
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
MESTRADO

UTILIZAÇÃO DA POLPA DE SISAL COMO
ELEMENTO DE REFORÇO DO CONCRETO LEVE

DISSERTAÇÃO

JOSÉ ALTAIR DOS SANTOS PADILHA

Campina Grande – Paraíba
Novembro – 1999

**UTILIZAÇÃO DA POLPA DE SISAL COMO ELEMENTO DE REFORÇO DO
CONCRETO LEVE**

**JOSÉ ALTAIR DOS SANTOS PADILHA
ENGENHEIRO AGRÍCOLA**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola do centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre.

Área de Concentração: Construções Rurais

Orientador: Prof. Dr. ROMILDO DIAS TOLÊDO FILHO

Co-orientadora: Prof^ª. Dr.^a. LAURA HECKER DE CARVALHO

**Campina Grande - PB
1999**

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central - UFPB

P123u Padilha, José Altair dos Santos
Utilização da polpa de sisal como elemento de reforço do concreto leve/ José Altair dos Santos Padilha. Campina Grande, UFPB, 1999.
130p: il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba – Departamento de Engenharia Agrícola.

1. Construções Rurais 2. Sisal
3. Materiais leves – construção civil
4. Vermiculita – compósito
5. Tijolo – propriedades mecânicas
6. Compósitos de materiais – construção civil

CDU 691.54-037.162



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

COPEAG - PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

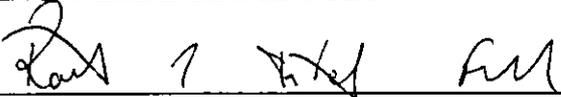
PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DO MESTRANDO

JOSÉ ALTAIR DOS SANTOS PADILHA

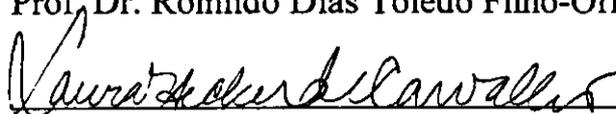
Título: "Utilização da polpa de sisal como elemento de reforço do concreto leve".

BANCA EXAMINADORA

PARECER


Prof. Dr. Romildo Dias Toledo Filho-Orientador

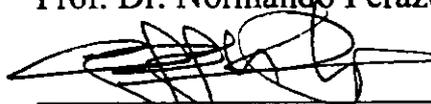
APROVADO


Profa. Dra. Laura Hecker de Carvalho-Orientadora

Aprovado


Prof. Dr. Normando Perazo Barbosa-Examinador

Aprovado


Prof. Dr. Joseph Kuruvilla-Examinador

APROVADO

Campina Grande, 12 de novembro de 1999

DEDICATÓRIA

À minha noiva Sandra.

Aos meus pais João e Antoninha.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pela vida;

Ao professor Dr. Romildo Dias Tolêdo Filho, pela orientação e constante encorajamento dados durante a realização dessa pesquisa. Sempre disposto em dividir seus conhecimentos e procurando transmitir de forma clara e, com a seriedade de um pesquisador nato, que foram fundamentais para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

A professora Dr^a. Laura Hecker de Carvalho, pela orientação dada quando o professor Romildo estava no Rio de Janeiro.

Ao professor Joseph Kuruvila, pelas sugestões, comentários e discussões durante a pesquisa que foram importantes para execução do presente trabalho.

Ao professor Paulo Roberto Lopes do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Feira de Santana, Bahia, e aluno de Doutorado de Programa de Engenharia – COPPE/UFRJ, pela execução dos ensaios de condutividade térmica e variações dimensionais.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola;

Ao professor Dr. Juarez Benigno Paz, pela ajuda para o beneficiamento da polpa de sisal;

Ao professor Antônio Leal, pelas sugestões e confecção dos moldes para os corpos-de-prova e do equipamento de sucção para retirada de água das misturas.

Ao professor Dr. Marco Antônio dos Santos, pelo seu apoio na utilização da MTS, na realização dos ensaios mecânicos.

Ao professor Dr. José Jackson Carneiro Carvalho, pelo empréstimo da ploter XY.

Aos colegas do curso de pós-graduação, pela convivência e amizade, em especial a João Farias, Juães, Humberto, Daniel, Caroline, Marineide, Celso, Gustavo, Cícero, Paulo, Nildo, Severino e Eugenio.

Ao aluno de iniciação científica Josileido Gomes, pela ajuda na confecção e ensaios dos corpos-de-prova.

Ao Laboratório da Tecnologia da Madeira, Departamento de Engenharia Florestal, UFPB, pelo beneficiamento da polpa de sisal;

Aos Laboratórios de Solos I e Solos III, Departamento de Engenharia Civil, UFPB, pelo espaço concedido e pela confecção dos corpos-de-prova;

Ao Laboratório de Mecânica, Departamento de Mecânica, UFPB, pela execução dos ensaios em compressão e flexão dos corpos-de-prova;

Ao Laboratório de materiais (LABEM), Departamento de Engenharia Civil/ Departamento da Tecnologia da construção Civil, UFPB, pelo uso da autoclave;

Ao Laboratório de Construções Rurais e Ambiente (LACRA), Departamento de Engenharia Agrícola, UFPB, pela concessão de equipamentos para realização dos moldes dos corpos-de-prova;

Ao Laboratório de Irrigação e Salinidade, Departamento de Engenharia Agrícola, UFPB, pela concessão de equipamentos para testes para confecção de corpos-de-prova;

Este trabalho afastou-me de casa mas sempre contei com o amor e apoio incondicional dos meus pais, João Maria Rodrigues Padilha e Antoninha dos Santos Padilha, e dos meus irmãos Maria Julia, João Lauro, Velonir, Marcos, Jocemar, Elaine e Cátia.

Sandra Marisa minha noiva que sempre me incentivou, encorajou e me deu confiança para perseverar em minhas idéias bem como forças para trabalhar com grande dedicação. A ela, meu mais profundo amor, respeito e gratidão.

Ao Banco do Nordeste, pelo financiamento desta pesquisa.

A todas as pessoas que contribuíram nesta minha caminhada.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE QUADROS	viii
LISTA DE SÍMBOLOS	ix
RESUMO	Xi
ABSTRACT	xii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 TIPOS DE FIBRAS VEGETAIS	5
2.2 FIBRA DE SISAL E SUA DISPONIBILIDADE NO BRASIL	5
2.3 OBTENÇÃO DAS FIBRAS DE SISAL	6
2.4 RESÍDUOS DA PRODUÇÃO DO SISAL	7
2.5. POLPA DE CELULOSE E DE FIBRAS VEGETAIS	8
2.6 PROPRIEDADES DAS POLPAS DE SISAL BAMBU E PINHO	10
2.7 CONCRETO LEVE	11
2.7.1 Vermiculita como agregado para o concreto leve	14
2.8 COMPÓSITOS COM POLPA DE CELULOSE E COM POLPA DE SISAL E BAMBU	15
2.8.1 Compósitos com polpa de celulose	15
2.8.2 Compósitos com polpa de sisal e bambu	18
3. MATERIAL E MÉTODOS	21
3.1 MATERIAIS	21
3.1.1 Material de reforço	21
3.1.1.1 Polpa de sisal	22
3.1.1.2 Polpa de bambu	22
3.1.1.3 Fibra de sisal	23
3.1.2 Cimento Portland	23
3.1.4 Agregados	24
3.1.4.1 Areia	24

Sumário

3.1.4.2 Vermiculita	25
3.1.5 Água	26
3.2 MÉTODOS	26
3.2.1 Métodos de produção e cura dos compósitos	26
3.2.1.1 Produção dos compósitos sem uso de energia de prensagem e curados em água e autoclave	26
3.2.1.1.1 Preparo da mistura	26
3.2.1.1.2 Moldagem, cura e métodos de ensaios	27
3.2.1.2 Produção dos compósitos com energia de prensagem e curados em água	39
3.2.1.2.1 Preparo da mistura	40
3.2.1.2.2 Moldagem sob compressão, cura e métodos de ensaios	42
3.2.2 Programa experimental	47
3.2.2.1 Misturas sem uso de energia de prensagem e curados em água	47
3.2.2.2 Misturas sem uso de energia de preparação e curada em autoclave	50
3.2.2.3 Misturas moldadas com de energia de prensagem e curadas em água	51
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	52
4.1 Propriedades físicas dos compósitos	52
4.1.1 Densidade aparente, absorção de água e índice de vazios	52
4.1.2 Massa específica unitária seca em estufa, absorção de água e variações dimensionais até a saturação das placas compósitas	66
4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS	70
4.2.1 Resistência à compressão	70
4.2.1.1 Resistência à compressão dos compósitos produzidos sem energia de prensagem e curadas em água	70
4.2.1.2 Influência da fração em massa de polpa, do teor de vermiculita e do fator água/cimento na resistência à compressão - análise do desenho fatorial 2 ³	70
4.2.1.3 Influência do tipo de polpa, e da polpa de sisal mais fibra de sisal na resistência à compressão	74
4.2.1.4 Influência da substituição parcial da areia por vermiculita	75
4.2.1.2 Resistência à compressão dos compósitos curadas em autoclave	78
4.2.1.3 Resistência à compressão das amostras moldadas com energia de prensagem	82

Sumário

4.2.2 Resistência à flexão	84
4.2.2.1. Influência da fração em massa de polpa, do teor de vermiculita e do fator água/cimento na resistência à flexão - análise do desenho fatorial 2^3	84
4.2.2.2 Resistência à flexão dos compósitos produzidos sem energia de prensagem e curadas em água	88
4.2.2.3 Influência do tipo de polpa	92
4.2.2.4 Influência da fibra de sisal em acréscimo à polpa	96
4.2.2.4 Resistência à flexão dos compósitos curado em autoclave	99
4.2.2.5 Resistência à flexão dos compósitos produzidos com energia de prensagem e curadas em água	103
4.3 CONDUTIVIDADE TÉRMICA DOS COMPÓSITOS	105
5. CONCLUSÕES	110
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - Microestrutura dos compósitos a base de fibras de madeira	18
FIGURA 3.1 – Argamassadeira utilizada	27
FIGURA 3.2 – Prensa LOSENHOUSI’V usada no ensaio de	29
FIGURA 3.3 – Prensa MTS usada no ensaio de compressão curadas	29
FIGURA 3.4 – Corpo-de-prova de compressão colocado	30
FIGURA 3.5 – Detalhe do molde dos corpos-de-prova de flexão	31
FIGURA 3.6 – Corpos-de-prova na mesa vibratória	31
FIGURA 3.7- Equema do ensaio de flexão em quatro pontos realizado na MTS	32
FIGURA 3.8 –Moldes e corpos-de-prova utilizados no ensaio de condutividade térmica	33
FIGURA 3.9 – Detalhes do ensaio da condutividade térmica. 1 - placa quente; 2 - amostra; 3- placa fria; 4 e 5 – termômetros para medição de temperatura da placa fria; 6 – termômetro para medir a temperatura da seção de medição; 7 – medidor de temperatura do anel de guarda	35
FIGURA 3.10 - Mesa para medição da condutividade térmica com instrumentos de medição. 1 – voltímetro; 2 – amperímetro; 3 – controle de vazão de água fria; 4 – controle de potência elétrica; 5 – caixa isolante	35
FIGURA 3.11 – Balança hidrostática utilizada para medição do peso em água do corpo-de-prova saturado	38
FIGURA 3.12 – Gabarito de leituras usado no ensaio de variações dimensionais	39
FIGURA 3.13 – Balde com areia, vermiculita, polpa e cimento dispersos em água.	40
FIGURA 3.14 – Equipamento utilizado para retirar, por sucção, a água da mistura	41
FIGURA 3.15 - Tendência de deposição dos finos no papel de filtro.	41
FIGURA 3.16 - Partes constituintes do molde de compressão	44

FIGURA 3.17 – Esquema de confecção dos corpos-de-prova em compressão sob pressão	44
FIGURA 3.18 – Esquema de desmoldagem dos corpos-de-prova	45
FIGURA 3.19 - Partes constituintes do molde de flexão. (a) molde com placa de aço de base. (b) placa de aço usada para compactação das amostras, (c) molde com chapa tipo cantoneira usada na desmoldagem.	46
FIGURA 3.20 – Esquema de confecção, sob pressão, dos corpos-de-prova de flexão	46
FIGURA 3.21 - Corpo-de-prova de flexão após a prensagem	46
FIGURA 3.22 – Desenho fatorial 2^3	48
FIGURA 4.1 - Densidade aparente dos compósitos em função da fração em massa de polpa, do tipo de polpa e do teor polpa de sisal +fibra de sisal presente na mistura	54
FIGURA 4.2 - Densidade aparente dos compósitos em função da relação vermiculita/areia presente na mistura	55
FIGURA 4.3 - Densidade aparente dos compósitos em função do tipo de cura	55
FIGURA 4.4 – Densidade aparente dos compósitos em função do processo de produção	56
FIGURA 4.5 - Absorção de água dos compósitos em função em função da porcentagem de polpa na mistura	58
FIGURA 4.6 - Absorção de água dos compósitos em função da relação vermiculita/areia na mistura	58
FIGURA 4.7 - Absorção de água dos compósitos em função do tipo de cura	59
FIGURA 4.8 - Absorção de água dos compósitos em função processo de produção	60
FIGURA 4.9 – Relação entre absorção de água e densidade aparente	61
FIGURA 4.10 – Relação de absorção de água versus densidade aparente observada na literatura e no presente estudo	62
FIGURA 4.11 - Índice de vazios dos compósitos em função da fração em massa de polpa na mistura.	63

FIGURA 4.12 - Índice de vazios dos compósitos em função da relação vermiculita/areia na mistura.	65
FIGURA 4.13 - Índice de vazios dos compósitos em função em função do tipo de cura	65
FIGURA 4.14 - Índice de vazios dos compósitos em função do processo de produção	66
FIGURA 4.15 – Variação da absorção de água em função da massa específica seca em estufa.	68
FIGURA 4.16 – Variação dimensional em função da massa específica seca em estufa.	69
FIGURA 4.17 – Valores médios dos ensaios da resistência à compressão, em MPa e coeficiente de variação, CV, em (%)	71
FIGURA 4.18 – Resistência de compressão em função da fração em massa	74
FIGURA 4.19 – Resistência de compressão em função da relação vermiculita/areia	76
FIGURA 4.20 – Resistência de compressão em função da densidade aparente	77
FIGURA 4.21 – Relação entre o módulo de elasticidade e a densidade aparente para os compósitos curados em autoclave	79
FIGURA 4.22 – Curva tensão-deformação das misturas M1 e M2 curadas em autoclave	81
FIGURA 4.23 – Curva tensão-deformação das misturas M5 e M18 curadas em autoclave	81
FIGURA 4.24 – Curva tensão-deformação das misturas M9, M10 e M13 curadas em autoclave	82
FIGURA 4.25 – Curva tensão deformação das misturas moldadas com energia de prensagem	84
FIGURA 4.26 – Valores médios dos ensaios da resistência à flexão, em MPa e coeficiente de variação, CV, em (%).	85
FIGURA 4.27 - Curva carga-deflexão das matrizes curadas em água	89
FIGURA 4.28 - Curva carga-deflexão para as misturas M1, M2 e M16 curadas em água	90
FIGURA 4.29 - Curva carga-deflexão para as misturas M9, M10, M13 e M17 curadas em Água	91

FIGURA 4.30 - Curva carga-deflexão para as misturas M5, M6 e M18 curadas em água	91
FIGURA 4.31- Curva carga-deflexão para os compósitos com 2% de polpa de sisal e Bambu	93
FIGURA 4.32 – Curva carga-deflexão para os compósitos com 3% de polpa de sisal e Bambu	94
FIGURA 4.33 – Curva carga-deflexão para os compósitos com 4% de polpa de sisal e Bambu	94
FIGURA 4.34 – Curva carga-deflexão para os compósitos com 5% de polpa de sisal e Bambu	95
FIGURA 4.35 – Curva carga-deflexão para os compósitos com 5% de polpa de sisal e Bambu	95
FIGURA 4.36 – Curva carga-deflexão para os compósitos com 2% de polpa de sisal e polpa com adição de fibra de sisal	97
FIGURA 4.37 – Curva carga-deflexão para os compósitos com 3% de polpa de sisal e polpa com adição de fibra de sisal	97
FIGURA 4.38 – Curva carga-deflexão para os compósitos com 4% de polpa de sisal e polpa com adição de fibra de sisal	98
FIGURA 4.39 – Curva carga-deflexão para os compósitos com 5% de polpa de sisal e polpa com adição de fibra de sisal	98
FIGURA 4.40 – Curva carga-deflexão para os compósitos com 6% de polpa de sisal e polpa com adição de fibra de sisal	99
FIGURA 4.41 – Curva carga-deflexão para as misturas M16, M17 e M18 curadas em Autoclave	101
FIGURA 4.42- Curva carga-deflexão para as misturas M1, M2 e M16 curadas em Autoclave	102
FIGURA 4.43 - Curva carga-deflexão para as misturas M9, M10, M13 e M17 curadas em Autoclave	102
FIGURA 4.44 - Curva carga-deflexão para as misturas M18, M5 e M6 curadas em Autoclave	103
FIGURA 4.45 – Curva carga-deflexão para a matriz M16 e a mistura M1 moldadas com energia de prensagem	104

FIGURA 4.46 – Curva carga-deflexão para a matriz M18 e as misturas M5 e M10 moldadas com energia de prensagem	106
FIGURA 4.47 - Influência da polpa de sisal na massa específica e Condutividade térmica de argamassas	107
FIGURA 4.48 – Influência da vermiculita na massa específica e condutividade das térmica de argamassas	107
FIGURA 4.49 – Influência da polpa de sisal (2%) e vermiculita (25%) na massa específica e condutividade térmica de argamassas	108
FIGURA 4.50 – Influência da polpa de sisal (2%) e vermiculita (50%) na massa específica e condutividade térmica de argamassas	109

