes longitudinais dos blocos em uma dada idade específica. Os resultados das medições da VPU estão apresentados nas Tabelas 4.71 a 4.74 e nas Figuras 4.117 a 4.120.

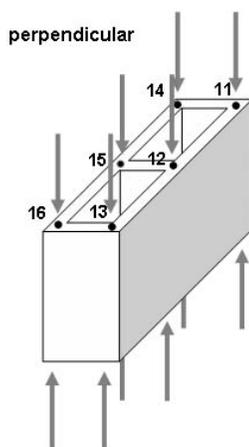


Figura 4.116 - Medição da VPU na direção perpendicular do bloco.

Tabela 4.71 - VPU perpendicular do bloco de *Eucalyptus grandis*.

VPU EM BLOCOS (km/s) - EUCALYPTUS GRANDIS traço: 1:0,36:0,84												
Pontos	0%				3% SBR				3% PAV			
	C1	C2	C3	Média	C1	C2	C3	Média	C1	C2	C3	Média
11	1,50	1,60	1,62	1,57	1,31	1,29	1,34	1,31	1,40	1,39	1,50	1,43
12	1,22	1,67	1,68	1,52	1,42	1,35	1,38	1,39	1,38	1,45	1,43	1,42
13	1,31	1,38	1,26	1,32	1,31	1,40	1,45	1,39	1,34	1,38	1,51	1,41
14	1,34	1,30	1,26	1,30	1,39	1,34	1,45	1,40	1,45	1,43	1,50	1,46
15	1,34	1,26	1,35	1,31	1,49	1,58	1,67	1,58	1,60	1,62	1,70	1,64
16	1,23	1,34	1,23	1,27	1,54	1,54	1,53	1,54	1,59	1,55	1,64	1,60

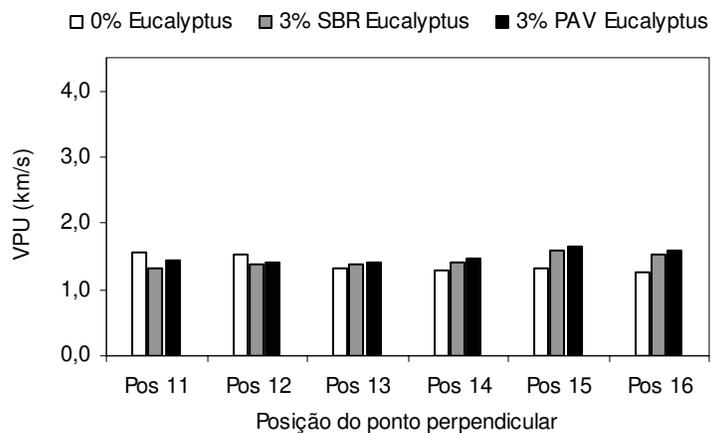


Figura 4.117 - VPU perpendicular do bloco de *Eucalyptus grandis*.

Tabela 4.72 - VPU perpendicular do bloco de *Pinus caribaea*.

VPU EM BLOCOS (km/s) - PINUS CARIBAEA traço: 1:0,36:1,08												
Pontos	0%				7% SBR				7% PAV			
	C1	C2	C3	Média	C1	C2	C3	Média	C1	C2	C3	Média
11	1,99	1,93	1,65	1,85	1,64	1,65	1,81	1,70	1,74	1,73	1,78	1,75
12	1,97	1,92	1,64	1,84	1,65	1,70	1,85	1,74	1,67	1,75	1,73	1,72
13	1,89	1,90	1,60	1,80	1,54	1,58	1,62	1,58	1,63	1,60	1,58	1,60
14	1,83	1,90	1,63	1,79	1,57	1,57	1,69	1,61	1,67	1,62	1,68	1,65
15	1,70	1,80	1,73	1,74	1,57	1,60	1,60	1,59	1,56	1,58	1,53	1,55
16	1,81	1,79	1,77	1,79	1,50	1,55	1,55	1,53	1,60	1,62	1,48	1,57

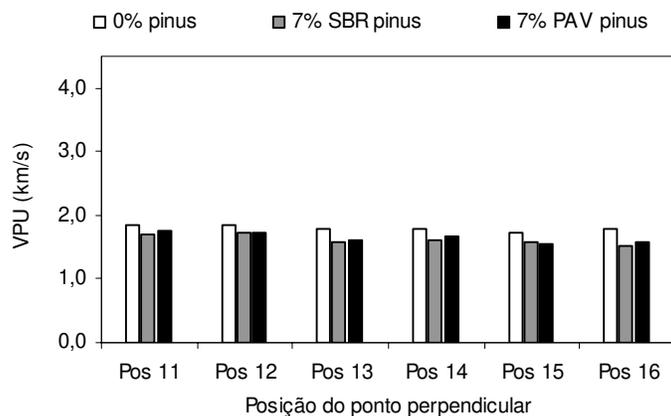
Figura 4.118 - VPU perpendicular do bloco de *Pinus caribaea*.

Tabela 4.73 - VPU perpendicular do bloco de casca de arroz.

VPU EM BLOCOS (km/s) - CASCA DE ARROZ traço: 1:0,28:0,65												
Pontos	0%				9% SBR				5% PAV			
	C1	C2	C3	Média	C1	C2	C3	Média	C1	C2	C3	Média
11	1,89	1,90	1,86	1,88	2,25	2,23	2,00	2,16	1,90	1,92	1,89	1,90
12	1,88	2,06	1,92	1,96	2,23	2,14	2,05	2,14	1,99	1,79	2,11	1,96
13	1,88	1,99	1,95	1,94	2,05	2,12	2,00	2,05	1,92	1,76	1,95	1,88
14	1,86	1,85	1,90	1,87	2,28	2,29	2,13	2,23	1,90	1,84	1,96	1,90
15	1,89	1,91	1,89	1,90	2,24	2,07	1,91	2,07	1,91	1,86	1,96	1,91
16	1,91	1,99	1,90	1,93	2,05	2,12	1,96	2,04	1,84	1,78	2,07	1,90

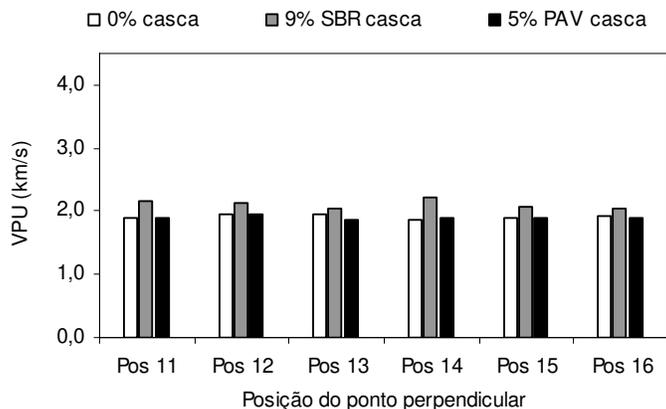
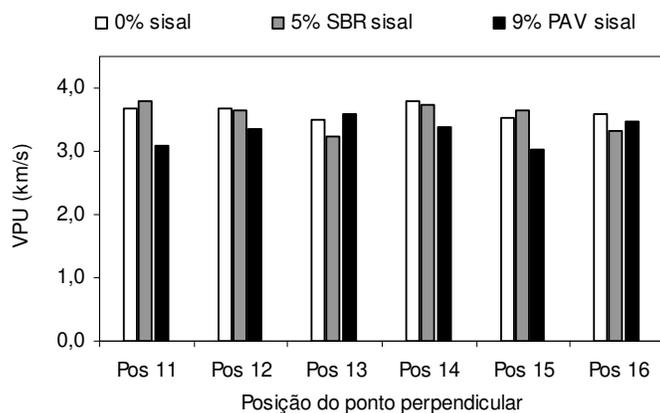


Figura 4.119 - VPU perpendicular do bloco de casca de arroz.

Tabela 4.74 - VPU perpendicular do bloco de *Agave sisalana*.

VPU EM BLOCOS (km/s) - AGAVE SISALANA traço: 1:0,08:0,60												
Pontos	0%				5% SBR				9% PAV			
	C1	C2	C3	Média	C1	C2	C3	Média	C1	C2	C3	Média
11	3,70	3,78	3,56	3,68	3,91	3,81	3,67	3,80	3,47	2,89	2,89	3,08
12	3,75	3,71	3,59	3,68	3,49	3,77	3,65	3,64	3,24	3,47	3,35	3,36
13	3,43	3,45	3,66	3,51	3,10	3,24	3,35	3,23	3,43	3,70	3,65	3,59
14	3,93	3,79	3,70	3,80	3,78	3,76	3,68	3,74	3,13	3,41	3,66	3,40
15	3,53	3,58	3,46	3,52	3,64	3,85	3,45	3,64	3,15	3,05	2,87	3,03
16	3,73	3,34	3,68	3,58	3,10	3,50	3,41	3,33	3,55	3,29	3,61	3,48

Figura 4.120 - VPU perpendicular do bloco de *Agave sisalana*.

Não ocorreram diferenças nas medições dos pontos com posições perpendiculares dos blocos, apresentando uma uniformidade dos valores obtidos para cada tipo de bloco. Os resultados da medição da VPU, na direção perpendicular, com maiores valores foram os blocos de *Agave sisalana* que corresponderam em média, aproximadamente, a 3,51 km/s. Os menores valores da VPU foram com os blocos de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* correspondendo em média, aproximadamente, a 1,44 km/s e 1,69 km/s, respectivamente. A medição dos blocos de casca de arroz correspondeu em média, aproximadamente, a 1,98 km/s. A adição dos polímeros não teve influência significativa nos resultados da VPU.