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 – Valores médios e coeficiente de variação da densidade aparente dos compósitos	53
TABELA 4.2 – Valores médios e coeficiente de variação da absorção de água por imersão dos compósitos	57
TABELA 4.3 – Resultados experimentais e previstos pela equação 4.1	61
TABELA 4.4 – Valores médios e coeficiente de variação do índice de vazios dos compósitos.	63
TABELA 4.5 . Valores da massa unitária, absorção de água e variações dimensionais até a saturação das placas compósitas	67
TABELA 4.6 – Resultados experimentais e previstos pela equação	67
TABELA 4.7 – Efeitos principais e interações	71
TABELA 4.8 – Análise de variância	72
TABELA 4.9 – Resultados experimentais e previstos pelo modelo para resistência à compressão	73
TABELA 4.10 – Resultados previstos e observados da resistência à compressão em níveis intermediários	73
TABELA 4.11– Valores de resistência à compressão média e cv para os compósitos reforçados com polpa de sisal (ps), bambu (pb) e polpa de sisal+fibras de sisal (ps+fs)	74
TABELA 4.12 – Resistência à compressão de compósitos com substituição da areia por vermiculita	76
TABELA 4.13 – Resistência à compressão e módulo de elasticidade para as misturas curadas em água e em autoclave	78
TABELA 4.14 - Comparação do módulo de elasticidade medido com o previsto pelo ACI	80
TABELA 4.15 – Resistência à compressão e módulo de elasticidade das misturas moldadas com e sem energia de prensagem	83
TABELA 4.16 – Efeitos principais e interações	86
TABELA 4.17 – Análise de variância	86

TABELA 4.18 – Resultados experimentais e previstos pelo modelo para resistência à flexão	87
TABELA 4.19 – Resultados previstos e observados da resistência em flexão em níveis intermediários	88
TABELA 4.20 - Valores médios de resistência à flexão para amostras curadas em água	88
TABELA 4.21 – Valores médios de resistência à flexão dos compósitos com reforço de polpa de sisal e bambu	92
TABELA 4.22 – Valores médios de resistência à flexão dos compósitos com reforço de polpa de sisal e polpa com adição de fibra de sisal	96
TABELA 4.24 – Valores médios de resistência à flexão dos compósitos curadas em autoclave	100
TABELA 4.25 – Valores médios de resistência à flexão dos compósitos reforçados com polpa de sisal e produzidos com energia de prensagem.	104
TABELA 4.26 – Propriedades térmicas dos compósitos.	106

LISTA DE QUADROS

QUADRO 2.1 – Tipos de buchas oriundas do beneficiamento	8
QUADRO 2.2 - Condições de polpagem da fibra de sisal	10
QUADRO 2.3 - Propriedades físicas e mecânicas das polpas de sisal, bambu e pinho	11
QUADRO 2.4 – Condutividade térmica de vários concretos de baixa densidade.	12
QUADRO 2.5 – Classificação para concretos leves sugerida pelo U.S. Bureau of Reclamation	12
QUADRO 2.6 - Classificação funcional dos concretos leves com agregados leves	13
QUADRO 2.7 – Relação de resistência à compressão e densidade de massa máximas	13
QUADRO 2.8 – Principais características dos compósitos a base de fibras de madeira	16
QUADRO 2.9 – Propriedades dos compósitos a base de fibras de madeira	18
QUADRO 2.10 - Teor de umidade, absorção de água, máxima expansão linear, retração por secagem, resistência ao impacto e módulo de ruptura dos compósitos com polpa de sisal, bambu e pinho.	20
QUADRO 3.1 – Propriedades físicas e mecânicas da fibra de sisal	23
QUADRO 3.2 – Composição química do cimento portland utilizado	24
QUADRO 3.3 – Ensaio de granulometria da areia	25
QUADRO 3.4 – Ensaio de granulometria da vermiculita expandida	25
QUADRO 3.5 – Quantidade de água usada nas misturas.	42
QUADRO 3.6 – Desenho fatorial 2^3	49
QUADRO 3.7 – Misturas estudadas para se analisar o modelo matemático	49
QUADRO 3.8 – Traço para as matrizes usadas	50
QUADRO 3.9 – Misturas moldadas com energia de prensagem	51

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Área
ABS	Absorção de água
ABS _{sat}	Absorção de água até a saturação
B	Largura do corpo-de-prova
C	Cimento
CV	Coefficiente de variação
D _{Ap}	Densidade aparente
e	Espessura
E	Módulo de elasticidade
E _c	Módulo de elasticidade do compósito
F _s	Fibra de sisal
σ_c	Resistência à compressão
i	Índice de vazios
I	Intensidade da corrente elétrica, em ampere.
l	Comprimento da fibra
L _h	Comprimento após saturação completa
L _s	Comprimento após secagem em estufa
M	Momento fletor
MF	Módulo de finura
MOR	Resistência à flexão
K	Condutividade térmica
pb	Polpa de bambu
ps	Polpa de sisal

PH	Peso do corpo de prova úmido
Pi	Peso em água do corpo-de-prova úmido
PS	Peso seco do corpo-de-prova
q_x	Fluxo de calor
Q_x	Taxa de fluxo de calor
r	Resistividade térmica
R	Resistência térmica da placa
V	Voltagem em volts
ΔL	Variação dimensional
\square	Condutância térmica
ε	Deformação
ν	Vermiculita
σ	Tensão de compressão
γ	Massa específica do concreto
γ_s	Massa específica seca em estufa

ALTAIR DOS SANTOS PADILHA, José. Utilização da Polpa de Sisal como Elemento de Reforço do Concreto Leve. Campina Grande, 1999. 118p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Paraíba.

O presente estudo visou o desenvolvimento de materiais compósitos leves reforçados com o resíduo do desfibramento da fibra de sisal na forma de polpa. A fibra de sisal e a polpa de bambu foram também utilizadas na investigação. Foram determinadas as propriedades físicas (densidade, absorção de água, índice de vazios e variações dimensionais) e mecânicas (resistência à compressão e flexão) dos compósitos bem como sua condutividade térmica. Além da cura em água procedeu-se a cura dos compósitos em autoclave visando melhorar as suas propriedades mecânicas. Uma técnica de produção usando energia de prensagem foi estudada com o objetivo de se produzir compósitos estruturais. A densidade dos compósitos variou de 900 a 1700 kg/m³ dependendo do traço, tipo de cura e processo produtivo utilizado. A absorção de água variou de 31 a 65% enquanto que o índice de vazios variou de 39,1 a 53,8%. Os compósitos apresentaram variações dimensionais variando de 0,97 a 2,29 mm/m. Os resultados obtidos indicaram valores de resistência à compressão variando de 0,89 a 35,0 MPa e módulo de ruptura de 0,45-3,13 MPa. A condutividade térmica dos compósitos variou de 0,16-0,44 W/m.K dependendo do teor de polpa de sisal e vermiculita presente na mistura. Com estes resultados os compósitos polpa de sisal-argamassa de vermiculita podem ser utilizados, dependendo do traço, tipo de cura e método de produção, como materiais isolantes, na produção de painéis divisórios e de componentes habitacionais, assim como na produção de elementos estruturais.

Palavras-chave: compósito; polpa de sisal; propriedades físicas e mecânicas.

ABSTRACT

ALTAIR DOS SANTOS PADILHA, José. *Use of sisal pulp as reinforcement of light-weight concrete*. Campina Grande, 1999. 118p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Paraíba.

The main objective of this study was to develop composite materials reinforced with sisal pulp. Sisal fibres and bamboo pulp were also used in the investigation. It was determined the physical (density, water absorption, volume of voids and dimensional changes) and mechanical (compressive and flexural strength) properties of the composites as well as its thermal conductivity. Besides the water curing the composites were cured in autoclave in order to improve its mechanical performance. Compression moulding was used in order to produce composites for structural applications. The density of the composites ranged from 900 to 1700 kg/m³ depending on the mix proportion, type of cure and method of production. The water absorption ranged from 31 to 65% whereas the volume of voids ranged from 39,1 to 53,8%. The dimensional changes ranged from 0,97 to 2,29 mm/m. Values of compression and flexural strength ranging from, respectively, 0,89 to 35 MPa and 0,45 to 3,13 MPa were observed for the composites. Thermal conductivity values between 0,16 and 0,44 W/m.K were observed depending on the content of sisal pulp and vermiculite present in the mix. The results indicated that depending on the mix proportion, cure condition and production method the composites can be used as insulating material, in the production of partition walls, house components as well as structural elements.

Keywords: composite; sisal pulp; physical and mechanical properties.

1. INTRODUÇÃO

Extensiva pesquisa e desenvolvimento visando a compreensão e aplicação dos concretos reforçados com fibras ainda está ocorrendo em todo o mundo. Essas atividades incluem o desenvolvimento de fibras novas e mais resistentes, o desenvolvimento de compósitos de performance avançada e a substituição de produtos que apresentem algum tipo de desvantagem. Nesse contexto, deve-se destacar a busca por uma alternativa aos produtos a base de asbestos.

O asbestos-cimento encontra larga faixa de aplicação na construção civil mas como esse tipo de fibra pode causar várias doenças, inclusive o câncer, sua utilização é proibida por lei nos países desenvolvidos que buscam alternativas para sua substituição. Vários tipos de fibras manufaturadas tais como a fibra de vidro, polipropileno, poliéster e PVA, têm sido testadas como reforço de matrizes à base de cimento e, embora problemas de sensibilidade de algumas dessas fibras a alta alcalinidade da matriz, baixa adesão à matriz de cimento e a sua instabilidade química se manifestem, produtos têm sido fabricados industrialmente com relativo sucesso nos países desenvolvidos.

Além das fibras manufaturadas, existe a alternativa de se utilizar reforços de origem vegetal tais como a fibra de celulose, coco, juta, sisal, etc. A utilização de celulose como reforço de matrizes frágeis vem sendo estudada desde a década de 40 e desde 1964 as indústrias James Hardie (Austrália) fabricam chapas substituindo o asbestos pelas fibras de celulose obtendo produtos de excelente qualidade. Os produtos comercializados incluem placas para forro, telhas, elementos de fachadas, tubos de baixa pressão para irrigação bem como elementos para alvenaria estrutural.

No Brasil a variedade e abundância das fibras vegetais as tornam atrativas para serem usadas como reforço de matrizes a base de cimento. Dentre elas destaca-se a fibra de sisal. A utilização da fibra de sisal é importante para o país uma vez que o Brasil é o principal produtor mundial dessa fibra e sua produção é fonte de renda e subsistência para mais de 1 milhão de pessoas. Além da fibra beneficiada, é possível a utilização do resíduo do desfibramento, do beneficiamento e do processamento industrial que, juntos, representam um desperdício de cerca de 40% do total de fibra seca que pode ser extraída das folhas. Tal aproveitamento poderá aumentar a receita da agroindústria do sisal, agregando valor à cultura e beneficiando as famílias que sobrevivem do sisal. Na presente dissertação estudou-se o uso da bucha, transformada em polpa, como elemento de reforço.

As matrizes de cimento portland normalmente utilizadas para produção de materiais compósitos são o concreto, a argamassa e a pasta. A grande maioria dos estudos disponíveis na literatura utiliza matrizes com agregados de densidade normal. Na presente dissertação utilizou-se a vermiculita expandida como agregado leve na composição da matriz. Estes concretos possuem importantes características de engenharia quais sejam, baixo peso próprio e elevado isolamento térmico.

O principal objetivo do presente trabalho foi, portanto, desenvolver um compósito leve reforçado com resíduo da produção de sisal. A fibra de sisal e a polpa de bambu foram também utilizadas na investigação. Foram determinadas as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos bem como sua condutividade térmica. Além da cura em água procedeu-se a cura dos compósitos em autoclave visando melhorar as suas propriedades. Uma técnica de produção usando energia de prensagem foi também estudada. A meta principal desta pesquisa é, portanto, desenvolver materiais compósitos leves e resistentes para serem utilizadas na produção de elementos de cobertura, e revestimento, painéis divisórios, e componentes habitacionais e como isolantes térmicos. Devido a disponibilidade do material e do seu baixo custo, espera-se que a utilização de compósitos a base de sisal na construção civil ajudem a reduzir o custo final das habitações, representando uma alternativa viável para a solução do problema da habitação popular e da baixa infra-estrutura das propriedades rurais, que é insuficiente e inadequada para atender às necessidades das populações, no que se refere a obras de apoio à produção

agrícola, à habitação, ao saneamento, à educação e ao lazer. Além disso, espera-se que o mesmo seja uma alternativa aos produtos a base de asbestos.

A presente dissertação está dividida em seis capítulos:

Capítulo 1 - esse capítulo apresenta uma introdução geral a área de interesse desse trabalho e define os objetivos do trabalho de pesquisa.

Capítulo 2 - nesse capítulo faz-se uma revisão bibliográfica sobre a fibra de sisal descrevendo os métodos de obtenção e os resíduos gerados nas várias etapas do seu processo de obtenção e industrialização; os métodos de obtenção da polpa de celulose e de fibras vegetais; as suas propriedades físicas e mecânicas das polpas; as características e propriedades dos concretos leves e dos compósitos reforçados com polpas.

Capítulo 3 - são apresentados o material e os métodos usados no desenvolvimento do presente estudo.

Capítulo 4 - nesse capítulo faz-se a apresentação e análise dos resultados.

Capítulo 5 - esse capítulo apresenta as conclusões obtidas da presente investigação.

Capítulo 6 – apresenta as referências bibliográficas citadas na dissertação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TIPOS DE FIBRAS VEGETAIS

As fibras naturais vegetais podem ser obtidas das folhas, talo, lenho e fruto das plantas. As fibras obtidas das folhas têm origem nas plantas monocotiledôneas. Elas ocorrem em feixes com extremidades sobrepostas, produzindo filamentos contínuos através do comprimento da folha. São ligadas umas às outras através da lignina e têm como função conferir resistência à folha e dar suporte aos vasos de condução de água do vegetal. Obtém-se as fibras através do desfibramento mecânico ou manual. As principais fibras das folhas são: sisal (*Agave sisalana*), cantala (*Agave catala*) e canton (*Canton*), sansevieria (*Sansevieria*), caroá (*Caroa*), pita floja (*Aecheme mogdalene*) e fibra de banana (*Musa sapientum*). Das fibras das folhas, o sisal é o de maior importância econômica. O sisal é uma planta tropical, quase acaulescente, possuindo folhas rígidas, lisas, verde-brilhantes com cerca de 100 mm de largura e 1500 mm de comprimento que rendem, no desfibramento, de 2% a 5,5% de fibras secas. As fibras são aplicadas na manufatura de cordoalhas em geral, na fabricação de estofamentos, tapetes, artesanatos, etc. Sua resistência e módulo de elasticidade são relativamente elevados, possibilitando seu uso como elemento de reforço de materiais compósitos (COOK, 1980; TOLÊDO FILHO, 1997a).

As fibras obtidas do talo ou do tronco têm origem em plantas dicotiledôneas. Ocorrem no floema, que fica na entrecasca do talo. Os feixes de fibras são

unidos entre si e mantidos no lugar pelo tecido celular do floema e pelas substâncias gomosas e graxas. Obtém-se as fibras, colocando-se os talos em tanques de água quente ou deixados espalhados no chão, permitindo que a ação das bactérias dissolvam o material que envolve as fibras. São usadas essencialmente na indústria têxtil. As principais fibras são: juta (*Chorchorus*), rami (*Boehmeria nivea* ou *Boehmeria tenacissemata*), cânhamo (*Cannabis sativa*), linho (*Linum usitatissimum*), sunn (*Crotalaria juncea*), kenaf (*Hibiscus cannabinus*), urena (*Urena lobata*) e piaçava (*Attalea funifera*) (COOK, 1980).

As fibras obtidas do lenho ou de madeiras são curtas, grossas e inflexíveis. Processa-se os pedaços de madeira em várias soluções, e, sujeitos a tratamentos mecânicos, extrai-se as fibras de celulose de boa qualidade na forma de polpa. As principais são fibras de bambu, de bagaço de cana, etc. As fibras de superfície formam uma camada protetora de caules, folhas, frutos e sementes das plantas. As principais são as fibras de coco e algodão (COOK, 1980).

2.2 FIBRA DE SISAL E SUA DISPONIBILIDADE NO BRASIL

O agave sisalana perrine é predominante nos estados da região Nordeste, onde o ecossistema é ideal para seu desenvolvimento. Segundo dados de 1997 a Bahia é o maior produtor nacional com cerca de 80% por cento da produção (cerca de 100.000 toneladas) seguido pela Paraíba com cerca de 15% (cerca de 20.000) e os estados do Rio Grande do Norte, Pernambuco e Ceará (SANTOS, 1997 citado por BARROS e tal, 1999).

Na Paraíba a produtividade atinge cerca de 800 kg/ha o que, considerando-se a produção nacional, está dentro dos padrões; porém, se compararmos com os países produtores no continente africano, que atingem cerca de 2000 kg/ha, é bastante reduzida. Isso se deve aos seguintes fatores: (i) falta de orientação técnica quanto à planificação da cultura, causando a má implantação dos campos de sisal. (ii) má conservação dos campos, devido à falta de tratamentos culturais. (iii) Campos decadentes, com idade acima de doze anos. (iv) cortes excessivos das folhas, muitas vezes antes do tempo (BARROS, 1999).

2.3 OBTENÇÃO DAS FIBRAS DE SISAL

Segundo CARVALHO FILHO (1990), a obtenção das fibras de sisal envolve atividades no campo e em unidades de beneficiamento, obedecendo ao seguinte roteiro:

(i) na época adequada para a colheita, essa é feita por trabalhadores braçais, através de uma foice curvada, cortando a folha próxima de sua base. Para garantir o ciclo vegetativo da planta deve-se manter intactas de 4 a 5 folhas além do esteme central de folhas fechadas que é denominado de vela. Cada planta fornece, em média, 15 a 20 folhas por colheita;

(ii) concluído o corte, as folhas são levadas até o local onde se encontram as máquinas de desfibramento. As máquinas mais comuns possuem um rotor que é movido por um motor à óleo diesel, com potência de 9 HP, sendo operado a uma velocidade de 1800-2000rpm. Elas são capazes de desfibrar uma tonelada de fibra seca por semana (turno de 10 horas/dia de trabalho), o que é considerado um número baixo para os níveis atuais de produção. As máquinas são chamadas de "motor de agave" ou "máquina Paraíba". As máquinas são constituídas de lâminas de aço que durante seu movimento promovem a raspagem da mucilagem contida nas folhas aplicando golpes simultâneos. As folhas são introduzidas uma a uma e, inicialmente, são inseridas até o terço médio do seu comprimento sendo então retiradas e entregues ao segundo puxador que as introduz até a parte não raspada. Busca-se sempre evitar a formação de "anéis", ou seja, trechos não raspados. O desperdício de fibras no processo de desfibramento atinge 20-30% das fibras contidas na folha. Na primeira vez que se procede o corte das folhas de uma planta de sisal elas rendem de 2% a 2,5% de fibras em relação a seu peso; em cortes posteriores sobem para valores de 3% a 5,5% resultando num rendimento médio ao longo da vida útil da planta de 3% de fibras. O número de acidentes envolvendo os operadores desse tipo de máquina é muito grande, não sendo raro encontrar trabalhadores com dedos e mãos mutiladas (SILVA et al, 1999).

(iv) após o beneficiamento as fibras se apresentam com uma coloração amarelo-esverdeada, indicando a existência de um certo nível de mucilagem que precisa ser eliminada. Para isso, faz-se uma lavagem por imersão em tanque d'água por um

período de 12 a 15 horas. Após a lavagem estende-se os feixes de fibras em um leito de areia (ou coloca-se os mesmos em um varal) ao ar livre, expostos ao sol para a secagem e branqueamento através dos raios solares. O teor de umidade resultante gira em torno de 14%.

(v) feita a secagem as fibras são transportadas para os depósitos de armazenagem das unidades de beneficiamento. Nessas unidades proceder-se-ão as etapas de escovagem, batadura e seleção das fibras. O desperdício de fibras nessa etapa atinge 10-15% (TOLÊDO FILHO, 1997b).

2.4 RESÍDUOS DA PRODUÇÃO DO SISAL

O Ministério de Agricultura e Abastecimento aprovou portarias (BRASIL, 1987, 1989) que identificam e qualificam a fibra do sisal baseando-se em classes e tipos de fibra. O comprimento é o elemento de maior importância na classificação das fibras, visto que, para as indústrias de cordoalhas é o fator predominante para a automação dos sistemas de produção. O tipo está relacionado com a qualidade de secagem, batimento, escovação e coloração. O nosso interesse, nessa pesquisa, está relacionado com a utilização dos rejeitos pelo seu baixo valor comercial e disponibilidade. São três os tipos de resíduos: a) resíduos da obtenção da fibra (desfibramento das folhas), constituídos das fibras que permanecem misturadas à mucilagem após desfibramento e de fibras curtas que caem durante o processo de estiragem entre os pentes da máquina; b) resíduos de beneficiamento constituídos de fibra penteada pela máquina industrializadora e pelo próprio passador; c) resíduos do processamento industrial constituído de fio retorcido, juntamente com fibras, apresentando-se rígido por causa da torção exagerada (CARVALHO FILHO, 1987).

As buchas como são chamadas os resíduos de beneficiamento, podem ser classificadas como mostrado no Quadro 2.1 (SILVA et al, 1999). Esses resíduos de beneficiamento são recolhidos para uma nova seleção, denominada sedagem, que constitui-se em um penteamento manual das fibras para posterior comercialização. Normalmente a comercialização é feita para as indústrias de celulose, em razão do elevado teor da

substância (cerca de 70%) que compõem o sisal, ou para a indústria da construção civil onde essas fibras são usadas na fixação de placas de gesso.

QUADRO 2.1 – Tipos de buchas oriundas do beneficiamento

RESÍDUOS	Bucha Nº1	Bucha Nº2	Bucha Nº3	Aparas
Coloração	Creme-claro uniforme	Amarela, pardacenta, avermelhada e esverdeada	Amarela, pardacenta, avermelhada e esverdeada	Amarela, pardacenta
Proveniência	Secagem, batadura e seleção	Secagem, batadura e seleção	Desfibramento das folhas	Secagem, batadura e seleção
Condições de conservação	Otima	Boa	Boa	Boa
Máximo teor de umidade	14%	14%	14%	14%
Matérias estranhas (mofo e nó)	Isenta	Isenta	Fragmentos de folhas e nós	Isento

Fonte: SILVA et al, 1999.

2.5. POLPA DE CELULOSE E DE FIBRAS VEGETAIS

Chama-se de polpa de celulose e de fibras vegetais ao material decorrente, respectivamente, da decomposição da madeira ou das fibras vegetais usando-se processos mecânicos, termomecânicos, semiquímicos e químicos. A decomposição da madeira ou das fibras resulta na dissolução da lignina e dos extrativos, resultando na celulose/hemicelulose que é, na verdade, o elemento de reforço da madeira e das fibras vegetais (TOLÊDO FILHO, 1999). A polpa de celulose pode ser obtida de madeiras moles (coníferas - do grupo das Gimnospermas) e de madeiras duras (dicotiledôneas - do grupo das Angiosperms). A polpa pode ser também obtida do bambu que é uma gramínea monocotiledônea do grupo das Angiosperms.

Existem várias maneiras de se produzir polpas e algumas delas serão brevemente discutidas:

(i) polpagem mecânica – na separação mecânica das fibras, pedaços de madeiras são prensados por um moinho giratório, imerso em água. As fibras são despedaçadas e enfraquecidas e praticamente toda a madeira é convertida em polpa (cerca de 97%). Algumas vezes a madeira sofre um pré-tratamento térmico ou químico para promover um amolecimento e facilitar o processo mecânico. A polpagem mecânica tem como desvantagens o alto consumo de energia para obtenção da polpa e o fato de produzir uma polpa de qualidade inferior, pois provoca o colapso das fibras e deixa grande quantidade de lignina aderida nas mesmas. São produzidas, freqüentemente, polpas de madeiras leves. As fibras de madeiras duras são menores, mais finas e são danificadas durante a polpagem mecânica (FORDOS, 1988 e COUTTS, 1988);

(ii) polpagem química - o objetivo da polpagem química é degradar e dissolver a lignina deixando a maior parte da celulose e hemicelulose na forma de fibras intactas. Na prática, os métodos de polpagem química removem com sucesso a maioria da lignina. No entanto, eles também degradam uma certa quantidade da hemicelulose e celulose, de forma que o rendimento de polpa (de 40 a 50% do peso da madeira) é baixo em comparação com o observado na polpagem mecânica. Na polpagem química lascas de madeira são cozinhadas com as substâncias químicas em uma solução aquosa sob condições de alta temperatura e elevada pressão. Os dois métodos principais são o processo "kraft" (alcalino) e o processo sulfato (ácido). O processo "kraft" é o mais usado para produção de polpa química. Consiste em cozinhar os pedaços de madeira em sulfeto de sódio, hidróxido de sódio e carbonato de sódio. O processo é feito sob condições alcalinas e a penetração na madeira é muito mais rápida. É aplicável para todo tipo de madeira, tendo uma larga atração industrial. Esse processo, porém, tem custo elevado, pois necessita de uma infra-estrutura adequada, evitando poluições, além da manutenção da infra-estrutura que é agredida pelo meio alcalino. A qualidade do produto final varia de acordo com as proporções usadas mas, em geral, produzem fibras resistentes. O processo sulfato usa uma mistura ácida de dióxido de enxofre, água e uma base química (cálcio ionizado, magnésio, sódio ou amônia) para promover o ataque e dissolução da lignina. A polpa obtida por esse método é menos resistente que a obtida pelo processo "kraft". O processo de sulfito funciona bem para madeiras moles mas as madeiras duras são mais difíceis de se manipular. Esta suscetibilidade à espécie de madeira, aliada a menor resistência de polpa são as principais razões para o declínio da polpagem sulfito em relação à "kraft" (FORDOS, 1988; SMOOK, 1989).

(iii) polpagem semi-química - a polpagem semi-química associa métodos químicos e mecânicos. A madeira é amolecida parcialmente ou é cozinhada em substâncias químicas, e o resto da ação de polpagem é executada mecanicamente em moinhos giratórios. O método semi-químico tem rendimento de polpa entre a polpagem químico e a mecânica (de 55 a 90% de madeira seca). Esse método é recomendado para a polpagem de madeiras duras (SMOOK, 1989).

2.6 PROPRIEDADES DAS POLPAS DE SISAL BAMBU E PINHO

COUTTS e WARDEN (1992) obtiveram polpa de sisal utilizando polpagem química. Os fios de sisal foram cortados com dimensão aproximada de 160 mm e transformados em polpa pelos métodos "kraft" e "polpagem soda". As condições de polpagem são mostradas no Quadro 2.2. O tempo até se atingir a temperatura máxima foi de 1,25 h. A temperatura máxima foi então mantida por 2 horas.

QUADRO 2.2 - Condições de polpagem da fibra de sisal

Parâmetro	Kraft	Soda
Alcalino ativo (Na ₂ O)	12%	18%
Sulficidade (Na ₂ O)	25%	-
Razão sisal/liquor	3,5:1	5:1
Temperatura	170°C	170°C
Rendimento	73,5%	68%
Kappa	12,0	8,0

Fonte: COUTTS & WARDEN, 1992.

De acordo com FORDOS (1988) as dimensões e propriedades das polpas variam de acordo com o tipo, com a origem e com o método usado para se obter a polpa. As propriedades físicas e mecânicas da polpa de sisal, de bambu e pinho apresentadas por CHATVEERA & NIMITYONGSKUL (1987) e FORDOS (1988) são mostradas no Quadro 2.3.

QUADRO 2.3 - Propriedades físicas e mecânicas das polpas de sisal, bambu e pinho

Descrição	Polpa de Sisal	Polpa de bambu	Polpa de pinho
Diâmetro (mm)	0,075	0,0148	0,0305
Comprimento (mm)	3,00	1,48	2,48
Gravidade específica	1,36	1,46	1,27
Teor de umidade (%)	13,19	5,47	0,69
Absorção de água (%)	52,80	189,5	168,8
Módulo de elasticidade (GPa)	30,00	125	40,00
Resistência à tração (MPa)	496 – 800	1245	200-1300

Fonte: (CHATVEERA & NIMITYONGSKUL, 1987; FORDOS, 1988)

2.7 CONCRETO LEVE

Segundo PETRUCCI (1973) o concreto para ser considerado leve deve ter um valor máximo de massa específica de 2000 kg/m^3 . Estes concretos possuem importantes características para construção quais sejam, baixo peso próprio e elevado isolamento térmico. Para se obter a redução do peso do concreto leve é necessário a formação de vazios, por um dos três processos a seguir indicados, e que dão origem a três tipos de materiais: (i) concretos porosos, celulares ou aerados – obtidos pela formação de gases ou espumas estáveis, aprisionadas no interior da massa. São especialmente leves, massa específica compreendida entre 300 e 1200 kg/m^3 , de ótimo comportamento como isolante térmico, mas de baixa resistência mecânica; (ii) concretos sem finos – obtidos pela confecção de concretos sem agregado miúdo. Moderadamente leves, de boas qualidades como isolante térmico e baixa resistência mecânica. A massa específica varia de 700 a 1800 kg/m^3 ; (iii) concretos com agregados leves – em que os agregados têm estrutura celular, porosa, as células de ar estão nas partículas de agregados, que apresentam massa específica aparente bem menor do que os agregados naturais. A massa específica varia de 950 a 2000 kg/m^3 dependendo da utilização de agregados leves miúdos e graúdos, ou da combinação de agregado graúdo leve com areia natural. A resistência varia no mesmo sentido da massa específica, acontecendo o inverso com o isolamento térmico.

Segundo o ACI 523.2R-96 (1996), o concreto celular armado, pré-fabricado, para ser usado em pisos, telhados, forros e unidades de alvenaria estrutural, deve ter densidade inferior a 800 kg/m^3 , resistência à compressão mínima de 2,07 MPa, retração por secagem menor ou igual a 0,20% e condutividade térmica de acordo com o Quadro 2.4.

QUADRO 2.4 – Condutividade térmica de vários concretos de baixa densidade.

Densidade Kg/m^3	Condutividade térmica (k) W/Mk	
	Seco em estufa	Seco ao ar
320	0,60	0,83
480	0,83	1,10
640	1,10	1,40
800	1,40	1,80

Fonte: ACI 523.2R-96 (1996)

O U.S. Bureau of Reclamation apresenta a classificação do Quadro 2.5 para os concretos leves em função de sua aplicação (COLE e ZETTERSTROM, 1954). Esta classificação foi posteriormente adotada pela ASTM como especificação.

QUADRO 2.5 – Classificação para concretos leves sugerida pelo U.S. Bureau of Reclamation

Classe	Resistência à compressão (MPa)	Uso
Estrutural	21 a 35	Constituintes estruturais, vigas etc
Baixa massa específica	7 a 30	Paredes de sustentação e vigas, como as utilizadas em casas p/ residência
Isolamento	4 a 7	Revestimentos que não suportam cargas e paredes, e tetos isolantes

Fonte: COLE e ZETTERSROM, 1954.

A Réunion Internationale de Laboratoire d'Essais et de Recherches sur les Materiaux et les Constructions (RILEM) tem se preocupado com a variedade de concretos leves que vêm sendo executados em vários países e, por isso, através da sua comissão

Técnica LC 2 – Concretos Leves, apresenta a seguinte classificação funcional (Quadro 2.6).

QUADRO 2.6 - Classificação funcional dos concretos leves com agregados leves

Classe	I	II	III
Utilização do concreto	Estrutural	Estrutural/isolamento	Isolamento
Densidade aparente (kg/m^3)	1600-2000	< 1600	<< 1450
Resistência à compressão (MPa)	> 15,0	> 3,5	> 0,5
Condutividade térmica (W/m.K)	Não estipulada	< 0,75	< 0,3

Fonte: RILEM, 1978.

A ABNT, através de sua especificação EB-230 (1969), procura estabelecer a relação entre a resistência à compressão aos 28 dias e os máximos valores para a densidade de massa do concreto conforme valores apresentados no Quadro 2.7.

QUADRO 2.7 – Relação de resistência à compressão e densidade de massa máximas

Resistência à compressão aos 28 dias, mínima (MPa)	Densidade de massa máxima (kg/m^3)
28	1840
21	1760
14	1680

Fonte: ABNT (E-230), 1969.

De acordo com COLE e ZETTERSTROM (1954) as características desejadas para um concreto leve, feito com agregado leve, devem ser: a) elevada resistência mecânica; b) pequena absorção de água; c) pequeno peso por unidade de volume (massa específica aparente); d) boas propriedades isolantes, térmicas e acústicas; e) pequena dilatação ou contração; f) boa trabalhabilidade; g) baixo custo de produção; h) ser facilmente serrável; pregos devem poder ser cravados com facilidade; i) elevada resistência ao ciclo gelo/degelo; j) resistência ao aparecimento de manchas de ferrugem.

Concretos leves possuem as seguintes aplicações: tijolos de alvenaria; painéis para paredes inclinadas; tetos pré-moldados; pisos pré-moldados; concreto estrutural para edifícios de vários andares; ancoradouros; na estrutura e pavimentos de pontes e em pavimentos de pistas de decolagem de aviões a jato; e em diques. O concreto leve é usado em concreto pré-moldado, em concreto protendido e em concreto monolítico. Segundo PLUMMER e HLADIK (1951) um outro tipo de concreto leve, chamado concreto ultraleve, é usado como enchimento não densificado para isolamento acústico e térmico em construção civil e industrial.

2.7.1 Vermiculita como agregado para o concreto leve

Atualmente, o nome vermiculita é utilizado mineralógica, industrial e comercialmente para designar os minerais da família da mica que apresentam o fenômeno da esfoliação. A vermiculita esfoliada encontra aplicações na construção civil, na indústria de transformação e na agricultura, às quais são decorrentes das suas propriedades características, quais sejam: baixa massa específica aparente, baixa condutividade térmica, forma granular solta, moderada refratariedade (suporta temperaturas até 1100 – 1200 °C), material quimicamente inerte e a prova de som, incombustível e com elevada capacidade de troca iônica e de absorção de líquidos. Cada aplicação requer uma faixa granulométrica apropriada mas, de modo geral, a vermiculita de granulometria mais grossa é considerada mais nobre pois apresenta valores mais baixos de massa específica aparente.

A estrutura da vermiculita, como já foi dita, é semelhante à da mica e quando submetida a elevação de temperatura, perde água intersticial e as lâminas se expandem de forma explosiva, transformando em flocos sanfonados, deixando aprisionado muitas células de ar completamente fechada. Estas células de ar inerte conferem à vermiculita sua propriedade principal que é de isolante termo-acústico.

A vermiculita pode ser encontrada na forma de flocos, placas e blocos. Segundo ALVES (1982) os flocos são resultantes da expansão da vermiculita, podendo os

mesmos serem empregados como agregado leve. O uso de flocos com cimento produz o concreto leve. As placas pré-moldadas de vermiculita aglomerada com cimento ou outro aglomerante mineral podem ser empregadas para forros isolantes termo-acústicos, paredes divisórias, corta-fogo, etc. Os blocos isolantes são produzidos empregando-se uma mistura de vermiculita e cimento aluminoso que confere a mistura maior eficiência como isolante térmico.