De um modo geral os blocos moldados em laboratório apresentaram resultados de resistência à compressão e absorção de água de acordo com os limites individuais previstos pela ABNT (NBR 7184 e NBR 12118), com exceção das misturas dos resíduos provenientes do *Pinus caribaea* com a adição dos polímeros. As Figuras 4.121 a 4.124 apresentam os blocos confeccionados com os resíduos provenientes das espécies: *Eucalyptus grandis*, *Pinus caribaea*, casca de arroz e *Agave sisalana* (sisal).

Em relação às Figuras 4.121 e 4.122 observou-se que durante o período de cura dos blocos o posicionamento dos mesmos favoreceu uma maior concentração de umidade na parte inferior, assim como melhor hidratação do cimento nesta região. Este fato foi confirmado com a determinação dos ensaios de medição de ultra-som, apresentando maiores valores de VPU na parte inferior em relação à parte superior dos blocos.



Figura 4.121 - Blocos vazados com os resíduos de *Eucalyptus grandis*: (a) blocos com umidade na parte inferior e (b) blocos sem umidade.



Figura 4.122 - Blocos vazados com os resíduos de *Pinus caribaea*: (a) blocos com umidade na parte inferior e (b) blocos sem umidade.

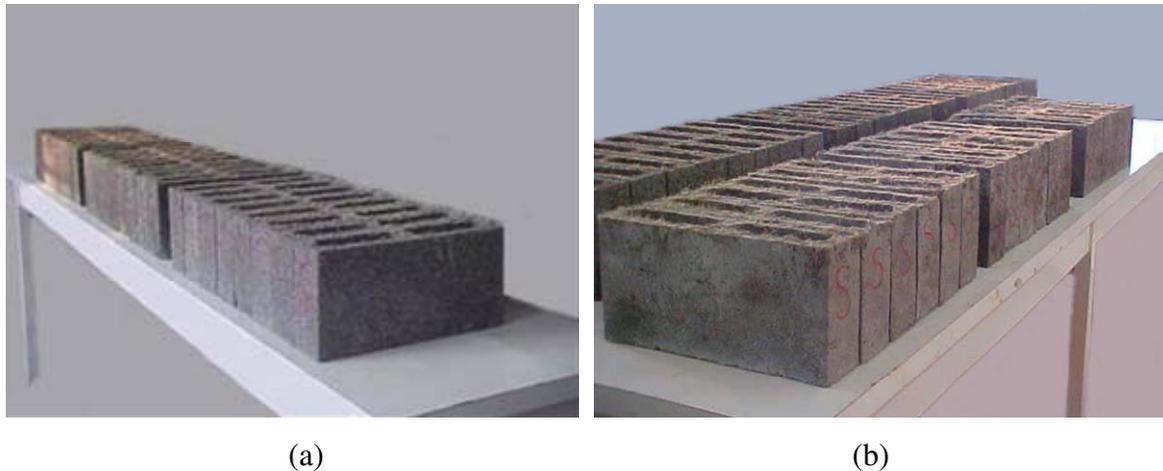


Figura 4.123 - Blocos vazados com os resíduos de Casca de arroz (a) e de *Agave sisalana* (b).

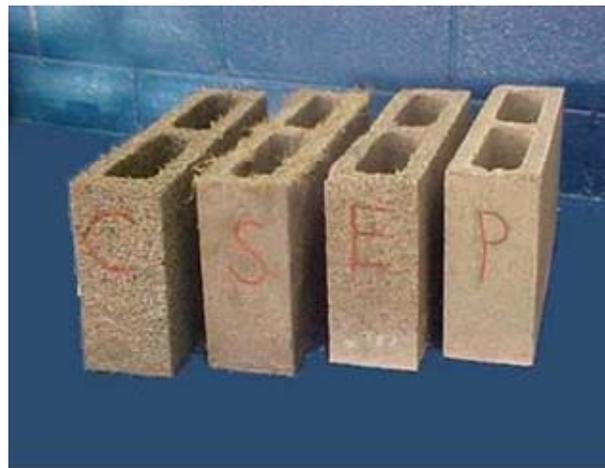


Figura 4.124 - Blocos vazados (9x19x39 cm) de casca de arroz (C), sisal (S), *Eucalyptus grandis* (E) e *Pinus caribaea* (P).

No caso da utilização de revestimento argamassado, a ser aplicado sobre a superfície dos blocos, alguns deles favorecem a aderência da argamassa em vista da rugosidade das suas superfícies, como é o caso dos blocos com casca de arroz e com resíduos de *Eucalyptus grandis*. Em contrapartida os blocos à base de *Pinus caribaea* e sisal possuem superfícies menos rugosas e, portanto, mais susceptíveis a formar substratos de menor aderência, necessitando utilizar argamassa de aderência (chapisco) para a fixação da argamassa de revestimento.

5. CONCLUSÕES

Considerando-se as metodologias utilizadas para avaliar o grau de compatibilidade das misturas, o cálculo do índice de inibição foi o que se mostrou mais objetivo e criterioso, em vista dos parâmetros de cálculo considerados (temperatura máxima, tempo de obtenção da temperatura máxima e inclinação da curva de hidratação). A metodologia baseada na temperatura máxima, considerando-se que a referência de comparação seja sempre a pasta de cimento, dependerá sempre do grau de reatividade do aglomerante e desse modo sua tendência será de incompatibilidade quando o cimento for de baixa reatividade (CPII-E e CPIII) e de compatibilidade quando este tiver boa capacidade de reação (CPV-ARI). A metodologia do cálculo do fator CA considera sempre uma porcentagem relativa do calor gerado, não importando o grau de reatividade do cimento, com a tendência em classificar as misturas como compatíveis. Dentre tais resíduos, em sua forma natural, àqueles provenientes da espécie *Pinus caribaea* foi o que apresentou melhor compatibilidade química com os cimentos utilizados. De um modo geral, os índices de compatibilidade melhoraram significativamente com a adição do acelerador de pega cloreto de cálcio (CaCl_2).

A metodologia para medição da velocidade do pulso ultra-sônico (VPU) em compósitos à base de resíduos vegetais, já aplicada aos materiais cimentícios em geral, é adequada para avaliar a evolução da resistência durante o período de endurecimento ao longo da cura das amostras. Os resultados obtidos através do ultra-som na aferição da VPU, provenientes da modificação da matriz cimentícia pela adição dos polímeros, podem ser correlacionados aos resultados de resistência à compressão durante o período de 7 dias após a moldagem dos compósitos. O modelo matemático, determinado a partir dos estudos realizados por Beraldo (1999), pode ser utilizado para se prever o comportamento da VPU nos compósitos.

A adição dos polímeros estireno-butadieno (SBR) e acetato-versatato (PAV22) apresentou influência positiva e contribuiu para o bom desempenho dos compósitos com resíduos vegetais. Através dos resultados obtidos, comprovou-se uma diminuição da permeabilidade de todos os compósitos, de um modo geral. A ação dos polímeros produziu diminuição da porosidade dos compósitos à base de *Pinus caribaea*, casca de arroz e *Agave sisalana* (sisal), com exceção dos compósitos à base de *Eucalyptus grandis*. A absorção de água foi reduzida com a adição dos polímeros, excetuando-se o compósito à base de *Eucalyptus grandis* com adição de SBR. No geral, o polímero PAV22 apresentou melhor desempenho e maior facilidade durante o processo de mistura, em razão de se apresentar na forma anidra (pó). Considerando-se os ensaios de caracterização dos compósitos com a variação dos polímeros adotados (SBR e PAV22), os tipos e os teores de polímeros que podem ser recomendados para sua utilização nos compósitos à base de resíduos vegetais estão apresentados na Tabela 4.75.

Tabela 4.75 - Tipos e teores de polímeros recomendados para serem utilizados nos compósitos à base de resíduos vegetais.

Compósito com resíduo	Teor de SBR	Teor de PAV22
<i>Eucalyptus grandis</i>	0%	7%
<i>Pinus caribaea</i>	3%	3%
Casca de arroz	5%	3%
<i>Agave sisalana</i>	3%	3%

Os resíduos vegetais são materiais que possuem maior resistividade à condução de calor e, incorporados à matriz cimentícia, transmitem de modo direto essas mesmas características ao compósito formado. Em contrapartida, a adição dos polímeros apresentou outra dinâmica em relação aos fenômenos ocorridos, interferindo na estrutura de formação e nas propriedades dos compósitos. O teor dos polímeros adicionados às misturas, em alguns casos, reduziu a porosidade dos compósitos com resíduos, proveniente do fenômeno de formação da película polimérica. Conseqüentemente, ocorreu aumento da condutividade térmica, diminuindo a capacidade isolante dos compósitos. Porém, como uma das propriedades que o polímero possui é a de incorporar ar na mistura, isto acabou conferindo, em alguns casos, um aumento da porosidade dos compósitos. O procedimento de mistura teve grande influência na determinação dos valores de condutividade térmica dos compósitos na medida em que, durante o processo de

mistura dos componentes, permitiu que uma maior quantidade de ar pudesse ser incorporada à argamassa, favorecendo a redução dos valores de condutividade térmica.

As micrografias provenientes dos ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) apresentaram a impregnação, em primeira instância, dos resíduos vegetais e, posteriormente, nos componentes dos compósitos, devido à formação de uma película polimérica de estireno-butadieno (SBR) e do acetato-versatato de vinila (PAV22). De certa forma, pode-se afirmar que ocorreu uma impermeabilização das partículas, e, especificamente, os resíduos vegetais adquiriram uma película, às vezes parcial, representando uma proteção contra a penetração de umidade e aumentando uma eventual deterioração nos compósitos.

Os resultados obtidos possibilitaram a definição de traços específicos para cada resíduo, com possibilidades de fabricação dos blocos vazados, em atendimento parcial às normas específicas para os blocos vazados de vedação, mais especificamente aos valores individuais de resistência à compressão e de absorção de água. Em contrapartida, o processo de cura foi um parâmetro determinante na obtenção dos resultados esperados. Para a confecção dos blocos nos moldes convencionais de fabricação recomenda-se que sejam feitas modificações no procedimento de cura. De um modo geral, os polímeros se mostraram eficientes na trabalhabilidade da argamassa durante o processo de mistura, porém, mostraram-se inadequados com relação à obtenção da resistência nas primeiras idades. Dentre as espécies utilizadas, os resíduos provenientes da espécie *Agave sisalana* (sisal) dificultaram a homogeneização, considerando-se o processo de mistura adotado, mesmo tendo em conta a baixa porcentagem de utilização em relação aos outros resíduos. Com utilização da betoneira convencional é praticamente impossível a homogeneização sem auxílio manual; os resíduos de sisal se aglomeram dificultando a mistura com os outros componentes. Embora as fibras de sisal possuam grande capacidade de resistência à tração o aproveitamento das fibras curtas em blocos vazados, utilizadas neste trabalho, não se mostrou adequado. A proporção utilizada em relação ao volume do bloco foi relativamente baixa em relação ao teor utilizado dos outros resíduos nos compósitos, o que implicou em um maior consumo de cimento, quando tais blocos foram confrontando com os demais.

Considerando-se os resíduos vegetais caracterizados neste trabalho, por intermédio da confecção dos compósitos cimentícios com a adição dos polímeros, é seguro afirmar que cada um destes resíduos possui grande potencial de aproveitamento. Os traços, aqui apresentados, demonstraram sua aplicabilidade na fabricação dos blocos vazados, com exceção das fibras de sisal, em vista da dificuldade do processo de mistura. Existem outras possibilidades de aplicação, com utilização dessas fibras em outros elementos construtivos, salvo alguns ajustes e a aplicação de técnicas mais adequadas para a manipulação da fibra, propiciando seu uso eficaz quando incorporada aos elementos construtivos. A Tabela 4.76 apresenta os traços que podem ser utilizados para a fabricação de blocos vazados sem função estrutural e a faixa de segurança em relação ao teor de cada resíduo de trabalho.

Tabela 4.76 - Traços e teores dos resíduos recomendados para utilização em blocos vazados sem função estrutural.

Blocos à base de resíduos	Traço em massa utilizados	Normas Técnicas NBR 7184 e NBR 12118	Teor de resíduo utilizado	Teor de resíduo recomendado
<i>Eucalyptus grandis</i>	1:0,36:0,84	parcialmente atendidas	36%	25% a 30%
<i>Pinus caribaea</i>	1:0,36:1,08	não atendidas	36%	25% a 30%
Casca de arroz	1:0,28:0,65	parcialmente atendidas	28%	20% a 25%
<i>Agave sisalana</i>	1:0,08:0,60	atendidas	8%	2%

Para os trabalhos futuros, seguindo esta linha de raciocínio, existem possibilidades de desenvolvimento de elementos construtivos estruturais utilizando compósitos à base de resíduos vegetais, utilizando-se ensaios que possam avaliar a durabilidade desses compósitos. Neste caso, as partículas vegetais deverão ser submetidas, em uma primeira etapa do trabalho, a um tratamento adequado de proteção superficial antes da sua incorporação à matriz cimentícia. Inicialmente, os produtos recomendáveis para seu uso devem ser, preferivelmente, provenientes de fontes renováveis e ecologicamente corretos, que apresentem baixa periculosidade de manipulação e sem prejuízo ao meio ambiente. Essas substâncias, com reais possibilidades de aplicação, podem ser à base de resinas naturais ou de polímeros provenientes de fontes vegetais, entre outros.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, Rio de Janeiro

NBR 5733 - **Cimento Portland de alta resistência inicial**. Especificação. 5p. 1990.

NBR-5735 - **Cimento Portland de alto-forno**. Especificação. 5p. 1990.

NBR 7173 - **Blocos vazados de concreto simples para alvenaria sem função estrutural**. Especificação. Rio de Janeiro. 6p. 1982.

NBR 7184 - **Blocos vazados de concreto simples para alvenaria: Determinação da resistência à compressão**. Método de ensaio. 2p. 1991.

NBR 7215 - **Cimento Portland: Determinação da resistência à compressão**. Método de ensaio. 8p. 1996.

NBR 7217 - **Agregados: Determinação da composição granulométrica**. Método de ensaio. 3p. 1987.

NBR-7251 - **Agregado em estado solto: Determinação da massa unitária**. Especificação, Rio de Janeiro, 3p.,1982.

NBR-11578 - **Cimento Portland composto**. Especificação. Rio de Janeiro. 8 p. 1991.

NBR-12006 - **Cimento: Determinação do calor de hidratação pelo método da garrafa de Langavant**. Método de ensaio. Rio de Janeiro. 4 p., 1990.

NBR-12094 (MB3431) - **Espuma rígida de poliuretano para fins de isolamento térmico - Determinação da condutividade**. Método de ensaio. 5p. 1992.

NBR-12118 - **Blocos vazados de concreto simples para alvenaria: Determinação da absorção de água, do teor de umidade e da área líquida**. Método de ensaio. 2p. 1991.

NBR-14929 - **Determinação do teor de umidade de cavacos: Método por secagem em estufa**. Método de ensaio. 3p. 2003.

NBR-13276 - **Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos: Determinação do teor de água para obtenção do índice de consistência padrão**. Método de ensaio. 2p. 1995.

NBR-13277 - Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos: Determinação da retenção de água. Método de ensaio. 2p. 1995.

NBR-13280 - Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos: Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Método de ensaio. 2p. 1995.

AKATSU, A.; SATO, N. M. N. **Propriedades termofísicas de materiais e componentes de construção.** Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Tecnologia de Edificações. São Paulo, IPT, Pini, p. 519-522, 1988.

AMICO, S. C.; COSTA, T. H. S. ; CARRERA, L. C.; GALVÃO, D. A. **Caracterização de fibras de sisal da região nordeste do Brasil.** Proceedings of COBEM, 2001. Materials Science, vol. 2, p.33-41, 2001.

ASTM C305 - Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency. ASTM International. 3p. 1999.

ASTM C 597-83 (Reapproved 1991). **Test for Pulse Velocity Through Concrete .** ASTM, U.S.A., p. 387-397, 1991.

BERALDO, A. L. **Généralisation et optimisation de la fabrication d'un composite biomasse végétale-ciment à variations dimensionnelles limitées vis-à-vis des variations de l'humidité.** 223p. Thèse (Docteur en Sciences du Bois), Université de Nancy I, Nancy: Université de Nancy I, 1994.

BERALDO A. L. **Ultrasonic speed wave: cure type influence on wood-cement composite compression strength:** In: Proceedings of the NDTISS'99. International Symposium on Nondestructive Testing Contribution to the Infrastructure Safety Systems in the 21st Century, UFSM, Torres, RS. p. 86-90, 1999.

BERALDO, A .L. ; ARZOLLA, J. A. R. dal P. **Utilização de resíduos vegetais na produção de componentes para construção civil.** 5º Congresso Brasileiro de Cimento (CBC), Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo, Nov., 1999.

BERALDO, A. L.; ZUCCO, L. L. **Influência das granulometria de espécies vegetais na pega e no endurecimento de argamassas de cimento Portland.** In: V Brazilian Conference on Portland Cement (BCPC). Proceedings: São Paulo, ABCP, vol. 1, p. 1-26 - 2-26, 1999.

BERALDO, A. L; ARRUDA, A. C.; STANCATO, A. C.; SAMPAIO, C. A. P.; FERNANDES, O. P; LEONEL, V. M. **Compósitos à base de resíduos vegetais e cimento portland.** In: VIII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, Uberlândia, vol.1, p. 120-126, 2002.

BERALDO, A. L.; VIEIRA, F. F. **Ensaio não destrutivo aplicado à argamassa com adição de fibras de sisal.** In: Congresso Panamericano de Ensaio não destrutivo. PANNDT, Rio de Janeiro. ABENDE. vol. 1, p. 1-8, 2003.

BIBLIS, E. J.; LO, C. **Sugars and others wood extratives: Effect on the setting of southern-pine cement mixtures.** Forest Products Journal.vol. 18, nº 8, p. 28-34, 1968.

CAMARINI, G.; BALAYSSAC, J. P.; DETRICHE, Ch. H. **Influence of cement type and curing conditions on initial absorption of concrete,** High-Performance Concrete, Proceedings Second CANMET/ACI International Conference, Gramado, RS , Brazil, 1999.