Segundo JOHNSTONE E JOHNSTONE (1961), a massa específica aparente da vermiculita não-expandida varia entre 800 kg/m^3 e 1440 kg/m^3 , enquanto está entre 80 e 160 kg/m^3 para a vermiculita esfoliada. A vermiculita possui absorção de água muita alta, atingindo valores entre 300 e 336% (ALVES, 1982).

ALVES (1982) realizou ensaios de resistência à compressão em concretos e observou, para vários tipos de traços, valores de resistência à compressão entre 0,6 a 6,4 MPa para massas unitárias entre 1026 a 1440 kg/m^3 para mistura fresca e 500 a 1150 kg/m^3 para o concreto endurecido.

2.8 COMPÓSITOS COM POLPA DE CELULOSE E COM POLPA DE SISAL E BAMBU

2.8.1 Compósitos com polpa de celulose

Segundo SARJA (1988) os compósitos a base de cimento reforçado com polpa de celulose, contém pelo menos, cimento hidráulico, água e fibras de madeira (celulose) com comprimento de, no mínimo, 5 mm. A teor de polpa é usualmente alto, atingindo cerca de 20% ou mais em volume. Em acréscimo aos constituintes básicos, o concreto com polpa de celulose pode conter areia, ou outros agregados, pozolanas, aditivos químicos e soluções impregnantes. Dependendo dos constituintes, do traço e do método de

produção os compósitos podem apresentar diferentes propriedades e aplicações. Os vários tipos são classificados por SARJA como:

(i) Concreto com polpa, consistindo de uma pasta de cimento e fibras de celulose tais como lã de madeira ("wood wool"), compósitos leves com serragem de madeira ("wood chip cement") e compósitos celulose-cimento ("wood particle cement").

(ii) Compósitos estruturais a base de cimento com agregados minerais e polpa ("structural wood fibre concrete")

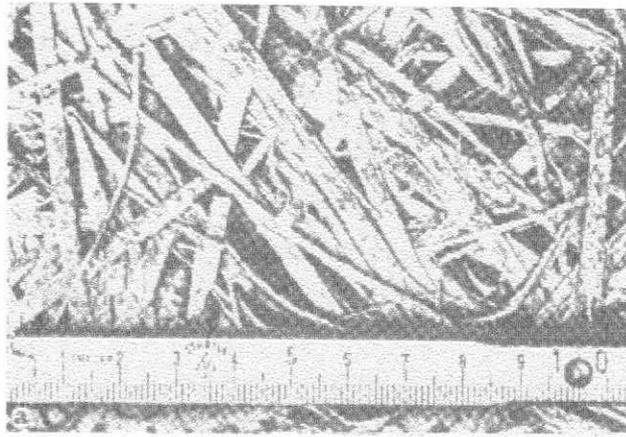
As principais características dos compósitos descritos são apresentadas no Quadro 2.8. A Figura 2.1 ilustra os vários tipos de compósitos.

QUADRO 2.8 - Principais características dos compósitos a base de fibras de madeira

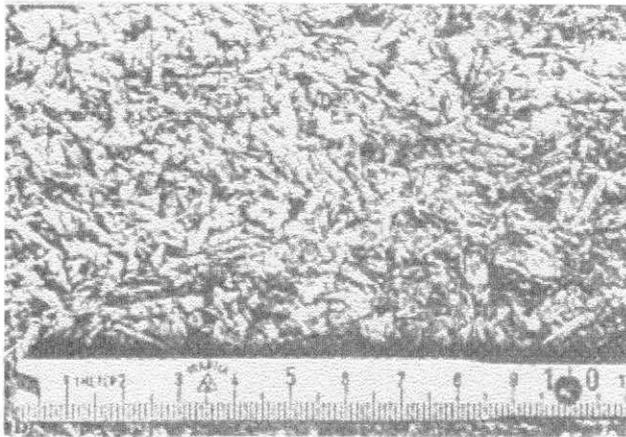
Tipo	Constituintes	Densidade (kg/m ³)	Principais aplicações
"Wood wool"	"Chips" de madeira maiores que 80 mm, cimento, água e aditivos.	350-600	Isolamento térmico, painéis acústicos
"Wood chip cement"	"Chips" de madeira menores que 20 mm, cimento, água e aditivos.	400-600	Blocos para alvenaria a serem preenchidos com concreto normal
"Wood particle cement"	"Chips" de madeira menores que 20 mm, cimento, água e aditivos.	1000-1200	Chapas divisórias, paredes, forros, pisos e fachadas
"Structural wood fibre concrete"	"Chips" de madeira menores que 30 mm, cimento, agregados, água e aditivos.	1200-1800	Alvenaria estrutural, componentes de lajes, elementos de fachadas

Fonte: SARJA, 1988

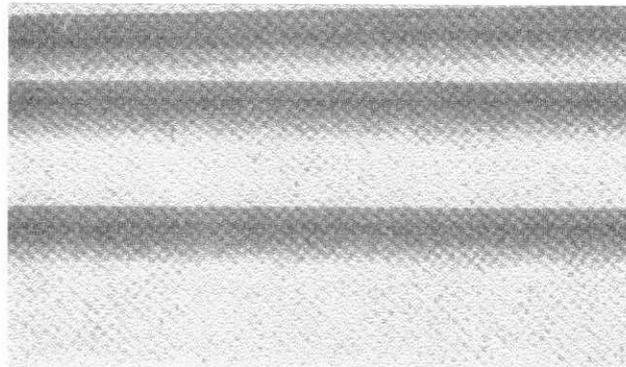
As principais propriedades mecânicas dos compósitos descritos são mostradas no Quadro 2.9.



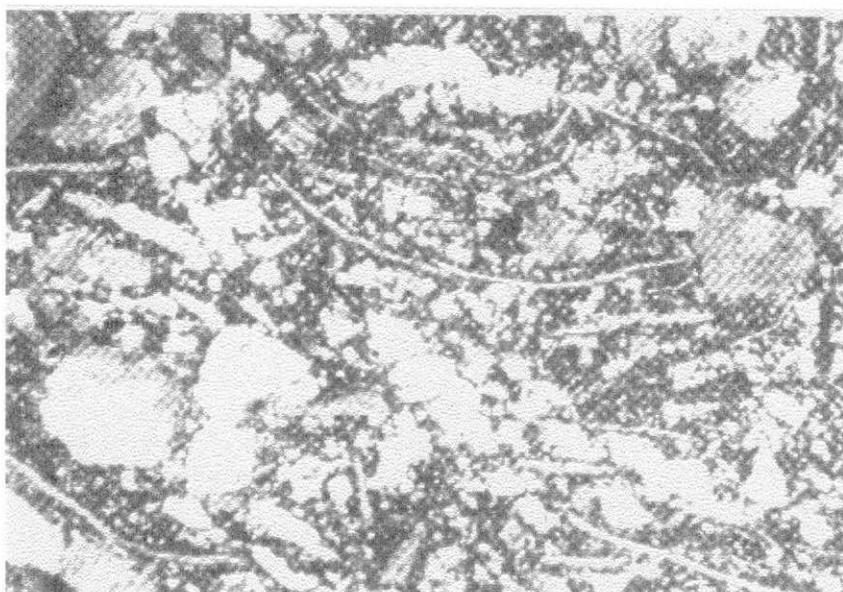
(a) "Wood wool"



(b) "Wood chip cement"



(c) "Wood particle cement"



(d) "Structural wood fibre concrete"

FIGURA 2.1 - Microestrutura dos compósitos a base de fibras de madeira
(Fonte: SARJA, 1988)

QUADRO 2.9 - Propriedades dos compósitos a base de fibras de madeira

Tipo	Densidade (kg/m ³)	Módulo de ruptura (MPa)	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
"Wood wool"	350-600	0,4-1,7	Não estipulada	Não estipulado
"Wood chip cement"	400-600	0,7-1,0	1,2-2,0	0,3
"Wood particle cement"	1000-1200	1,0-1,5	Não estipulada	3,0
"Structural wood fibre concrete"	1200-1800	2-6	6-20	3-20

Fonte: SARJA, 1988

2.8.2 Compósitos com polpa de sisal e bambu

Ao contrário do que acontece com o concreto reforçado com fibra de sisal, poucas informações estão disponíveis a respeito da polpa de sisal reforçando matrizes a base de cimento. Dentre os poucos trabalhos encontrados na literatura destaca-se os

realizados por COUTTS & WARDEN (1992) e por CHATVEERA & NIMITYONGSKUL (1994)

No estudo de COUTTS & WARDEN (1992) a polpa de sisal foi preparadas pelos processos "kraft" e soda. A matriz foi preparada a partir de sílica granulada e cimento portland comum. Os resultados obtidos indicam que a performance mecânica dos compósitos é superior à dos materiais reforçados com fibras de sisal. Por exemplo, a adição de 8% em peso de polpa de sisal à argamassa resultou num compósito com resistência à flexão de 18 MPa e com tenacidade cerca de 50-60 vezes maior que a da matriz.

CHATVEERA & NIMITYONGSKUL (1994) investigaram o comportamento físico-mecânico dos compósitos cuja matriz continha cinza da casca de arroz como aditivo e era reforçado com polpa de sisal. A cinza de casca de arroz substituiu, em peso, 10% do cimento portland normal. A relação água/cimento e areia /cimento, em peso, era de 0,40 e 2,0, respectivamente. O dosagem de superplastificante foi de 2,4% do peso do cimento. Os compósitos de argamassa foram produzidos usando volume de polpa de 0%, 3%, 5%, 7% e 9%. Os resultados foram comparados com os obtidos usando-se polpas de bambu e pinho. A durabilidade dos compósitos de argamassa com polpa de sisal foi investigada através de ciclos de envelhecimento simulados. Um ciclo consistia em molhar as espécimes durante 30 minutos, e em seguida, aquece-las em estufa a 105^oC durante cinco horas e meia. Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 2.10. Segundo os autores a durabilidade dos compósitos foi sensivelmente incrementada com a adição de cinza de casca de arroz finamente moída.

QUADRO 2.10 - Teor de umidade, absorção de água, máxima expansão linear, retração por secagem, resistência ao impacto e módulo de ruptura dos compósitos com polpa de sisal, bambu e pinho.

Tipo de polpa	Fração em massa (%)	Teor de umidade (%)	Absorção de água (%)	Máx. expansão linear (%)	Retração por secagem (%)	Resistência ao impacto (índice)	Módulo de ruptura (MPa)
Sem polpa	0	5,39	6,27	0,023	0,084	26,25	8,4*
Sisal	3	5,22	5,78	0,013	0,088	24,00	5,5
Sisal	5	7,43	8,31	0,021	0,087	32,00	6,0
Sisal	7	7,64	8,10	0,014	0,084	32,50	6,8
Sisal	9	9,16	11,12	0,027	0,102	33,25	3,8
Bambu	5	7,54	8,34	0,014	0,091	25,50	4,8
Pinho	5	5,07	5,68	0,017	0,061	17,00	6,8

* Compósito de controle contém cinza de casca de arroz finamente moída.

Fonte: CHATVEERA & NIMITYONGSKUL (1994)

Os resultados obtidos pelos autores indicam que os compósitos argamassa-polpa de sisal são impermeáveis, duráveis, com boa resistência ao impacto e, portanto, podem ser considerados como substitutos potenciais para o cimento-amianto.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo tem por finalidade apresentar os materiais e os métodos empregados no desenvolvimento da dissertação. As normas utilizadas serão citadas e referenciadas enquanto que os métodos não normatizados serão descritos detalhadamente.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Material de reforço

Os reforços utilizados no presente estudo foram as polpas das fibras de sisal e bambu e a fibra de sisal na forma de filamento. A seguir apresenta-se as características de cada tipo de reforço.

3.1.1.1 Polpa de sisal

A polpa de sisal foi obtida a partir da polpagem do resíduo de beneficiamento da fibra de sisal. Pretendeu-se, com isso, fazer um uso racional de um resíduo de baixo valor comercial e, conseqüentemente, agregar valor a agro-indústria do sisal no semi-árido nordestino. A polpagem deu-se em uma autoclave tipo AV/E – 20 do Departamento de Engenharia Florestal, Campus III, da UFPb que apresentava temperatura e pressão máxima de trabalho de 300 °C e 2,5 MPa, respectivamente.

A polpa foi produzida através do processo “kraft”, também conhecido como processo soda. O licor utilizado para a produção de polpa de sisal apresentava a composição de cinco litros de água + 250 g de hidróxido de sódio (NaOH) para cada quilo de bucha de sisal. O seguinte procedimento de polpagem foi utilizado: a) elevação gradual da temperatura até atingir 170 °C. O tempo gasto para se atingir essa temperatura foi de uma hora; b) cozinhar a bucha por uma hora nessa temperatura; c) após o cozimento reduzir gradualmente a temperatura até cerca de 90-100 °C. No nosso caso, desligou-se a autoclave e monitorou-se a temperatura e pressão até que as mesmas apresentassem valores de, respectivamente 90 °C e zero. O tempo gasto nesse processo foi de cerca de duas horas; d) a seguir, o material foi retirado da autoclave e lavado em água corrente para remoção do excesso do licor; e) a última etapa do processo correspondeu a secagem da polpa. Para tanto, a polpa foi colocada para secar ao ar, em bandejas, no laboratório. O rendimento (massa de polpa/massa de bucha) observado no processo utilizado foi de 62%.

Após a secagem a polpa apresentava algumas aglomerações e para dispersá-la foi necessário tritura-la. Para se desfazer as aglomerações, triturou-se as mesmas em um liquidificador doméstico.

3.1.1.2 Polpa de bambu

A polpa de bambu foi fornecida pela empresa Portela S/A da cidade de

Recife/PE. Após o recebimento a polpa foi lavada em água corrente para remover o excesso do licor e colocada para secar, ao ar, em bandejas, no laboratório. Após a secagem a polpa de bambu também apresentou aglomerações e o mesmo procedimento anterior foi utilizado.

3.1.1.3 Fibra de sisal

Utilizou-se a fibra de sisal produzida no município de Pocinhos, localizado na região do semi-árido paraibano. Nas espécimes em que se utilizou esse tipo de fibra a fração em massa era de 0,5 % em relação a massa dos materiais secos. O comprimento de fibra foi de 25 mm. As propriedades físicas e mecânicas das fibras foram determinadas por Tolêdo Filho (1997) e estão no Quadro 3.1.

QUADRO 3.1 – Propriedades físicas e mecânicas da fibra de sisal

Diâmetro (mm)	Comprimento (cm)	Densidade (kg/m ³)	Absorção de água até saturação	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação na ruptura (GPa)
0,08 – 0,3	38 - 94	750 – 1100	190 - 250	227 - 1002	11 - 27	2,1 – 4,2

Fonte: Tolêdo Filho, 1997.

3.1.2 Cimento Portland

Foi utilizado o cimento Portland comercial composto com filler, CP II – F – 32, da marca Zebú, fabricado pela Cia. Paraibana de Cimento Portland – CIMEPAR – João Pessoa - PB. O cimento foi fornecido acondicionado em sacos de papel do tipo Kraft de 50 Kg. Para evitar a hidratação prematura do cimento, os sacos de papel foram colocados em sacos plásticos e lacrados. A finura do cimento foi determinada por peneiramento e constatou-se que 3,7% ficou retido na peneira ABNT nº 200 (0,074 mm).

Uma amostra do material foi caracterizada no Laboratório de Análises Minerais - LAM, do CCT/PRAI/UFPB, Campus II, com vistas a determinação da sua composição química, cujo resultado está apresentado no quadro 3.2.

QUADRO 3.2 - Composição química do cimento portland utilizado

Propriedades Químicas do Cimento	Porcentagem (%)
CaO (Óxido de Cálcio)	56,00
Al ₂ O ₃ (Óxido de Alumínio)	6,70
SiO ₂ (Óxido de Silício)	17,32
Fe ₂ O ₃ (Óxido de Ferro)	1,40
MgO (Óxido de Magnésio)	11,28
Na ₂ O (Óxido de Sódio)	0,06
K ₂ O (Óxido de Potássio)	0,73
PR (Perda ao Rubro)	5,58
RI (Resíduo insolúvel)	0,41
Finura: %passando na # 200 (0,00 74 mm)	96,3
Densidade (g/cm ³)	3,10

3.1.4 Agregados

3.1.4.1 Areia

Foi utilizada uma areia proveniente do leito do rio Paraíba. A areia era seca em estufa a 105 °C, por 24 horas, antes de ser utilizada na moldagem dos corpos de prova. A granulometria da areia foi determinada segundo a NBR 7217/87 e a mesma apresentou um módulo de finura (MF) de 1,75.

QUADRO 3.3 – Ensaio de granulometria da areia

Peneiras mm	% Retida na peneira	% Acumulada
2,0	-	-
1,2	0,40	0,40
0,6	21,90	22,30
0,30	36,06	58,36
0,15	35,57	93,93
Fundo	6,07	100

3.1.4.2 Vermiculita

Utilizou-se uma vermiculita expandida fabricada no Estado da Paraíba. A granulometria da vermiculita foi determinada segundo a NBR 7217/87 e a mesma apresentou um módulo de finura (MF) de 3,8. O Quadro 3.4 mostra o resultado do ensaio granulométrico.

QUADRO 3.4 – Ensaio de granulometria da vermiculita expandida

Peneiras Mm	% Retida na peneira	% Acumulada
2,0	-	-
1,2	67,67	67,67
0,6	17,00	84,67
0,30	5,60	90,27
0,15	5,06	95,33
0,074	2,20	97,53
Fundo	2,47	100

3.1.5 Água

Foi utilizada água potável fornecida pela concessionária de Campina Grande -PB.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Métodos de produção e cura dos compósitos

Dois métodos de produção, sem e com energia de prensagem, e dois métodos de cura, cura em água e cura em autoclave, foram utilizados no presente trabalho. A seguir descreve-se os processos de produção e cura utilizados.