CEB - **Durable Concrete Structures.** Comité Euro-International du Béton (C.E.B.), Second edition, 1989.

DIAMOND, S. **Aspects of concrete porosity revisited.** Cement and Concrete Research. vol. 29, p. 1181-1188, 1999.

DIAMOND, S. **Mercury porosimetry: An inappropriate method for the measurement of pore size distributions in cement-based materials.** Cement and Concrete Research, vol. 30, nº 11, p. 1517-1525, 2000.

DIAMOND, S. **The microstructure of cement paste and concrete - A visual primer.** Cement and Concrete Composites, vol. 26, p. 919-933, 2004.

FERREIRA, A. B. H. **Novo Dicionário Eletrônico Aurélio versão 5.0.** Impressão da Editora Positivo, revista e atualizada do Aurélio Século XXI, 3ª edição, 2004.

FOWLER, D. W. **Polymers in concrete: a vision for the 21st century.** Cement and Concrete Composites, vol. 21, p. 449-452, 1999.

FURUNO, T.; UEHARA, T.; JODAI, S. **Combinations of Wood and Silicate I: Impregnation by water glass and applications of aluminum sulfate and calcium chloride as reactants.** Mokuzai Gakkaishi, vol. 37, nº 5, p. 462-472, 1991.

GIESCHE, H. **Proc. of Mater. Res. Soc. Symp.** 431, 251, 1996.

GOLDSTEIN, J. I.; LIFSHIN, E.; LYMAN, C. E.; KCHLIN, P.; MICHAEL, J. R., SAWYER L.; NEWBURY, D.; JOY, D. C. **Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis.** New York. Plenum Publishing Corporation, 1992.

GUIMARÃES, S. S. **Vegetable Fiber-Cement Composites.** In: Proceedings of the Second International Symposium on Vegetable Plants and their Fibres on Building Materials by RILEM 7, Salvador, Bahia, p. 98-107, 1990.

GÜTHS, S. **Um método transiente para medição de propriedades térmicas.** 146p. Dissertação de Mestrado pelo Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, 1990.

HACHMI, M.; CAMPBELL, A. G. **Wood-cement chemical relationships**. International Conference of Fiber and particleboard bonded with inorganic binder, Spokane-Idaho, p. 43-47, 1988.

HACHMI, M.; MOSLEMI, A. A. **Correlation between wood-cement compatibility and wood extractives**. Forest Products Journal, vol. 39, nº 6, p. 55-58, 1989.

HANNANT, D. J. **Fibres cements and fibres concrete**. A Wiley Interscience Publication. Copyright by John Wiley & Sons Ltd., p. 152-155, 1978.

HOFSTRAND, A. D.; MOSLEMI, A. A.; GARCIA, J. F. **Curing characteristics of wood particles from nine northern red mountain species mixed with Portland cement**. Forest Products Journal, 34(2), p. 57-61, 1984.

KIM, J. H.; ROBERTSON, R. E. **Prevention of air void formation in polymer-modified cement mortar by pre-wetting**. Cement and Concrete Research, vol. 27, nº 2, p. 171-176, 1997.

KOMLOS, K.; POPOVICS, S.; NIIRNBERGEROH, T.; BABD, B.; POPOVICS, J. S. **Ultrasonic Pulse Velocity Test of Concrete Properties as Specified in Various Standards**. Cement and Concrete Composites, vol. 18, p. 357-364, 1996.

LEE, A.W.C.; HONG, Z. **Compressive strength of cylindrical sample as an indicator of wood-cement compatibility**. Forest Products Journal. vol. 36, nº 11 e 12, p. 87-90, 1986.

LEE, A. W. C.; PHILIPS, D. R.; HSE, C. V. **Effect of cement/wood ratios and wood storage conditions on hydration temperature, hydration time and compressive strength of wood-cement mixtures**. Wood and Fiber Science, vol. 19, nº 3, p. 262-268, 1987.

MEDEIROS, J. S. **Alvenaria estrutural não armada de blocos de concreto: produção de componentes e parâmetros de projeto**. 449p. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1993.

METZ, F.; KNÖFEL, D. **Mater. Struct.**, 25, 127, 1992.

MILLER, D. P.; MOSLEMI, A. A. **Wood-cement composites: Effect of model compounds on hydration characteristics and tensile strength**. Wood and Fiber Science. vol. 23, nº 4, p. 472-482, 1991.

MOSLEMI, A. A.; GARCIA, J. F.; HOFSTRAND, A. D. **Effect of various treatments and additives on wood-portland-cement –water system**. Wood and Fiber Science. vol. 15, nº 2, p. 164-176, 1983.

MOSLEMI, A. A.; LIM, Y. T. **Compatibility of southern hardwoods with portland cement**. Forest Products Journal, vol. 34, nº 718, p. 22-26, 1984.

NEVILLE, A. **Propriedades do concreto**. Livro Técnico - Editora Pini, p. 61-341, 1982.

NOLASCO, A. M. **Relatório do Projeto de Aproveitamento dos Resíduos da Agroindústria da Banana no Vale do Ribeira**. 11. Piracicaba, LED-Esalq-USP/SCTDE-SP, 1997.

OHAMA, Y. **Formulas of estimating the compressive strength of polymer-modified mortars**. In: Proceedings of the Fifteenth Japan Congress on Materials Research. The Society of Materials Science, Japan, Kyoto, p. 151-153, Mar. 1972.

OHAMA, Y. **Polymer-based Admixtures**. Cement and Concrete Composites, vol. 20, p. 189-212, 1998.

OLLITRAULT-FICHET, R.; GAUTHIER, C.; CLAMEN, G.; BOCH, P. **Microstructural aspects in a polymer-modified cement**. Cement and Concrete Research, vol. 28, nº. 12, p. 1687-1693, 1998.

PINTO JR, J. E.; KAGEYAMA, P. Y.; JACOB, W. S. **Centro de conservação genética e melhoramento de pinheiros tropicais**, Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, ESALQ-USP, Piracicaba, SP, 1979.

QUIRINO, W. F. **Utilização energética de resíduos vegetais**. Laboratório de Produtos Florestais (LPF) - IBAMA, Brasília/DF, 31p., 2002.

RAMAKRISHNA, G.; SUNDARARAJAN, T. **Impact strength of a few natural fibre reinforced cement mortar slabs: a comparative study**. Cement and Concrete Composites, vol. 27, p. 547-553, 2005.

REINHARDT, H.W.; GABER, K. **Mater. Struct.**, 23, 3, 1990.

RILEM - CPC 11.3 **Mater. Struct.** 17, 391, 1984.

SAKAI, E.; SUJITA, J. **Composite mechanism of polymer modified cement**. Cement and Concrete Research, vol. 25, nº 1, p. 127-135, 1995.

SANDERMANN, W.; PRESSER, H. J.; SCHWIENS, W. **The effect of wood extractives on the setting of cement-bonded wood materials**. Holzforschung, vol. 14, nº 3, p. 70-77, 1960.

SAVASTANO JR.; H.; AGOPYAN, V. **Fibras naturais para produção de componentes construtivos**. Curso Internacional Materiales Compuestos Fibrorreforzados. Cali, Colombia, Universidad del Valle, Cytod Proyecto VIII, vol. 5, 1998.

SAVASTANO JR.; H.; LUZ, P. H. C.; NOLASCO, A. M. **Seleção de resíduos de alguns tipos de fibra vegetal, para reforço de componentes de construção**. In: Encontro Nacional Sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, 1., Canela, Anais. Porto Alegre, Antac, p. 107-112, nov, 1997.

SAVASTANO JR, H.; WARDEN, P.G.; COUTTS, R. S. P. **Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites.** Cement and Concrete Composites, vol. 22, p. 379-384, 2000.

SCRIVENER, K. L. **Backscattered electron imaging of cementitious microstructures: understanding and quantification.** Cement and Concrete Composites, vol. 26, p. 935-945, 2004.

SHAKER, F. A.; EL-DIEB, A. S.; REDA, M. M. **Durability of styrene-butadiene latex modified concrete.** Cement and Concrete Research, vol. 27, n° 5, p. 711-720, 1997.

SIMATUPANG, M. H. **Degradations of glucose, cellobiose, and wood under the influence of portland cement paste.** Holzforschung, vol. 40, n° 3, p. 149-155, 1986.

SIMATUPANG, M. H.; LANGE, H.; KASIM, A.; SEDDING, N. **Influence of wood species on the setting of cement and gypsum.** International Congress on fiber and particleboard with inorganic binder, Spokane-Idaho, p. 33-42, 1988.

SOUZA, F. X. **Casca de arroz carbonizada: um substrato para a propagação de plantas.** Publicação na Revista Lavoura Arrozeira. vol. 46, n°. 406, 11p., 1993.

SOUZA, J. G. G. **Contribuição ao estudo da relação entre propriedades e proporcionamento de blocos de concreto: Aplicação ao uso de entulho como agregado reciclado.** 124p. Dissertação de Mestrado - Publicação E.D.M 009A/2001, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2001.

STANCATO, A.C. **Determinação da condutividade térmica e da resistência mecânica em argamassa leve.** 155p. Dissertação (mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Campinas, SP, 2000.

STANCATO, A. C.; BURKE, A. K.; BERALDO, A. L. **Mechanism of a vegetable waste composite with polymer-modified cement (VWCPMC).** Cement and Concrete Composites, vol. 27, N° 11, p. 599-603, 2005.

STORTE, M. **Argamassa polimérica impermeabiliza e protege o concreto.** Revista Ibracon. Ano II, N° 6, 1992.

SWAMY, R. N. **Vegetable fibre reinforced cement composites: A false dream or a potential reality?.** In: Proceedings of the Second International Symposium on Vegetable Plants and their Fibres on Building Materials, RILEM 7, Salvador, Bahia, p. 3-8, 1990.

TANGO, C. E. S. **Blocos de concreto: dosagem, produção e controle de qualidade.** 1ª ed. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas. IPT, vol. 1, 12p., 1984.

TAYLOR, R. E.; KELSIC, B. H. **Parameters governing thermal diffusivity measurements of unidirectional fiber-reinforced composites.** Journal of Heat Transfer, vol. 108, p. 161-165, 1986.

WASHBURN, E. W. **Proc. Natl. Acad. Sci.** 7, 115, 1921.

WEATHERWAX, R. C.; TARKOW, H. **Effect of wood on setting of Portland cement.** Forest Products Journal, vol. 14, No. 12, p. 567-570, 1964.

YASIN, S. M.; QURESHI, T. A. **Quantity of water solubles in some hardwood species (A basis for their relative suitability in wood cement board).** The Pakistan Journal of Forestry, vol. 39, N°. 2, p. 103-106, 1989.

ZUCCO, L. L. **Estudo da viabilidade de fabricação de placas de compósito à base de cimento e casca de arroz.** 118p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, SP, 1999.

ANEXOS

TRATAMENTO ESTATÍSTICO

O tratamento estatístico foi realizado com o auxílio do software *Statgraphics Plus for Windows 4.1* da empresa Statistical Graphics Corporation, onde a análise se concentrou nos compósitos com resíduos de *Eucalyptus grandis*, *Pinus caribaea*, casca de arroz e *Agave sisalana*.

Análise de variância para a compressão simples

Este procedimento executa uma análise de variação multifatores para o ensaio de compressão simples. Constrói vários testes e gráficos para determinar que fatores têm um efeito estatístico significativo na compressão. Os testes F na tabela de ANOVA permitem que sejam identificados os fatores significativos. Para cada fator significativo, os testes de escala múltiplos indicam quais médias são significativamente diferentes das demais. O lote das médias e das interações auxilia a interpretação dos efeitos significativos.

Variável dependente: **Compressão**

Fatores: **Resíduo**
Polímero
Dosagem

Nº. de casos completos: **120**

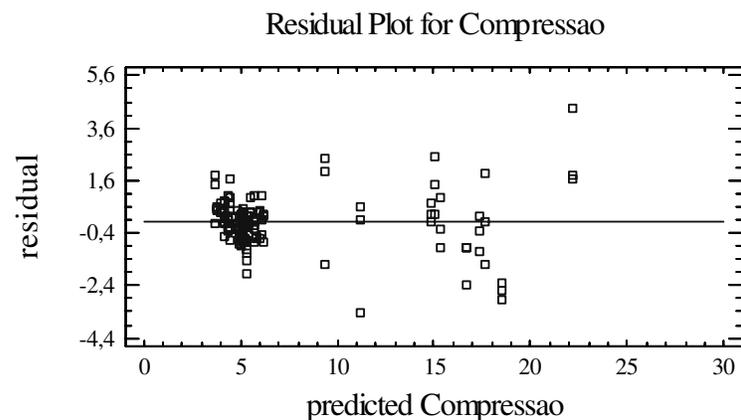
A tabela de ANOVA decompõe a variabilidade da compressão nas contribuições devidas aos vários fatores. Desde que o **tipo III** das somas dos quadrados tem sido escolhido, a contribuição de cada fator é medida removendo os efeitos de todos os fatores restantes. Os **p**-valores testam o significado estatístico de cada um dos fatores. Desde que os **p**-valores sejam menores que 0,05, estes fatores têm um efeito estatístico significativo na compressão ao nível de confiança de 95%.

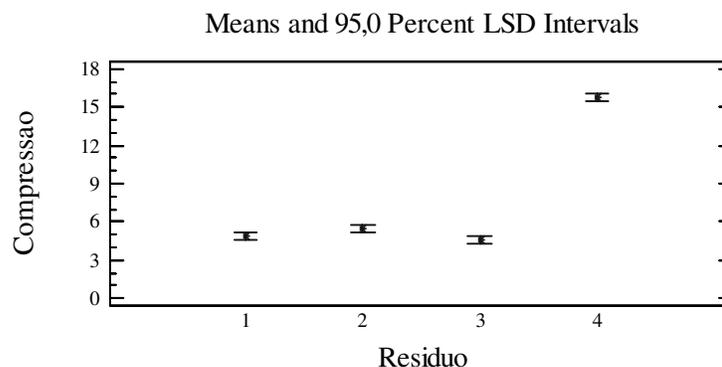
Analysis of Variance for Compressao - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Residuo	2652,28	3	884,094	606,96	0,0000
B:Polimero	9,35208	1	9,35208	6,42	0,0130
C:Dosagem	64,4903	4	16,1226	11,07	0,0000
INTERACTIONS					
AB	36,0918	3	12,0306	8,26	0,0001
AC	260,089	12	21,6741	14,88	0,0000
BC	14,6133	4	3,65332	2,51	0,0473
RESIDUAL	134,007	92	1,4566		
TOTAL (CORRECTED)	3170,93	119			

Nota: Todas as razões **F** estão baseadas no erro da média residual quadrada.

A tabela de ANOVA mostra um p-valor igual a zero e, portanto, inferior a 0,05 para o fator Resíduo, o que significa que ele contribuiu significativamente à variabilidade da resposta em estudo (Compressão). As interações entre os três fatores têm p-valor abaixo de 0,05, portanto, têm um efeito estatístico significativo na compressão ao nível de confiança de 95%. O gráfico de Médias de Tensão em função do traço indica que os valores de compressão para os compósitos de sisal são muito superiores em relação aos outros compósitos, não podendo ser tratados na mesma categoria de classificação, ou seja, seus valores são compatíveis com os valores de concreto estrutural.





Legenda: 1: *Eucalyptus grandis* 2: *Pinus caribaea* 3: Casca de arroz 4: Sisal

Teste em escala múltipla de compressão para cada resíduo

Esta tabela aplica um procedimento de comparação múltipla para determinar que médias são significativamente diferentes das demais. A metade inferior da saída mostra a diferença estimada entre cada par de médias. Um asterisco foi colocado ao lado de 3 pares, indicando que estes pares mostram diferenças estatísticas significativas ao nível da confiança de 95%. Dois grupos homogêneos foram identificados usando-se colunas dos X. O método atualmente que está sendo usado para discriminar entre as médias é o procedimento *Fisher* da diferença mínima significativa (LSD). Com este método, ocorre um risco de 5% de chamar cada par das médias significativamente diferentes quando as atuais diferenças são iguais a zero.

Multiple Range Tests for Compressao by Residuo

Method: 95,0 percent LSD			
Residuo	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
3	30	4,54167	X
1	30	4,90433	X
2	30	5,5170	X
4	30	15,815	X

Contrast	Difference	(+/-) Limits
1 - 2	-0,612667	1,0242
1 - 3	0,362667	1,0242
1 - 4	*-10,9107	1,0242
2 - 3	0,975333	1,0242
2 - 4	*-10,298	1,0242
3 - 4	*-11,2733	1,0242

* denota uma diferença estatística significativa.

Em vista da grande diferença existente entre os compósitos com resíduos de sisal e os outros compósitos, encontrada no tratamento estatístico, considerando-se a análise feita com os resultados de compressão, optou-se pelo tratamento estatístico das variáveis dependentes do grupo que engloba os compósitos confeccionados com os três resíduos restantes, ou seja, com *Eucalyptus grandis*, *Pinus caribaea* e casca de arroz.

Compósitos com resíduos de *Eucalyptus grandis*, *Pinus caribaea* e casca de arroz

Variável dependente: **Compressão**

Fatores: **Resíduo**
Polímero
Dosagem

Nº. de casos completos: **90**

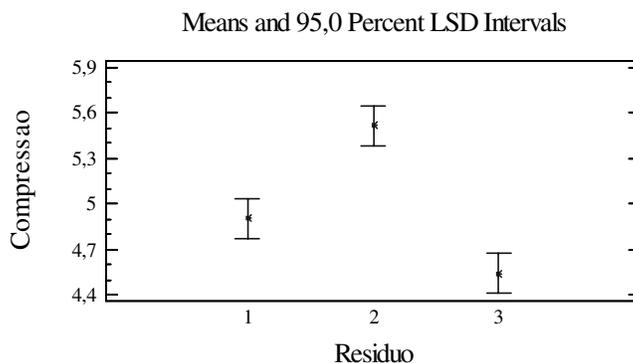
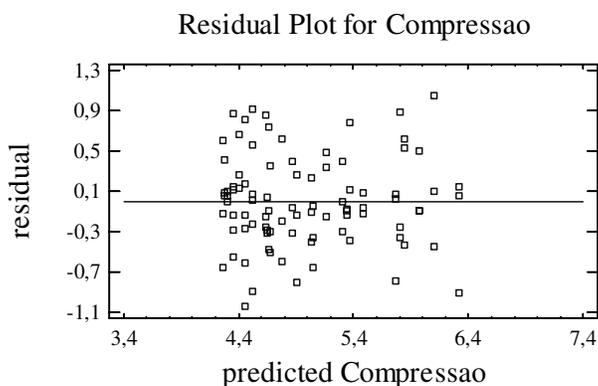
Analysis of Variance for Compressao - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Residuo	14,5816	2	7,29081	27,01	0,0000
B:Polimero	0,0552544	1	0,0552544	0,20	0,6524
C:Dosagem	2,4944	4	0,623601	2,31	0,0665
INTERACTIONS					
AB	2,8342	2	1,4171	5,25	0,0076
AC	10,5191	8	1,31488	4,87	0,0001
BC	1,83791	4	0,459477	1,70	0,1596
RESIDUAL	18,3528	68	0,269894		
TOTAL (CORRECTED)	50,6752	89			

Nota: Todas as razões **F** estão baseadas no erro da média residual quadrada.