3.2.1.1 Produção dos compósitos sem uso de energia de prensagem e curados em água e autoclave

3.2.1.1.1 Preparo da mistura

Para o preparo das misturas foi utilizado a argamassadeira de 5 litros da EBERLE modelo 6071-B mostrada na Figura 3.1. O seguinte procedimento foi utilizado: (a) adicionar a areia, o cimento e a vermiculita no misturador e acionar o mesmo por cerca de três a cinco minutos; (b) nas misturas reforçadas com polpa e fibras curtas de sisal, adicionar as fibras ao misturador após a etapa (a); (c) dispersar a polpa na água de

amassamento; d) adicionar, aos poucos, a água de amassamento com a polpa ao misturador; e) após adicionar toda a água com a polpa, continuar misturando por cerca de 5 minutos para promover a dispersão da polpa na mistura.



FIGURA 3.1 – Argamassadeira utilizada

3.2.1.1.2 Moldagem, cura e métodos de ensaios

Os seguintes ensaios foram realizados nas misturas produzidas sem energia de prensagem: compressão, flexão, condutividade térmica, densidade aparente ou gravidade específica, índice de vazios, absorção de água por imersão e variações dimensionais. O programa experimental será apresentado no sub-ítem 3.2.2. A seguir descreve-se os métodos utilizados na produção dos corpos-de-prova, bem como os métodos de cura e procedimentos de ensaio.

Os ensaios de compressão foram realizados em corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro x 100 mm de altura. Eles foram moldados e ensaiados seguindo-se as recomendações da norma brasileira NBR – 7215. Dois métodos de cura foram utilizados: cura em água e cura em autoclave. Para cada mistura e tipo de cura, foram moldados e ensaiados três corpos-de-prova. Os corpos-de-prova curados em água foram desmoldados 48 horas após a moldagem. Durante esse período os corpos de prova

permaneciam cobertos por uma estopa grossa e úmida. A desmoldagem não foi realizada após as primeiras 24 horas porque a mistura não estava endurecida o suficiente para permitir a desmoldagem. A seguir os corpos-de-prova foram colocados em um tanque de água até a idade de 28 dias.

Os corpos de prova curadas em autoclave foram mantidos nos moldes, cobertos com estopa úmida, durante as primeiras 48 horas quando foram desmoldados e conduzidos para uma autoclave modelo 102 do Departamento de Tecnologia e Construção Civil do Campus I da UFPB. A pressão e temperatura dessa autoclave eram de, respectivamente, 1,0 MPa e 180 °C. O ciclo de autoclavagem correspondeu a um período total de 9 horas sendo 2 horas gastas para se atingir a temperatura e pressão de trabalho descrita anteriormente, 6 h nessa condição de temperatura e pressão 1 hora de esfriamento. Após a autoclavagem os corpos de prova foram colocados no tanque de água até a idade de 28 dias quando foram ensaiados.

Duas prensas foram utilizadas para a realização dos ensaios de compressão: uma prensa hidráulica de 50 t da LOSENHOUSI'V e uma prensa servocontrolada da MTS, de 10 t. Os ensaios executados na MTS foram realizados a uma velocidade de deslocamento do travessão de 0,16 mm/min. A leitura de carga e deflexão foram registradas através de uma ploter X-Y-T. Em seguida as mesmas foram digitalizadas utilizando-se o software Digitalize-Pro e as curvas tensão x deformação construídas utilizando a planilha eletrônica Excel. Na prensa LOSENHOUSI'V os ensaios foram conduzidos a uma taxa de carregamento de 0,08 MPa/segundo.

As Figuras 3.2, 3.3 e 3.4 mostram as prensas e o esquema de ensaio.



FIGURA 3.2 – Prensa LOSENHOUSI'V usada no ensaio de compressão curadas em água



FIGURA 3.3 – Prensa MTS usada no ensaio de compressão curadas em autoclave e moldadas com energia de prensagem

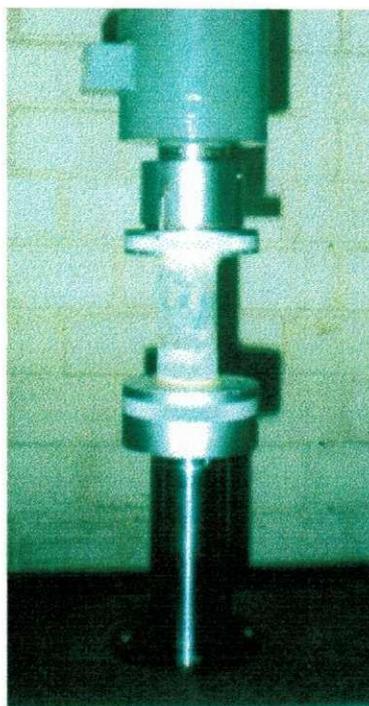


FIGURA 3.4 – Corpo-de-prova de compressão colocado entre os pratos da MTS.

A resistência à compressão (σ_c) foi calculada usando-se a Equação 3.1.

$$\sigma_c = P/A \quad (3.1)$$

onde, P – carga de ruptura

A - área da seção transversal

Os ensaios de flexão em quatro pontos foram executados em corpos de prova com dimensões de 300 mm x 60 mm x 12,7 mm com um vão de 275 mm, de acordo com as recomendações do ACI (ACI 544.2R-89) e RILEM (Rilem Technical Committee 49 TFR, 1984). A moldagem foi realizada utilizando-se moldes de aço produzidos especificamente para esse fim. Esse molde permitia a moldagem de 08 corpos-de-prova simultaneamente. Os moldes eram fixados a uma mesa vibratória e a vibração era conduzida por cerca de 3-5 minutos. É importante ressaltar que como a vermiculita e a polpa sisal e bambu eram bastante leves, a possibilidade de segregação da mistura era maior e, portanto, o tempo de vibração variava com o traço de cada mistura. As Figuras 3.5 e 3.6 mostram os detalhes do molde e da mesa vibratória. Observe na Figura 3.5 a existência de uma fina plástico colocado na base do molde para facilitar o processo de

desmoldagem. Para cada mistura e tipo de cura, foram moldados e ensaiados três corpos-de-prova.



FIGURA 3.5 – Detalhe do molde dos corpos-de-prova de flexão.



FIGURA 3.6 – Corpos-de-prova na mesa vibratória

Os corpos-de-prova de flexão foram curados em água e em autoclave, seguindo-se o mesmo procedimento adotado no estudo de resistência à compressão. A única diferença observada entre os dois processos é que a desmoldagem dos corpos-de-prova de flexão foi realizada 72 horas após a moldagem para se evitar a pré-fissuração das amostras no processo de desmoldagem.

Os ensaios de flexão foram realizados na prensa MTS mostrada na Figura 3.3 e o esquema de ensaio é mostrado na Figura 3.7.

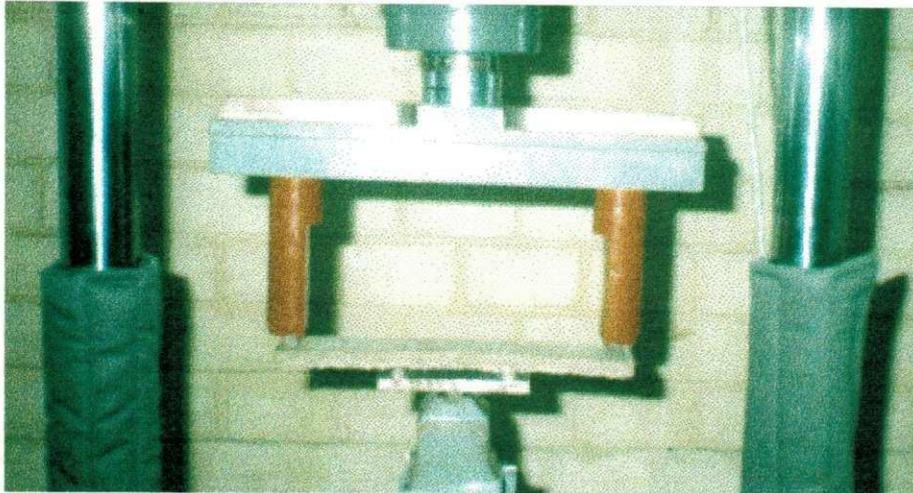


FIGURA 3.7- Esquema do ensaio de flexão em quatro pontos realizado na MTS.

O módulo de ruptura (MOR) foi calculada usando-se a equação 3.2.

$$\text{MOR} = 6M/bD^2 \quad (3.2)$$

onde,

M – momento fletor máximo

b – largura do corpo-de-prova

D – espessura do corpo-de-prova

Os ensaios de condutividade térmica foram realizados em corpos-de-prova com dimensões de 250 mm x 250 mm x 12 mm. Eles foram realizados seguindo-se o método de ensaio da placa quente protegida normatizado pela ASTM (ASTM C 177-76). Os procedimentos de moldagem e desmoldagem foram os mesmos utilizados na confecção dos corpos-de-prova de flexão. A cura foi realizada em água até a idade de 28 dias. A Figura 3.8 mostra os corpos-de-prova nos moldes. Quatro corpos de prova foram moldados para cada mistura.



FIGURA 3.8 –Moldes e corpos-de-prova utilizados no ensaio de condutividade térmica.

A lei empírica da condução de calor, denominada Lei de Fourier, estabelece que a taxa de fluxo de calor por condução, em uma dada direção, é proporcional à área normal à direção do fluxo e ao gradiente de temperatura naquela direção. Com o fluxo de calor unidimensional e estacionário na direção x , por exemplo, tem-se:

$$q_x = \frac{Q_x}{A} = k \frac{dT}{dx} \quad (3.3)$$

onde, Q_x é a taxa de fluxo de calor através da área A no sentido positivo dos x e q_x é o fluxo de calor no sentido dos x . A constante de proporcionalidade k é chamada de condutividade térmica do material e pode ser definida como:

$$k = \frac{Q_x \cdot e}{A \cdot \Delta T} \quad (\text{W/mK ou W/m}^\circ\text{C}) \quad (3.4)$$

onde e representa a espessura da amostra e ΔT representa a diferença de temperatura (K ou $^\circ\text{C}$) entre as faces da mesma.

Os ensaios de condutividade térmica foram realizados no Laboratório de Transmissão e Tecnologia do Calor do Programa de Engenharia Mecânica da COPPE/UFRJ. A determinação da condutividade térmica pelo método de ensaio da placa quente protegida envolve a medição do gradiente de temperatura médio estabelecido sobre o corpo-de-prova a partir de um certo fluxo de calor em regime constante. O fluxo de calor

é estabelecido pelo aquecimento de uma resistência elétrica e representa a potência necessária para manter o regime permanente. Assim:

$$Q_x = V.I \quad (3.5)$$

e, conseqüentemente,

$$k = \frac{V.I.e}{A\Delta T} \quad (3.6)$$

onde V é a voltagem, em Volts, e I é a intensidade da corrente elétrica, em Ampere.

Para realização do ensaio o corpo-de-prova é colocado entre duas placas térmicas, conforme mostra a Figura 3.9, sendo uma quente e outra fria. A placa quente, é formada de duas seções de aquecimento independentes. A seção a central, denominada de seção de medição, é circular e aquecida por meio de resistências elétricas; e a seção externa, denominada anel de guarda, é aquecida por meio de água quente. Pode ser assumido um fluxo de calor constante e unidimensional (calor em uma só direção) na seção de medição quando a temperatura das duas partes da placa quente atingirem o mesmo valor. Na placa fria, um sistema de dutos internos permite a circulação de água por toda a placa, mantendo a temperatura constante. A medição da temperatura é feita por quatro termômetros: quando a água entra e sai da placa fria; quando a água sai da placa quente e o último para medir a temperatura da seção de medição. Todos os termômetros estão ligados a termopares situados nas placas.

O conjunto de placas mais a amostra é isolado por uma caixa protetora para impedir a troca de calor com o ambiente. A Figura 3.10 mostra uma vista da mesa de condutividade com a instrumentação utilizada na execução do ensaio.

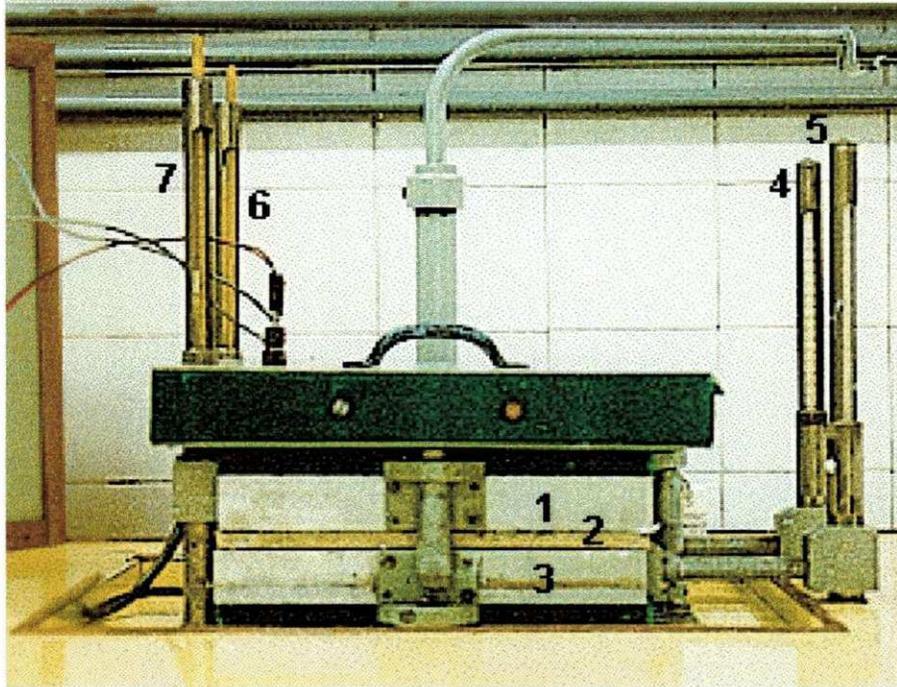


FIGURA 3.9 – Detalhes do ensaio da condutividade térmica. 1 - placa quente; 2 - amostra; 3- placa fria; 4 e 5 – termômetros para medição de temperatura da placa fria; 6 – termômetro para medir a temperatura da seção de medição; 7 – medidor de temperatura do anel de guarda.

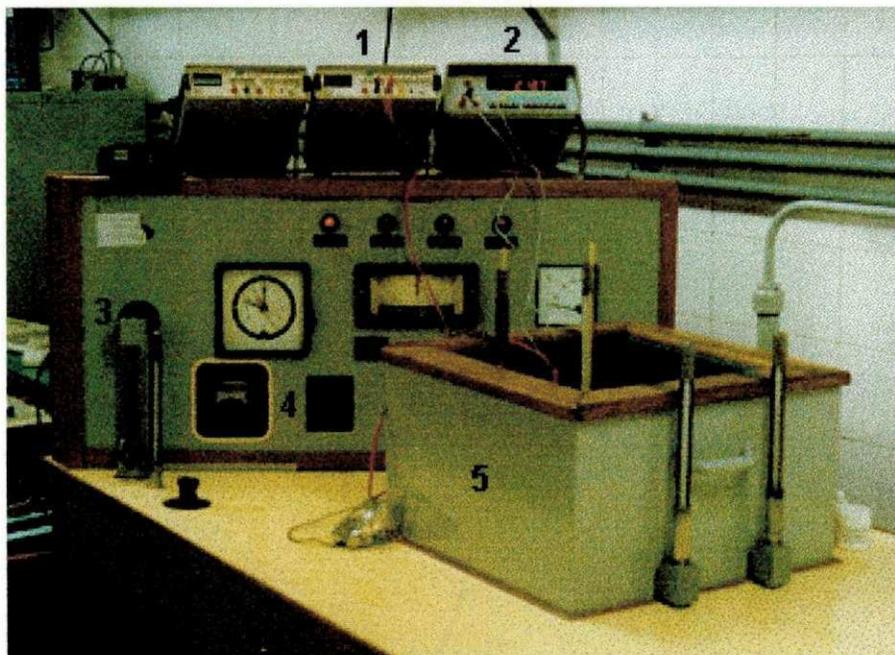


FIGURA 3.10 - Mesa para medição da condutividade térmica com instrumentos de medição. 1 – voltímetro; 2 – amperímetro; 3 – controle de vazão de água fria; 4 – controle de potência elétrica; 5 – caixa isolante

A partir da condutividade térmica é possível se determinar outras propriedades térmicas importantes:

a) Resistividade Térmica (r) – sob regime estacionário, representa o gradiente de temperatura por unidade de fluxo de calor. É o recíproco da condutividade térmica e pode ser definido junto com essa propriedade:

$$r = \frac{A \Delta T}{Q_x e} = \frac{1}{k} \quad (\text{mK/W}) \quad (3.7)$$

b) Resistência térmica da placa (R) – diferença de temperatura necessária para produzir uma unidade de fluxo de calor, sob regime estacionário, através da amostra. Para placas é calculado pela seguinte equação:

$$R = \frac{A \Delta T}{Q_x} = \frac{e}{k} \quad (\text{m}^2\text{K/W}) \quad (3.8)$$

c) Condutância térmica (Γ) – sob regime constante, representa o fluxo de calor necessário para produzir uma diferença de temperatura unitária. Representa o inverso da resistência térmica e pode ser calculado por:

$$\Gamma = \frac{Q_x}{A \Delta T} = \frac{k}{e} \quad (\text{W/m}^2\text{K}^2) \quad (3.9)$$

Os ensaios de densidade aparente ou gravidade específica, índice de vazios e absorção de água foram realizados segundo a norma brasileira NBR 9778/87. Foram ensaiadas quatro espécimes de 20 mm x 20 mm x 15 mm para cada mistura e as mesmas foram retiradas dos corpos-de-prova de compressão após a sua ruptura. O procedimento de ensaio consistia em se realizar a pesagem dos corpos-de-prova nas seguintes condições: (a) após secagem em estufa a 110 °C por 24 horas obtendo-se o peso seco em estufa (PS); (b) após secagem em estufa colocava-se as amostras e água por 24 horas obtendo-se o peso saturado (Pi). O peso saturado era determinado após se enxugar a superfície dos corpos-de-prova com um pano seco, a fim de se remover toda a água superficial visível. (c) o peso saturado imerso em

água do corpo-de-prova (P_i) foi medido utilizando-se uma balança hidrostática de capacidade de 5000g com precisão de 0,001 g. A Figura 3.11 mostra a balança hidrostática utilizada para medição do peso em água do corpo-de-prova saturado.