A tabela de ANOVA mostra um p-valor igual a zero e, portanto, inferior a 0,05 para o fator resíduo, o que significa que mesmo contribui significativamente à variabilidade da resposta em estudo (Compressão). Os outros fatores como o polímero e a dosagem apresentaram p-valor acima de 0,05, o que significa que não contribuem significativamente à compressão. As interações entre os três fatores têm um p-valor abaixo de 0,05 para as interações entre resíduo x polímero e do resíduo x dosagem, portanto, têm um efeito estatístico significativo na

compressão ao nível de confiança de 95%, porém a interação entre o polímero e a dosagem não foi significativa.



Legenda: 1: *Eucalyptus grandis* 2: *Pinus caribaea* 3: Casca de arroz

Multiple Range Tests for Compressao by Residuo

Method: 95,0 percent LSD			
Residuo	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
3	30	4,54167	X
1	30	4,90433	X
2	30	5,5170	X
Contrast	Difference		(+/-) Limits
1 - 2	-0,612667		0,328518
1 - 3	0,362667		0,328518
2 - 3	0,975333		0,328518

* denota uma diferença estatística significativa.

Variável dependente: **Densidade**

Fatores: **Resíduo**
Polímero
Dosagem

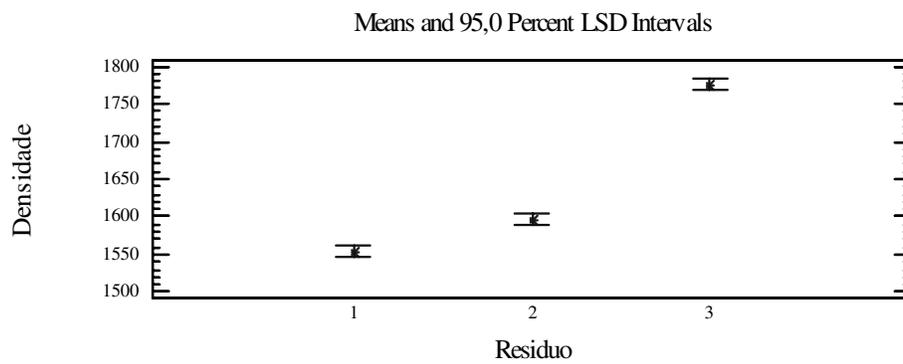
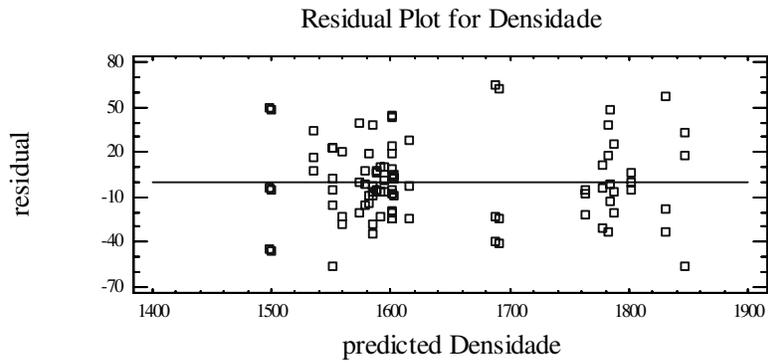
Nº. de casos completos: **90**

Analysis of Variance for Densidade - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Residuo	828695,0	2	414347,0	451,57	0,0000
B:Polimero	59,2111	1	59,2111	0,06	0,8002
C:Dosagem	65829,9	4	16457,5	17,94	0,0000
INTERACTIONS					
AB	56,0365	2	28,0182	0,03	0,9699
AC	37667,0	8	4708,37	5,13	0,0001
BC	3515,48	4	878,869	0,96	0,4364
RESIDUAL	62395,3	68	917,578		
TOTAL (CORRECTED)	998218,0	89			

Nota: Todas as razões **F** estão baseadas no erro da média residual quadrada.

A tabela de ANOVA mostra dois p-valores iguais a zero e, portanto, inferiores a 0,05 para o fator resíduo e dosagem, o que significa que contribuem significativamente à variabilidade da resposta em estudo (Densidade). O outro fator como o tipo de polímero apresentou p-valor acima de 0,05, o que significa que não contribui significativamente à densidade. A interação entre dois fatores tem um p-valor acima de 0,05, ou seja, resíduo x polímero e do polímero x dosagem, não são significativas. A interação entre resíduo x dosagem apresentou um p-valor abaixo de 0,05, portanto, apresenta um efeito estatístico significativo na densidade ao nível de confiança de 95%.



Legenda: 1: *Eucalyptus grandis* 2: *Pinus caribaea* 3: Casca de arroz

Multiple Range Tests for Densidade by Residuo

Method: 95,0 percent LSD			
Residuo	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
1	30	1553,84	X
2	30	1595,97	X
3	30	1775,17	X

Contrast	Difference	(+/-) Limits
1 - 2	*-42,13	18,2601
1 - 3	*-221,324	18,2601
2 - 3	*-179,194	18,2601

* denota uma diferença estatística significativa.

Variável dependente: **Retenção de água**

Fatores: **Resíduo**
Polímero
Dosagem

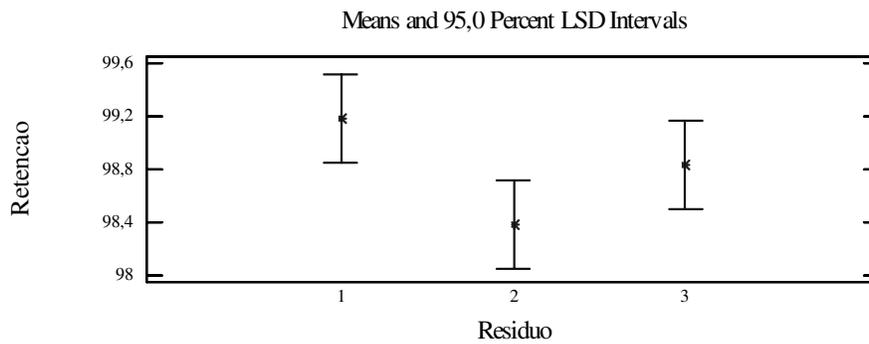
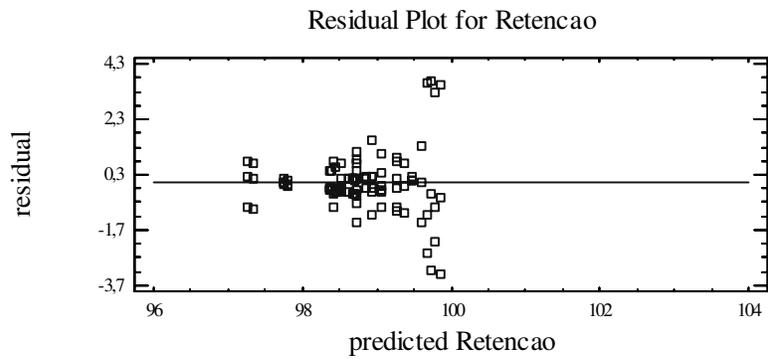
Nº. de casos completos: **90**

Analysis of Variance for Retencao - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Residuo	9,69995	2	4,84997	2,94	0,0597
B:Polimero	0,287868	1	0,287868	0,17	0,6775
C:Dosagem	24,191	4	6,04776	3,66	0,0092
INTERACTIONS					
AB	0,0498022	2	0,0249011	0,02	0,9850
AC	4,35355	8	0,544194	0,33	0,9517
BC	0,911871	4	0,227968	0,14	0,9676
RESIDUAL	112,22	68	1,65029		
TOTAL (CORRECTED)	151,714	89			

Nota: Todas as razões **F** estão baseadas no erro da média residual quadrada.

A tabela de ANOVA mostra dois p-valores acima de 0,05 para o fator resíduo e polímero, o que significa que ambos não contribuem significativamente à variabilidade da resposta em estudo (Retenção). Porém, um p-valor mostra um valor abaixo de 0,05 para o fator dosagem, o que significa que ela contribui significativamente à variabilidade da resposta em estudo (Retenção) ao nível de confiança de 95%. As interações entre três fatores apresentaram um p-valor acima de 0,05, portanto, não apresentam um efeito estatístico significativo na retenção.



Legenda: 1: *Eucalyptus grandis* 2: *Pinus caribaea* 3: Casca de arroz

Multiple Range Tests for Retencao by Residuo

Method: 95,0 percent LSD			
Residuo	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
2	30	98,3833	X
3	30	98,3833	XX
1	30	98,3833	X
Contrast	Difference		(+/-) Limits
1 - 2	*0,802333		0,614945
1 - 3	0,354333		0,614945
2 - 3	-0,448		0,614945

* denota uma diferença estatística significativa.

Variável dependente: **VPU**

Fatores: **Resíduo**
Polímero
Dosagem

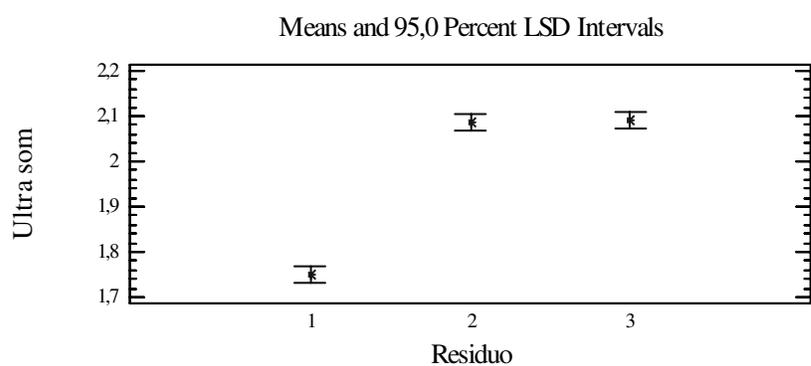
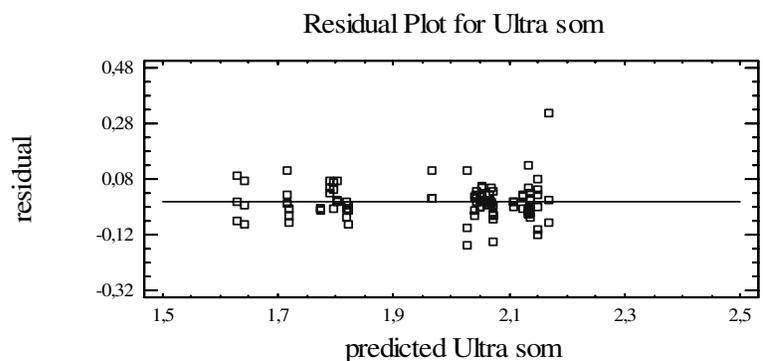
Nº. de casos completos: **90**

Analysis of Variance for VPU - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Residuo	2,26513	2	1,13256	213,73	0,0000
B:Polimero	0,0284444	1	0,0284444	5,37	0,0235
C:Dosagem	0,0689178	4	0,0172294	3,25	0,0168
INTERACTIONS					
AB	0,00281556	2	0,00140778	0,27	0,7675
AC	0,16393	8	0,0204911	3,87	0,0008
BC	0,0274778	4	0,00686944	1,30	0,2802
RESIDUAL	0,360329	68	0,00529895		
TOTAL (CORRECTED)	2,91704	89			

Nota: Todas as razões **F** estão baseadas no erro da média residual quadrada.

A tabela de ANOVA mostra três p-valores abaixo de 0,05 para o fator resíduo, polímero e dosagem, o que significa que todos contribuem significativamente à variabilidade da resposta em estudo (VPU). Duas interações entre três fatores apresentaram um p-valor acima de 0,05, portanto, não apresentam um efeito estatístico significativo na retenção. Uma interação entre o fator resíduo x dosagem mostrou um p-valor abaixo de 0,05, portanto, apresentando um efeito estatístico significativo da resposta em estudo (VPU) ao nível de confiança de 95%



Legenda: 1: *Eucalyptus grandis* 2: *Pinus caribaea* 3: Casca de arroz

Multiple Range Tests for VPU by Residuo

Method: 95,0 percent LSD			
Residuo	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
1	30	1,751	X
2	30	2,08467	X
3	30	2,09033	X
Contrast	Difference		(+/-) Limits
1 - 2	*-0,333667		0,04224
1 - 3	*-0,339333		0,04224
2 - 3	-0,00566667		0,04224

* denota uma diferença estatística significativa.

Variável dependente: **Porosidade**

Fatores: **Resíduo**
Polímero
Dosagem

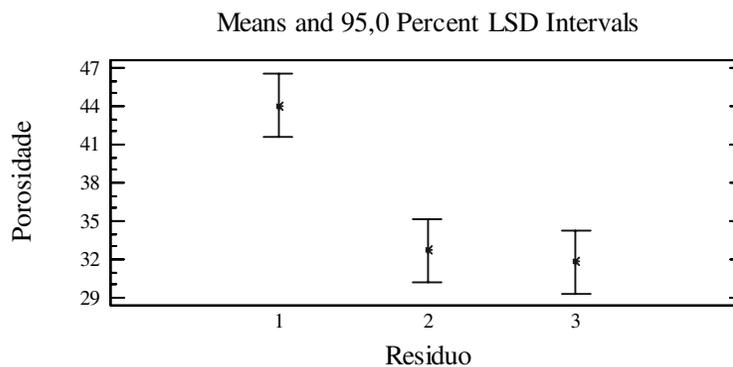
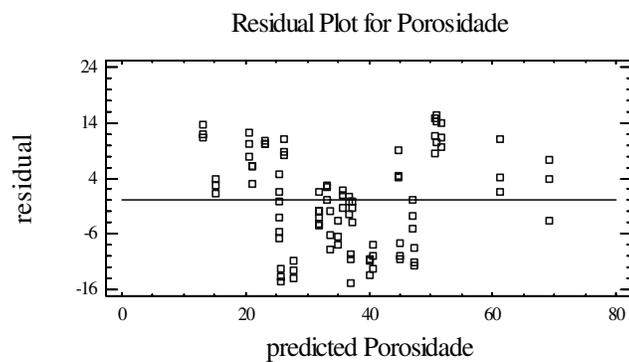
Nº. de casos completos: **90**

Analysis of Variance for Porosidade - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Residuo	2810,66	2	1405,33	14,88	0,0000
B:Polimero	123,341	1	123,341	1,31	0,2572
C:Dosagem	2647,24	4	661,809	7,01	0,0001
INTERACTIONS					
AB	5653,17	2	2826,58	29,93	0,0000
AC	3176,7	8	397,087	4,20	0,0004
BC	505,195	4	126,299	1,34	0,2651
RESIDUAL	6422,87	68	94,454		
TOTAL (CORRECTED)	21339,20	89			

Nota: Todas as razões **F** estão baseadas no erro da média residual quadrada.

A tabela de ANOVA mostra dois p-valor abaixo de 0,05 para o fator resíduo e dosagem, o que significa que ambos contribuem significativamente à variabilidade da resposta em estudo (Porosidade). Porém, observou-se um p-valor acima de 0,05 para o fator polímero, significando que o mesmo não contribui significativamente para a porosidade. Uma interação entre três fatores apresentou um p-valor acima de 0,05, portanto, não apresentando um efeito estatístico significativo na porosidade. Duas interações entre o fator resíduo x polímero e resíduo x dosagem mostraram um p-valor abaixo de 0,05, portanto, sem apresentarem um efeito estatístico significativo da resposta em estudo (Porosidade) ao nível de confiança de 95%.



Legenda: 1: *Eucalyptus grandis* 2: *Pinus caribaea* 3: Casca de arroz

Multiple Range Tests for Porosidade by Residuo

Method: 95,0 percent LSD			
Residuo	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
3	30	31,7787	X
2	30	32,6877	X
1	30	44,0617	X
Contrast	Difference		(+/-) Limits
1 - 2	*11,374		7,12036
1 - 3	*12,283		7,12036
2 - 3	0,909		7,12036

* denota uma diferença estatística significativa.

Variável dependente: **Permeabilidade**

Fatores: **Resíduo**
Polímero
Dosagem

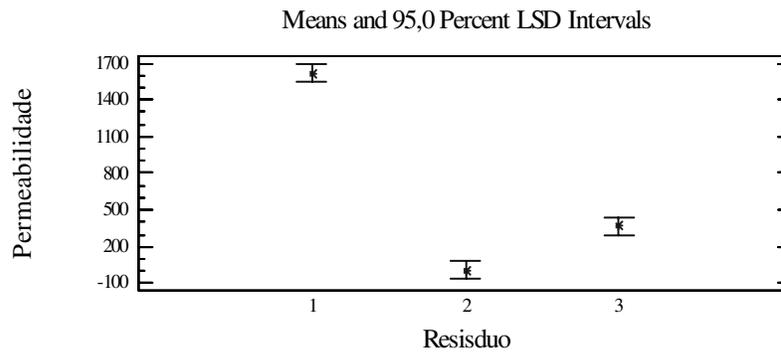
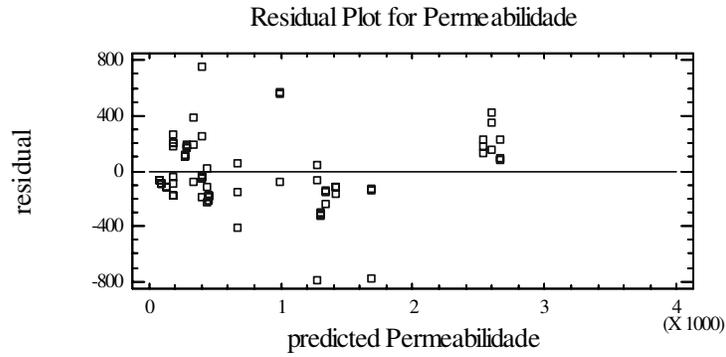
Nº. de casos completos: **90**

Analysis of Variance for Permeabilidade - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Residuo	42901900	2	21450900	297,33	0,0000
B:Polimero	2,98479E+06	1	2,98E+06	41,37	0,0000
C:Dosagem	1,85E+06	4	462712	6,41	0,0002
INTERACTIONS					
AB	5,44E+06	2	2,72E+06	37,27	0,0000
AC	4725550,0	8	590694	8,19	0,0000
BC	1,25E+06	4	313395	4,34	0,0035
RESIDUAL	4905800,00	68	72144,1		
TOTAL (CORRECTED)	64057700,00	89			

Nota: Todas as razões **F** estão baseadas no erro da média residual quadrada.