Conhecidos os pesos acima descritos, determinou-se a densidade aparente, o índice de vazios e a absorção de água das amostras, utilizando-se as equações 3.10 a 3.12:

$$D_{Ap} = \frac{PS}{PH - P_i} \times \text{Densidade da água (g/cm}^3\text{)} \quad (3.10)$$

$$i = \frac{PH - PS}{PH - P_i} \times 100 (\%) \quad (3.11)$$

$$ABS = \frac{PH - PS}{PS} \times 100 (\%) \quad (3.12)$$

onde:

D_{Ap} = Densidade aparente ou gravidade específica do corpo de prova;

i = Índice de vazios

ABS = Absorção de água por imersão

PS = Peso do corpo de prova seco em estufa (105°C) (g);

PH = Peso ao ar do corpo de prova saturado (g);

P_i = Peso em água do corpo de prova saturado (g).



FIGURA 3.11 – Balança hidrostática utilizada para medição do peso em água do corpo-de-prova saturado.

Utilizando-se as placas de 250 x 250 x 12 mm usadas na determinação da condutividade térmicas determinou-se a sua absorção de água até a saturação e as decorrentes variações dimensionais. A absorção de água das placas foi determinada seguindo-se a norma brasileira NBR 13555. O procedimento consistia em secar as placas em estufa calibrada a 105 °C e em pesá-las a cada 24 horas até obtenção de massa constante, denominada massa seca em estufa PS. Logo após as placas eram imersas em água, à temperatura ambiente, sendo pesadas a cada 24 horas até obtenção de massa constante, denominada massa úmida saturada PH. A equação 3.12 foi utilizada para o cálculo da absorção de água das placas.

O ensaio de variações dimensionais das placas foi realizado paralelamente ao ensaio de absorção de água. As amostras foram medidas nas duas direções das placas, segundo o gabarito apresentado na Figura 3.12. A primeira leitura efetuada, após a secagem em estufa obtendo-se o comprimento L_s . Antes da leitura do comprimento L_s as amostras eram deixadas ao ar por cerca de 1-2 horas para que a mesma esfriasse e permitisse o seu manuseio. Logo após a leitura as amostras eram colocadas em água até a saturação completa. A situação de saturação completa era considerada atingida quando a diferença de massa entre leituras consecutivas era inferior a 0,5%. As amostras eram então

secas superficialmente com pano seco e medidas obtendo-se o comprimento L_h . O valor da variação dimensional entre as situações seca em estufa e completamente saturada, ΔL , em mm/m, é determinado pela equação 13.

$$\Delta L = \frac{L_h - L_s}{L_s} \cdot 1000 \quad (3.13)$$

Onde,

ΔL - variação dimensional da amostra entre as situações seca em estufa e completamente saturada

L_s - comprimento da amostra após secagem em estufa

L_h - comprimento da amostra após saturação completa

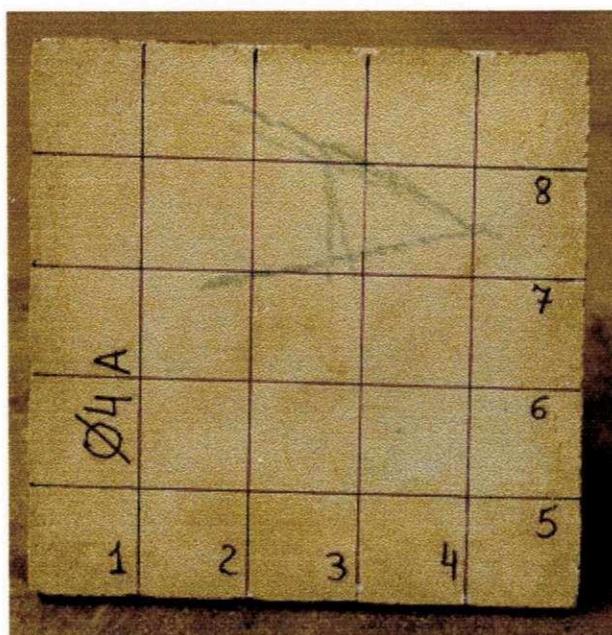


FIGURA 3.12 – Gabarito de leituras usado no ensaio de variações dimensionais.

3.2.1.1 Produção dos compósitos com energia de prensagem e curados em água

Visando-se produzir compósitos de melhor performance estrutural, procedeu-se mudanças tanto no método de preparação da mistura quanto no de moldagem dos corpos-de-prova. Descreve-se, a seguir, os procedimentos utilizados.

3.2.1.1.1 Preparo da mistura

Foi adotado o seguinte procedimento para o preparo da mistura: (a) colocar a areia, o cimento e a vermiculita em um balde e proceder a mistura dos mesmos até se obter uma boa homogeneidade; (b) dispersar a polpa de sisal na água. A quantidade de água usada nesse estágio correspondia a cinco vezes a massa dos materiais secos; (c) adicionar a mistura polpa+água ao balde contendo areia, cimento e vermiculita. Deve-se agitar a mistura até que todos os constituintes se encontrem bem dispersos em água (ver Figura 3.13); (d) retirar, aos poucos, a mistura do balde e colocá-la no equipamento projetado para efetuar a sucção da água da mistura. O equipamento consiste de um recipiente superior que possuía base perfurada para permitir o escoamento da água para o recipiente inferior. Para se evitar a perda dos finos (cimento e polpa) colocou-se sobre a base perfurada um papel de filtro qualitativo. A sucção foi realizada com motor de 3/4 HP. A Figura 3.14 mostra os detalhes do equipamento. (e) após a sucção, misturar o composto por cerca de 5 minutos para intensificar a dispersão principalmente do cimento uma vez que havia a tendência de deposição dos finos na base coberta com o papel de filtro, conforme mostra a Figura 3.15.

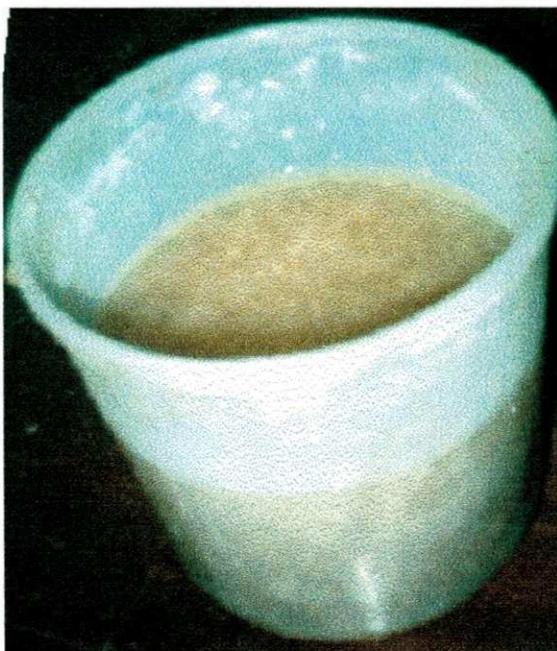


FIGURA 3.13 – Balde com areia, vermiculita, polpa e cimento dispersos em água.

Observe alta quantidade de água utilizada, visando garantir a dispersão dos materiais constituintes.



FIGURA 3.14 – Equipamento utilizado para retirar, por sucção, a água da mistura



FIGURA 3.15 - Tendência de deposição dos finos no papel de filtro.

A sucção realizada visava deixar as misturas com o fator água/cimento mais baixo possível mantendo, no entanto, uma trabalhabilidade adequada para a etapa de produção dos corpos-de-prova. No quadro 3.5 apresenta-se, para três das misturas estudadas, a eficiência do processo de sucção utilizado. A seguinte notação foi utilizada para definir o traço das misturas: a – areia; c – cimento; v – vermiculita; ps – polpa de sisal.

QUADRO 3.5 – Quantidade de água usada nas misturas.

Traço em peso das misturas	Massa de materiais sólidos (g)	Quantidade inicial de água (l)	Quantidade de água retirada da amostra (l)	Fator a/c após a sucção
1c:1,5a:2%ps	3825	19,125	17,560	1,04
1c:0,75a:0,75v:2%ps	3060	15,300	12,350	2,46
1c:1,125a:0,375v:2%ps	3060	15,300	12,700	2,17

Dos resultados mostrados no Quadro 3.5, nota-se que o fator água/cimento após a sucção ainda era bastante alto, mostrando que a sucção poderia ter sido conduzida por um período mais longo. O critério adotado no presente trabalho para se interromper a sucção foi o de se deixar, nas misturas, uma quantidade de água que permitisse uma fácil re-homogeneização das mesmas antes de coloca-las nos moldes onde elas seriam comprimidas.

3.2.1.2.2 Moldagem sob compressão, cura e métodos de ensaios

Os ensaios realizados nas misturas produzidas com energia de prensagem foram: compressão, flexão, densidade aparente ou gravidade específica, índice de vazios, e absorção de água por imersão. O programa experimental será apresentado no sub-ítem 3.2.2. A seguir descreve-se os métodos utilizados na produção dos corpos de prova. O método de cura utilizado foi o de cura em água e o mesmo encontra-se descrito no ítem 3.2.1.1.2. Os procedimentos de ensaio também se encontram descritos no referido ítem.

Para determinação da resistência à compressão, os corpos-de-prova foram moldados utilizando-se o seguinte procedimento: (a) encher o molde e comprimir o material até o mesmo ficar com uma altura de cerca de $1/3$ da altura do corpo-de-prova. Nesse estágio foi aplicada uma pressão de 2,25 MPa e, após a aplicação dessa pressão, escarificava-se a camada superficial do mesmo para permitir uma melhor aderência com a segunda camada (b) encher o molde e comprimir a mistura até a mesmo atingir a altura de $2/3$ da altura do corpo-de-prova. A mesma pressão foi aplicada e a camada superficial escarificada; (c) encher o molde e comprimi-lo até que o corpo-de-prova tivesse a altura de 10 cm. A pressão requerida nesse estágio foi de cerca de 12,25 MPa. Para se garantir que o corpo-de-prova tinha a altura estabelecida de 10 cm, realizou-se a moldagem experimental de 6 corpos-de prova de diferentes misturas e fez-se uma marca indicadora da profundidade que o pistão de aço utilizado na prensagem deveria penetrar no molde.

O molde utilizado consistia de um cilindro de aço de diâmetro interno de 5,0 cm e altura de 20,0 cm para permitir a colocação do material necessário à compactação da parte superior do corpo-de-prova que tinha 10 cm de altura. A espessura de parede do cilindro era de 0,75 cm. Na sua base acoplava-se, um disco de aço de diâmetro interno de 5,0 cm, externo de 6,5 mm e espessura de 1,0 cm. O disco penetrava no molde cerca de 3 mm a fim de promover o fechamento da sua base. Um pistão de aço de 4,95 mm de diâmetro por 25,0 cm de comprimento foi utilizado na prensagem dos corpos-de-prova. Um cilindro vazado de dimensões internas de 5,0 cm x 12 cm foi utilizado na desmoldagem. A desmoldagem era efetuada substituindo-se o disco de aço pelo cilindro de aço vazado e aplicando-se, lentamente, no topo do corpo-de-prova, uma pequena pressão. As partes constituintes do molde são apresentadas na Figura 3.16. A moldagem foi realizada na prensa LOSENHOUSI'V segundo o esquema de prensagem mostrado na Figura 3.17. A Figura 3.18 mostra o esquema de desmoldagem utilizado no presente estudo.



FIGURA 3.16 - Partes constituintes do molde de compressão

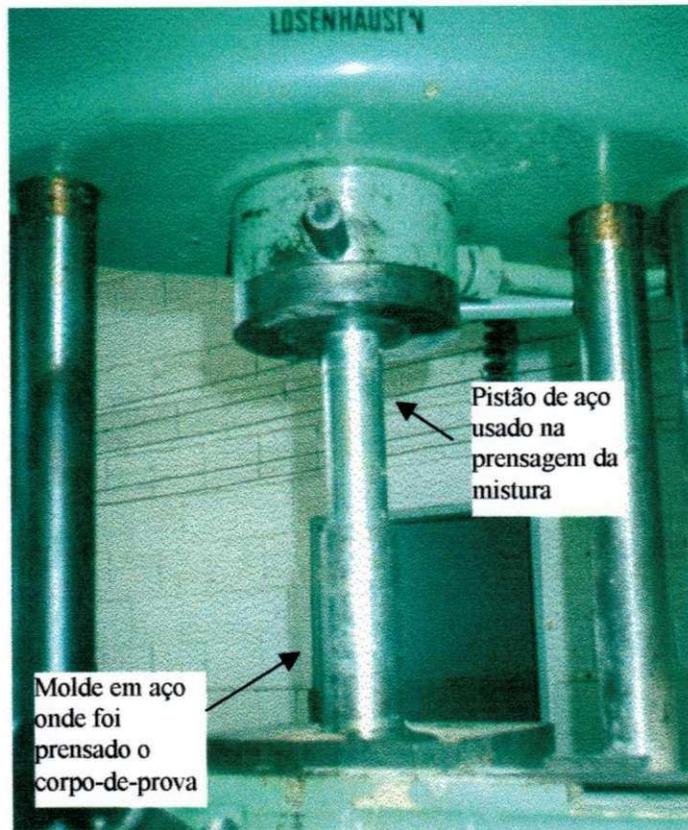


FIGURA 3.17 - Esquema de confecção dos corpos-de-prova em compressão sob pressão.

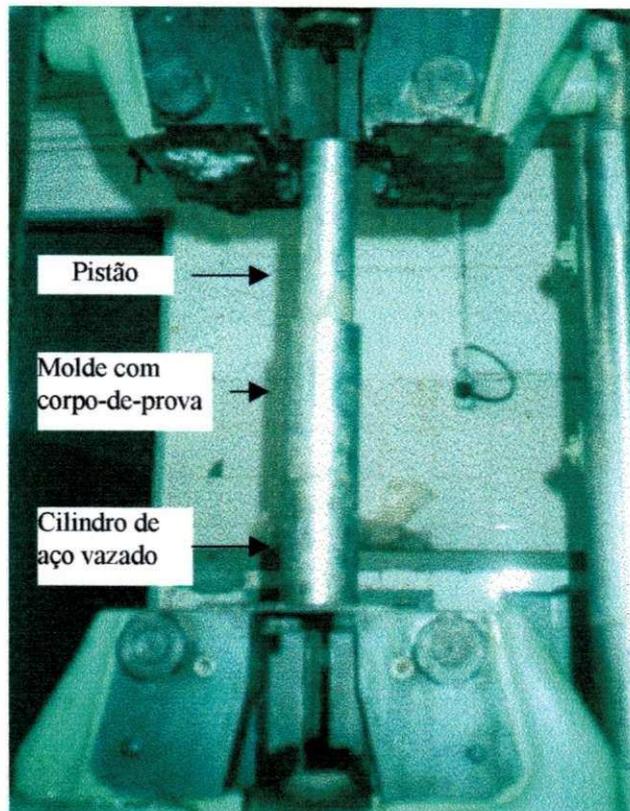
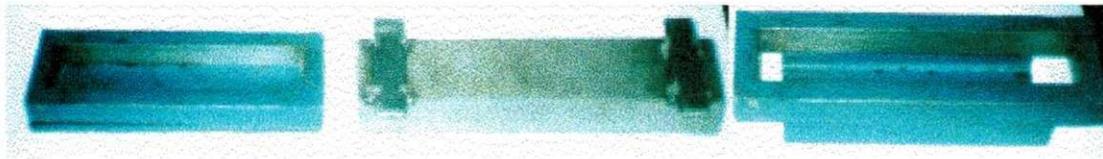


FIGURA 3.18 – Esquema de desmoldagem dos corpos-de-prova em compressão sob pressão

Os corpos-de-prova para os ensaios de flexão tinham as mesmas dimensões dos usados nos ensaios realizados sem energia de prensagem. Os corpos-de-prova eram moldados um de cada vez e o procedimento consistia em se colocar toda a massa da mistura no molde e aplicar pressão no molde até o corpo-de-prova atingir a espessura de 12 mm. A pressão requerida nesse estágio foi de cerca de 1,33 MPa. Para se garantir que o corpo-de-prova tinha a altura pré-estabelecida, realizou-se a moldagem experimental de 10 corpos-de prova de diferentes misturas e fez-se uma marca indicadora da profundidade que a placa de aço utilizada na prensagem deveria penetrar no molde.

O molde utilizado na confecção dos corpos-de-prova de flexão possuía dimensões internas de 30,0 cm x 6,0 cm x 3,5 cm. Uma placa de aço de 30,0 cm x 5,95 cm x 3,5 cm foi utilizada para compactação dos corpos-de-prova. Uma placa de aço de 1,0 cm de espessura, era colocada na base do molde no momento da prensagem. Na desmoldagem essa placa era substituída por uma chapa tipo cantoneira de 3,5 cm de altura que recebia o corpo-de-prova desmoldado. Uma folha de isopor de 2,0 cm foi colocada sobre a chapa

tipo cantoneira para impedir danos nas amostras no processo de desmoldagem. As partes constituintes do molde de flexão são apresentadas na Figura 3.19. A moldagem foi realizada na prensa LOSENHOUSI'V segundo o esquema de prensagem mostrado na Figura 3.20. A Figura 3.21 mostra uma amostra após a prensagem.