A tabela de ANOVA mostra três p-valores abaixo de 0,05 para os fatores resíduo, polímero e dosagem, o que significa que todos contribuem significativamente à variabilidade da resposta em estudo (Permeabilidade). Três interações entre os fatores resíduo x polímero, resíduo x dosagem e polímero x dosagem mostraram um p-valor abaixo de 0,05, portanto, indicando um efeito estatístico significativo da resposta em estudo (Permeabilidade) ao nível de confiança de 95%



Legenda: 1: *Eucalyptus grandis* 2: *Pinus caribaea* 3: Casca de arroz

Multiple Range Tests for Permeabilidade by Residuo

Method: 95,0 percent LSD

Residuo	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
2	30	6,06933	X
3	30	368,43	X
1	30	1617,85	X

Contrast	Difference	(+/-) Limits
1 - 2	*1611,78	229,148
1 - 3	*1249,42	229,148
2 - 3	*-362,361	229,148

* denota uma diferença estatística significativa.

Variável dependente: **Absorção**

Fatores: **Resíduo**
Polímero
Dosagem

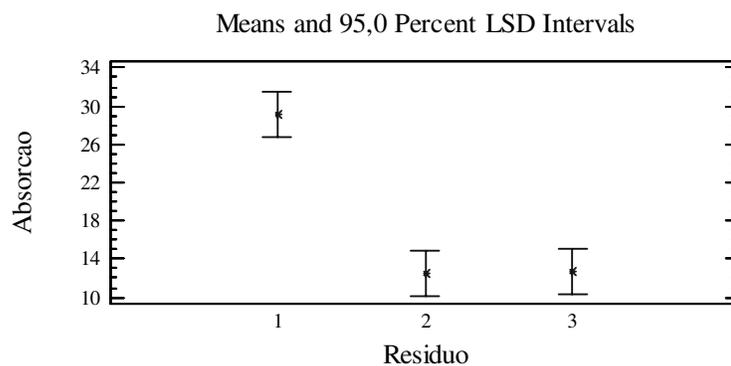
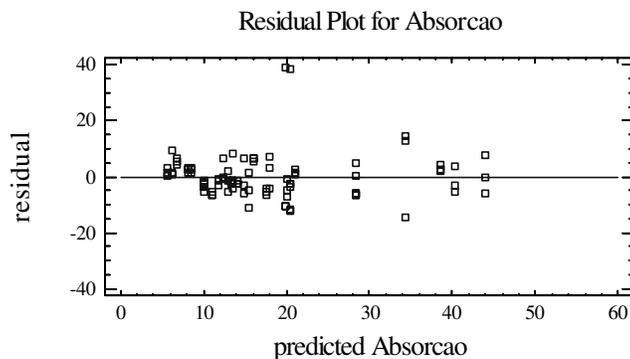
Nº. de casos completos: **90**

Analysis of Variance for Absorção - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Residuo	5530,3	2	2765,15	32,93	0,0000
B:Polimero	301,108	1	301,108	3,59	0,0625
C:Dosagem	254,416	4	63,6039	0,76	0,5566
INTERACTIONS					
AB	2019,33	2	1009,67	12,02	0,0000
AC	923,831	8	115,479	1,38	0,2231
BC	145,211	4	36,3027	0,43	0,7848
RESIDUAL	5709,92	68	83,9694		
TOTAL (CORRECTED)	14884,10	89			

Nota: Todas as razões **F** estão baseadas no erro da média residual quadrada.

A tabela de ANOVA mostra um p-valor abaixo de 0,05 para o fator resíduo, o que significa que contribui significativamente à variabilidade da resposta em estudo (Absorção). Porém, foram observados dois p-valores acima de 0,05 para os fatores polímero e dosagem, significando que os mesmos não contribuem significativamente. Duas interações entre os três fatores apresentaram um p-valor acima de 0,05, portanto, não apresentaram um efeito estatístico significativo na absorção. Uma interação entre o fator resíduo x polímero mostrou um p-valor abaixo de 0,05, portanto, mostrou um efeito estatístico significativo da resposta em estudo (Absorção) ao nível de confiança de 95%.



Legenda: 1: *Eucalyptus grandis* 2: *Pinus caribaea* 3: Casca de arroz

Multiple Range Tests for Absorção by Residuo

Method: 95,0 percent LSD			
Residuo	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
2	30	12,4843	X
3	30	12,619	X
1	30	29,18	X
Contrast	Difference		(+/-) Limits
1 - 2	*16,6957		5,32049
1 - 3	*16,561		5,32049
2 - 3	-0,134667		5,32049

* denota uma diferença estatística significativa.

Variável dependente: **Condutividade térmica**

Fatores: **Resíduo**
Polímero
Dosagem

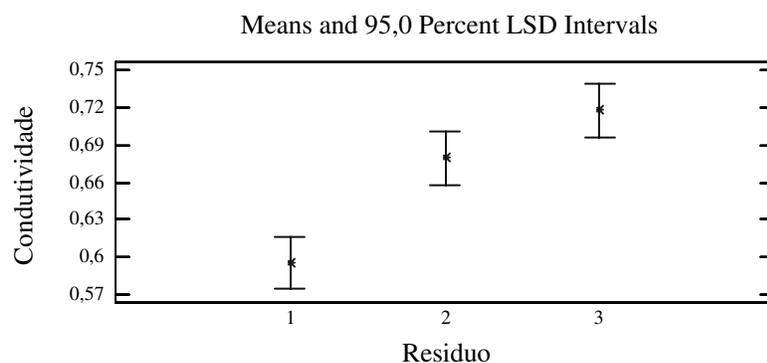
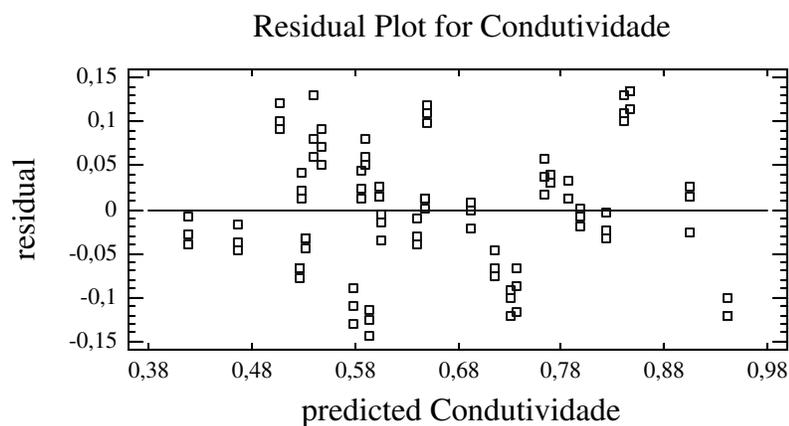
Nº. de casos completos: **90**

Analysis of Variance for Condutividade térmica - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Residuo	0,235096	2	0,117548	17,11	0,0000
B:Polimero	0,028801	1	0,028801	4,19	0,0445
C:Dosagem	0,218516	4	0,0546289	7,95	0,0000
INTERACTIONS					
AB	0,422136	2	0,211068	30,71	0,0000
AC	0,511971	8	0,063996	9,31	0,0000
BC	0,157027	4	0,039257	5,71	0,0005
RESIDUAL	0,467287	68	0,00687186		
TOTAL (CORRECTED)	2,04083	89			

Nota: Todas as razões **F** estão baseadas no erro da média residual quadrada.

A tabela de ANOVA mostra três p-valores abaixo de 0,05 para o fator dosagem, o que significa que o mesmo contribui significativamente à variabilidade da resposta em estudo (Condutividade térmica). Três interações entre o fator resíduo x dosagem mostraram p-valor abaixo de 0,05, portanto, denotando um efeito estatístico significativo da resposta em estudo (Condutividade térmica) ao nível de confiança de 95%.



Legenda: 1: *Eucalyptus grandis* 2: *Pinus caribaea* 3: Casca de arroz

Multiple Range Tests for Condutividade térmica by Residuo

Method: 95,0 percent LSD			
Residuo	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
2	30	0,596	X
3	30	0,679	X
1	30	0,718667	X

Contrast	Difference	(+/-) Limits
1 - 2	*-0,083	0,0427108
1 - 3	*-0,122667	0,0427108
2 - 3	-0,0396667	0,0427108

* denota uma diferença estatística significativa.