(a)

(b)

(c)

FIGURA 3.19 - Partes constituintes do molde de flexão. (a) molde com placa de aço de base. (b) placa de aço usada para compactação das amostras, (c) molde com chapa tipo cantoneira usada na desmoldagem.

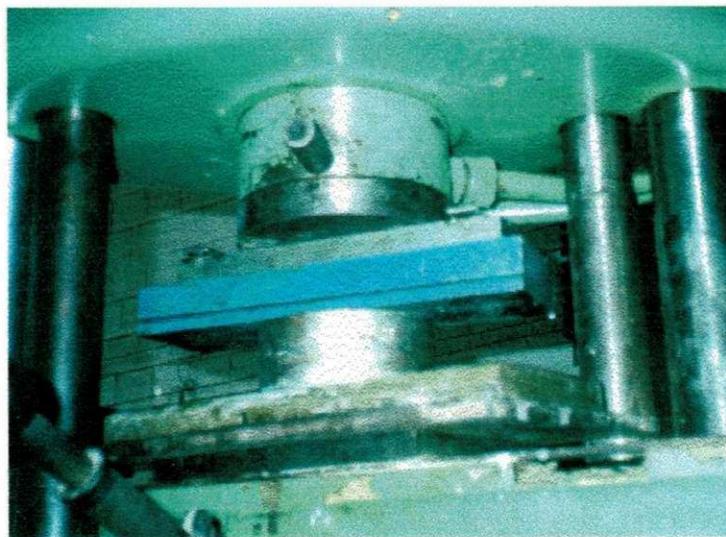


FIGURA 3.20 – Esquema de confecção, sob pressão, dos corpos-de-prova de flexão.

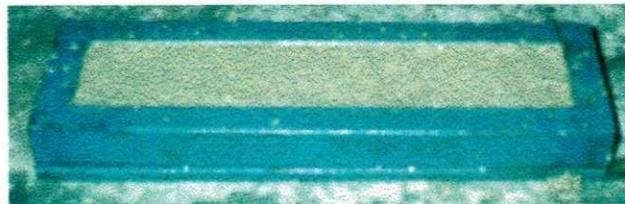


FIGURA 3.21 - Corpo-de-prova de flexão após a prensagem

3.2.2 Programa experimental

3.2.2.1 Misturas sem uso de energia de prensagem e curados em água

Para se determinar a influência da porcentagem de polpa, vermiculita e fator água/cimento na resistência à compressão e à flexão dos compósitos. Utilizou-se um método estatístico chamado análise fatorial de experimentos que não se constitui em um delineamento estatístico e sim em um esquema orientado de desdobramento de graus de liberdade de tratamentos.

A técnica do desenho fatorial foi selecionada, em oposição ao clássico “experimento um de cada vez” por possibilitar uma abordagem eficiente e estruturada para estudar as propriedades de um material que é influenciado por um grande número de fatores. Através do desenho fatorial é possível se determinar se os principais fatores que afetam a propriedade do material estudado foram levados em consideração; qual dos fatores tem efeito significativo nessa propriedade; e se existe interação entre os fatores.

Adicionalmente, o uso do desenho fatorial de experimentos conduz a um modelo matemático que nos permite prever o valor da propriedade em estudo em função dos fatores considerados.

Para se ter um desenho fatorial completo deve-se estabelecer, para cada fator, um número de níveis a serem investigados. Se um fator A, por exemplo, é investigado em r níveis, o fator B em c níveis e o fator C em s níveis, têm-se um experimento fatorial completo $r \cdot c \cdot s$. Se cada combinação de tratamento é repetida n vezes, o número total de ensaios necessários é dado por $r \cdot c \cdot s \cdot n$ (Chatfield, 1983). O nível de cada variável em um experimento pode cobrir uma grande faixa de valores. O propósito de um desenho de experimentos não é testar os extremos de um processo, mas testar uma área racional de interesse prático, no espaço dos fatores. Se uma variável é significativa e os resultados obtidos em um nível mais baixo mostram que é aconselhável a avaliação da variável dependente em um nível superior, experimentos subsequentes podem ser realizados para explorar esse novo nível.

No presente trabalho utilizou-se um desenho fatorial com três fatores com dois níveis, e três reproduções no ponto central. Os fatores estudados foram : a) percentagem de substituição, em areia por vermiculita (X_1); b) relação água/cimento (X_2); e c) fração em peso de polpa de sisal (X_3). A seleção destes fatores foi baseada no fato de que estas são as variáveis básicas consideradas na dosagem dos traços dos compósitos de argamassas de polpa de sisal. O uso do desenho fatorial vai determinar, no entanto, se estes fatores primários afetam, significativamente a resistência à flexão e compressão do compósito. Esse desenho é ilustrado na Figura 3.22. Os níveis mais baixos e mais altos selecionados para cada fator são apresentados nos eixos dessa figura. As proporções da mistura estão no Quadro 3.6. A seguinte notação foi utilizada para definir o traço das misturas: c – cimento; a – areia; v – vermiculita; ps – polpa de sisal.

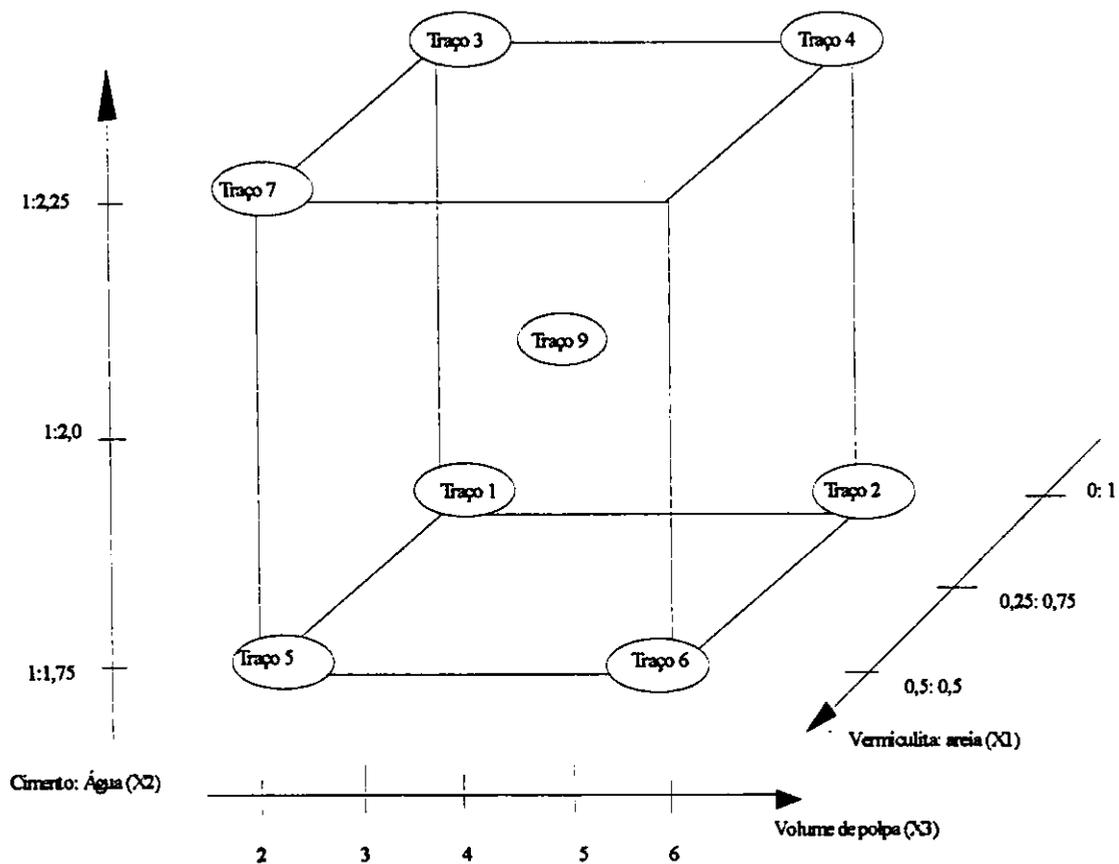


FIGURA 3.22 – Desenho fatorial 2^3

QUADRO 3.6 – Desenho fatorial 2^3

Mistura Nº	Traço	Cimento	Areia/ cimento	Vermiculita/ cimento	% de polpa de sisal	a/c
1	1c:1,5a:2ps:1,75	1	1,5	-	2	1,75
2	1c:1,5a:6ps:1,75	1	1,5	-	6	1,75
3	1c:1,5a:2ps:2,25	1	1,5	-	2	2,25
4	1c:1,5a:6ps:2,25	1	1,5	-	6	2,25
5	1c:0,75a:0,75v:2ps:1,75	1	0,75	0,75	2	1,75
6	1c:0,75a:0,75v:6ps:1,75	1	0,75	0,75	6	1,75
7	1c:0,75a:0,75v:2ps:2,25	1	0,75	0,75	2	2,25
8	1c:0,75a:0,75v:6ps:2,25	1	0,75	0,75	6	2,25
9	1c:1,125a:0,375v:4ps:2,0	1	1,125	0,375	4	2,0

Para se verificar a validade do modelo matemático obtido a partir do desenho fatorial estabelecido, moldou-se corpos-de-prova com diferentes traços dentro do espaço dos fatores estudados. Essas misturas estão apresentadas no Quadro 3.7.

QUADRO 3.7 – Misturas estudadas para se analisar o modelo matemático

Mistura Nº	Traço	Cimento	Areia/ cimento	Vermiculita/ cimento	Polpa de sisal	a/c
10	1c:1,125a:0,375v:2ps:2,0	1	1,125	0,375	2	2,0
11	1c:1,125a:0,375v:3ps:2,0	1	1,125	0,375	3	2,0
12	1c:1,125a:0,375v:5ps:2,0	1	1,125	0,375	5	2,0
13	1c:1,125a:0,375v:6ps:2,0	1	1,125	0,375	6	2,0
14	1c:0,9375a:0,5625v:2ps:2,0	1	0,9375	0,5625	2	2,0
15	1c:1,3125a:0,185v:4ps:2,0	1	1,3125	0,185	4	2,0

Para se estudar a influência do tipo de polpa na de resistência à compressão e à flexão dos compósitos, moldou-se corpos-de-prova com o mesmo traço das misturas 9, 10, 11, 12 e 13 usando a polpa de bambu (pb) como reforço. As misturas são mostradas nos quadros 3.6 e 3.7.

Para se estudar a influência da adição da fibra de sisal (fp) na resistência à compressão e à flexão dos compósitos com polpa de sisal, cinco misturas foram moldadas com a adição de uma fração em peso dos materiais secos de 0,5% de fibra de sisal de 25 mm de comprimento em acréscimo ao reforço com polpa de sisal. Pretende-se com uso, verificar como a adição da fibra de sisal modificava a resistência à compressão e flexão, a tenacidade e o módulo de ruptura das argamassas reforçadas apenas com a polpa. Os traços das misturas foram 9, 10, 11, 12 e 13 mostradas nos Quadros 3.6 e 3.7

Três argamassas de referência foram moldadas com os traços apresentados no Quadro 3.8. O fator água/cimento foi estabelecido de forma que a trabalhabilidade das misturas fossem as mesmas.

QUADRO 3.8 – Traço para as matrizes usadas

Mistura N ^o	Traço	Cimento	Areia/cimento	Vermiculita/Cimento	a/c
16	1c:1,5a:0,5	1	1,5	-	0,5
17	1c:1,125a:0,375v:0,9	1	1,125	0,375	0,9
18	1c:0,75a:0,75v:1,5	1	0,75	0,75	1,5

Os ensaios de absorção de água até a saturação e a variação dimensionais das placas foram realizadas nas misturas 1, 5, 13 e 16.

3.2.2.2 Misturas sem uso de energia de preparação e curada em autoclave

As misturas 1, 2, 5, 6, 9, 12 e 13 e as argamassas de referência foram curadas também em autoclave com o objetivo de se estudar a influência do tipo de cura na resistência à compressão e à flexão dos compósitos. As misturas são mostradas nos quadros 3.6 e 3.7.

3.2.2.3 Misturas moldadas com de energia de prensagem e curadas em água

As misturas moldadas com energia de prensagem e curadas em água são apresentadas no Quadro 3.9.

QUADRO 3.9 – Misturas moldadas com energia de prensagem

Misturas	Cimento	Areia/ Cimento	Vermiculita/ Cimento	Polpa de sisal	a/c
1c:1,5a:2ps:1,043	1	1,5	-	2	1,043
1c:0,75a:0,75v:2ps:2,46	1	0,75	0,75	2	2,46
1c:1,125a:0,375v:2ps:2,17	1	1,125	0,375	2	2,17
1c:1,5a:0,5	1	1,5	-	-	0,5
1c:0,75a:0,75v:1,5	1	0,75	0,75	-	1,5

Foi determinada a densidade aparente, índice de vazios, e absorção de água por imersão de todos as misturas definidas anteriormente.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Propriedades físicas dos compósitos

4.1.1 Densidade aparente, absorção de água e índice de vazios

A Tabela 4.1 apresenta os valores médios da densidade aparente dos compósitos curados em água e autoclave e dos compósitos produzidos com energia de prensagem. Nas Figuras 4.1 à 4.4 mostra-se os valores da densidade aparente das misturas curadas em água em função da fração em massa de polpa, do tipo de polpa, da relação vermiculita/areia, do tipo de cura e do processo de produção utilizado.

Observando-se os resultados, nota-se que aumentando-se a fração de polpa ocorre uma redução da densidade aparente dos compósitos, sendo tal fato mais significativo para os compósitos com polpa de sisal. Por exemplo, a densidade dos compósitos reforçados com polpa de bambu caiu 6,15% quando aumentou-se a fração de polpa de 2 para 6%. Para as mesmas frações em massa de polpa de sisal, o decréscimo observado na densidade aparente foi de 15,70%. Isso deve-se, provavelmente, ao fato de a polpa de bambu ser ligeiramente mais curta que a polpa de sisal conduzindo a misturas mais trabalháveis, com menor quantidade de ar aprisionado

A presença de fibra de sisal, em acréscimo à polpa, como elemento de reforço dos compósitos diminuiu a densidade dos mesmos em cerca de 3,90 - 5,60% (ver Figura 4.1).

TABELA 4.1 – Valores médios e coeficiente de variação da densidade aparente dos compósitos.

Mistura Nº	Traço	Densidade aparente (kg/m ³) – CV (%)		
		Água	Autoclave	Pressão
1	lc: 1,5a: 2ps: 1,75	1460 – 1,2	1390 – 1,0	1700 – 0
2	lc: 1,5a: 6ps: 1,75	1180 – 0,9	1130 – 0,9	
3	lc: 1,5a: 2ps: 2,25	1440 – 2,19		
4	lc: 1,5c: 6ps: 2,25	1120 – 5,0		
5	lc: 0,75a: 0,75v: 2ps: 1,75	1180 – 3,1	1160 – 1,7	1200 – 0
6	lc: 0,75a: 0,75v: 6ps: 1,75	1000 – 3,9	870 – 0,9	
7	lc: 0,75a: 0,75v: 6ps: 2,25	960 – 1,0		
8	lc: 0,75a: 0,75v: 6ps: 2,25	900 – 2,0		
9	lc: 1,125a: 0,375v: 4ps: 2,0	1070 – 0,5	1030 – 1,6	
10	lc: 1,125a: 0,375v: 2ps: 2,0	1210 – 4,5	1150 – 5,0	1230 – 0,6
11	lc: 1,125a: 0,375v: 3ps: 2,0	1110 – 1,2		
12	lc: 1,125a: 0,375v: 5ps: 2,0	1050 – 1,0		
13	lc: 1,125a: 0,375v: 6ps: 2,0	1020 – 0,5	1000 – 0,8	
14	lc: 0,9375a: 0,5625: 2ps: 2,0	1120 – 2,7		
15	lc: 1,315a: 0,185v: 4ps: 2,0	1100 – 1,3		
16	lc: 1,5a: 0,5	2130 – 0,8	1970 – 0,8	2260 – 0,6
17	lc: 1,125a: 0,375v: 0,9	1550 – 0,8	1500 – 1,6	
18	lc: 0,75a: 0,75v: 1,5	1190 – 1,7	1160 – 1,0	1220 – 1,7
19	lc: 1,125a: 0,375v: 2pb: 2,0	1140 – 1,2		
20	lc: 1,125a: 0,375v: 3pb: 2,0	1130 – 0,8		
21	lc: 1,125a: 0,375v: 4pb: 2,0	1120 – 1,1		
22	lc: 1,125a: 0,375v: 5pb: 2,0	1100 – 0		
23	lc: 1,125a: 0,375v: 6pb: 2,0	1070 – 0,8		
24	lc: 1,125a: 0,375v: 2ps: 0,5fs: 2,0	1160 – 0		
25	lc: 1,125a: 0,375v: 3ps: 0,5fs: 2,0	1060 – 4,6		
26	lc: 1,125a: 0,375v: 4ps: 0,5fs: 2,0	1010 – 0		
27	lc: 1,125a: 0,375v: 5ps: 0,5fs: 2,0	1000 – 2,2		
28	lc: 1,125a: 0,375v: 6ps: 0,5fs: 2,0	980 – 0		

Com relação a substituição de vermiculita por areia, os resultados indicam uma considerável redução na densidade aparente a medida que aumentou-se o teor de vermiculita. A redução da densidade aparente para as matrizes foi de cerca de 44% quando

a relação vermiculita/areia que passou de zero para 0,5 (ver Figura 4.2). A mesma tendência aconteceu, em menor escala, para os compósitos. Por exemplo, quando a relação vermiculita/areia aumentou de 0,25 para 0,375, a redução da densidade aparente foi de 7,40% para os compósitos com 2% de polpa de sisal e de 2,70% para os compósitos com 4% de polpa de sisal (nesse caso a relação vermiculita/areia aumentou de 0,1233 para 0,25). Compósitos com relação vermiculita/areia de 0,25 que teve a fração em massa de polpa aumentada de 2% para 4% apresentou uma redução de 11% no valor da densidade.

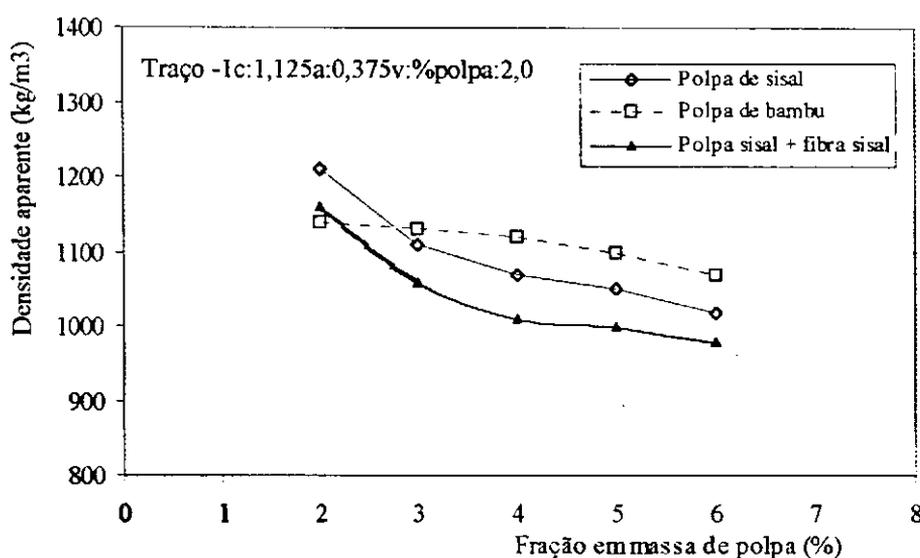


FIGURA 4.1 - Densidade aparente dos compósitos em função da fração em massa de polpa, do tipo de polpa e do teor polpa de sisal +fibra de sisal presente na mistura.

A Figura 4.3 mostra a influência do tipo de cura na densidade aparente dos compósitos. A cura em autoclave reduziu em cerca de 4% a densidade dos compósitos curados em água. Uma redução mais acentuada ocorreu para a mistura com 50% de vermiculita e 6% de polpa de sisal que atingiu 15%. Resultados similares foram observados por COUTTS (1988) para compósitos com polpa de celulose.

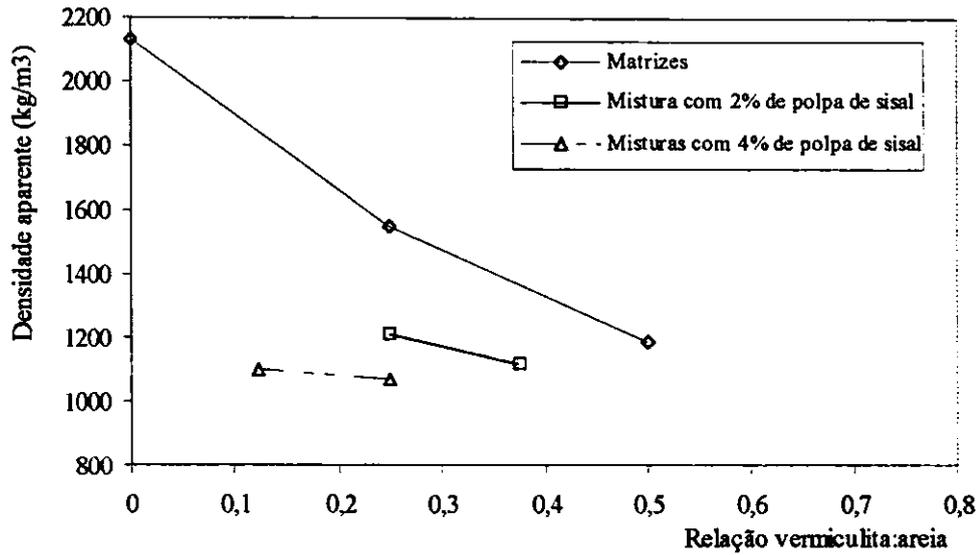


FIGURA 4.2 - Densidade aparente dos compósitos em função da relação vermiculita/areia presente na mistura.

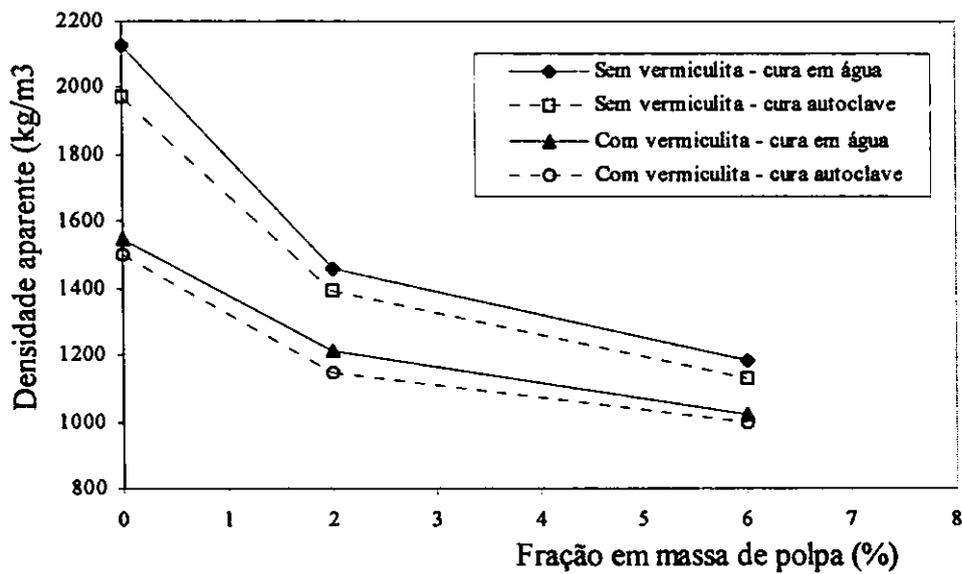


FIGURA 4.3 - Densidade aparente dos compósitos em função do tipo de cura

A Figura 4.4 apresenta a influência de energia de prensagem na densidade aparente dos compósitos. Um aumento na densidade aparente de cerca de 1,5% foi observado para os compósitos contendo vermiculita. Na mistura sem vermiculita e com 2% de polpa de sisal, o aumento na densidade aparente foi de cerca 14%. O aumento na

densidade com o uso de pressão durante a fabricação foi também observado por COUTTS (1988) e tal fato está relacionado com a redução do volume de de vazios do material.

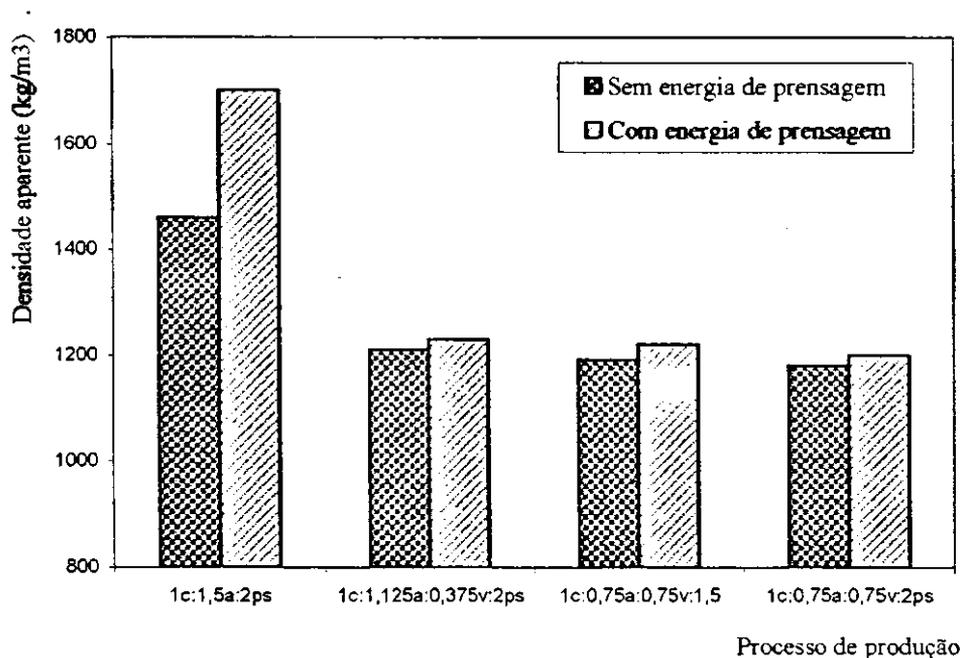


FIGURA 4.4 – Densidade aparente dos compósitos em função do processo de produção

A Tabela 4.2 apresenta os valores médios da absorção de água para os compósitos curados em água, autoclave bem como dos compósitos produzidos com energia de prensagem. Nas Figuras 4.5 à 4.8 mostra-se os valores de absorção de água das misturas curadas em água em função da fração em massa de polpa, do tipo de polpa, da relação vermiculita/areia, do tipo de cura e do processo de produção utilizada no traço. A absorção de água é relacionada, indiretamente, com a densidade uma vez que ambas são dependentes do volume de vazios das amostras.

Observando-se os resultados, nota-se que aumentando-se a fração de polpa ocorre um aumento na absorção de água dos compósitos, sendo tal fato mais significativo para os compósitos com polpa de sisal. Por exemplo, a absorção de água dos compósitos reforçados com polpa de bambu aumentou 21% quando aumentou-se a fração de polpa de 2 para 6% enquanto que os compósitos com polpa de sisal experimentaram uma elevação na absorção de água de 29%. A absorção de água dos compósitos com polpa de sisal e polpa mais fibra de sisal foram praticamente a mesma (ver Figura 4.5).

A partir da Figura 4.5, observa-se que a taxa de crescimento da absorção de água dos compósitos com polpa de sisal é mais significativa até a fração em massa de polpa de 4%. Para os compósitos com polpa de bambu, a taxa de crescimento da absorção com o teor de polpa é praticamente a mesma até o teor de polpa de 6%.

TABELA 4.2 – Valores médios e coeficiente de variação da absorção de água por imersão dos compósitos.

Mistura Nº	Traço	Absorção (%) – CV (%)		
		Água	Autoclave	Pressão
1	1c: 1,5a: 2ps:1,75	31,7 – 4,2	28,7 – 5,8	15,3 – 1,1
2	1c: 1,5a: 6ps:1,75	41,8 – 1,9	41,2 – 1,7	
3	1c: 1,5a:2ps: 2,25	28,0 – 1,7		
4	1c: 1,5c:6ps: 2,25	47,3 – 2,8		
5	1c: 0,75a:0,75v: 2ps:1,75	50,3 – 4,1	40,9 – 2,3	38,5 – 2,9
6	1c: 0,75a:0,75v: 6ps:1,75	57,3 – 3,9	55,6 – 3,9	
7	1c: 0,75a:0,75v: 6ps:2,25	62,0 – 4,7		
8	1c: 0,75a:0,75v: 6ps:2,25	65,0 – 5,3		
9	1c: 1,125a:0,375v: 4ps:2,0	54,9 – 3,4	48,2 – 5,3	
10	1c: 1,125a:0,375v:2ps: 2,0	39,4 – 1,9	38,5 – 3,7	29,7 – 1,1
11	1c: 1,125a:0,375v:3ps: 2,0	47,5 – 4,7		
12	1c: 1,125a:0,375v:5ps: 2,0	57,0 – 0,6		
13	1c: 1,125a:0,375v: 6ps:2,0	58,0 – 0,8	50,1 – 4,1	
14	1c: 0,9375a:0,5625:2ps: 2,0	56,6 – 2,3		
15	1c: 1,315a:0,185v: 4ps:2,0	55,1 – 3,1		
16	1c:1,5a:0,5	10,9 – 1,3	10,7 – 0,8	7,8 – 0,4
17	1c:1,125a:0,375v:0,9	21,1 – 1,1	20,6 – 4,5	
18	1c:0,75a:0,75v:1,5	39,1 – 1,9	35,0 – 2,1	30,0 – 1,7
19	1c: 1,125a:0,375v:2pb: 2,0:	35,8 – 2,1		
20	1c: 1,125a:0,375v:3pb:2,0	37,7 – 3,7		
21	1c: 1,125a:0,375v:4pb:2,0	40,3 – 4,8		
22	1c: 1,125a:0,375v: 5pb:2,0	41,3 – 2,3		
23	1c: 1,125a:0,375v: 6pb:2,0	45,3 – 1,6		
24	1c: 1,125a:0,375v: 2ps:0,5fs:2,0	39,8 – 1,6		
25	1c: 1,125a:0,375v: 3ps:0,5fs:2,0	47,7 – 3,1		
26	1c: 1,125a:0,375v: 4ps:0,5fs:2,0	55,2 – 2,1		
27	1c: 1,125a:0,375v: 5ps:0,5fs:2,0	57,5 – 3,1		
28	1c: 1,125a:0,375v: 6ps:0,5fs:2,0	58,2 – 1,9		

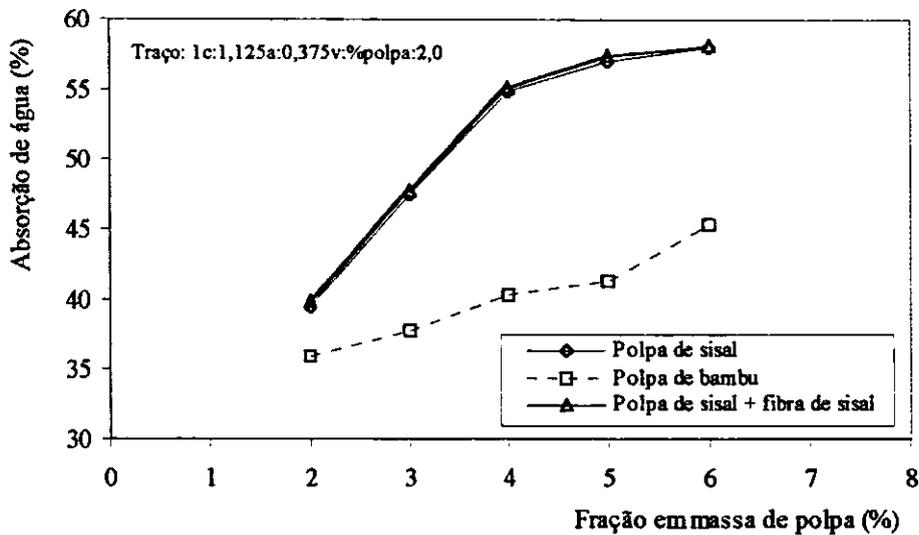


FIGURA 4.5 - Absorção de água dos compósitos em função em função da porcentagem de polpa na mistura.

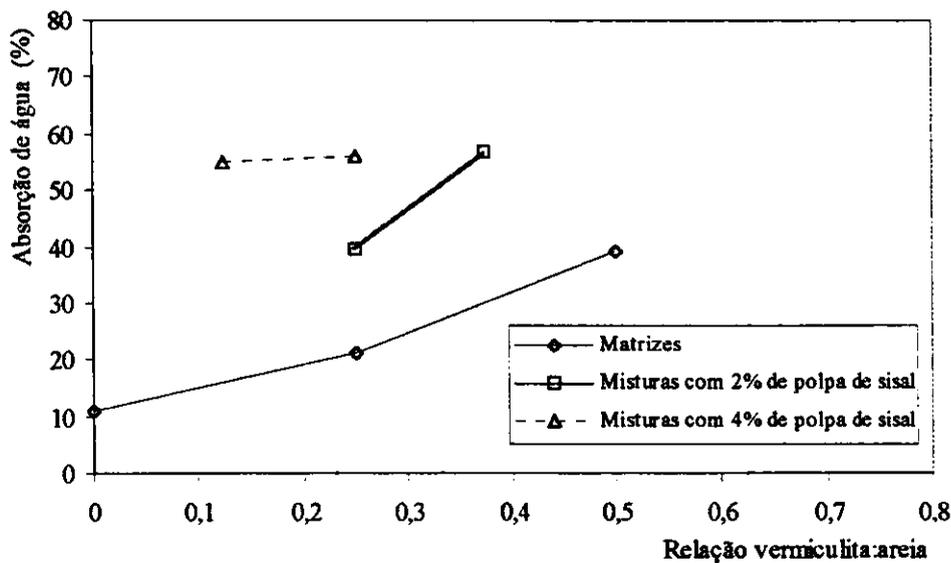


FIGURA 4.6 - Absorção de água dos compósitos em função da relação vermiculita/areia na mistura

Com relação a substituição de vermiculita por areia, os resultados indicam um considerável aumento da absorção de água a medida que aumentou-se o teor de vermiculita. O aumento da absorção de água para as matrizes foi de cerca de 72% quando a

relação vermiculita/areia que passou de zero para 0,5 (ver Figura 4.6). Este resultado está relacionado com a alta absorção da própria polpa, conforme valor apresentado na revisão bibliográfica. A mesma tendência aconteceu para os compósitos. Por exemplo, quando a relação de vermiculita/areia passou de 0,25 para 0,375 a elevação da absorção de água foi de 30% para os compósitos com 2% de polpa. Para os compósitos com 4% de polpa de sisal a absorção de água foi de 1,46%. O aumento da absorção de água para os compósitos reforçados com polpa de sisal com 0,25 de vermiculita foi de 29,5% quando a fração em massa de polpa aumentou de 2 para 4%.

A Figura 4.7 mostra a variação da absorção de água com o tipo de cura. Uma redução da absorção de água ocorreu quando os compósitos foram curados em autoclave. A redução da absorção de água dos compósitos curados em autoclave foi de cerca de 8%. A única exceção ocorreu para a mistura com 50% de vermiculita e 2% de polpa de sisal cuja redução foi de cerca de 18%.

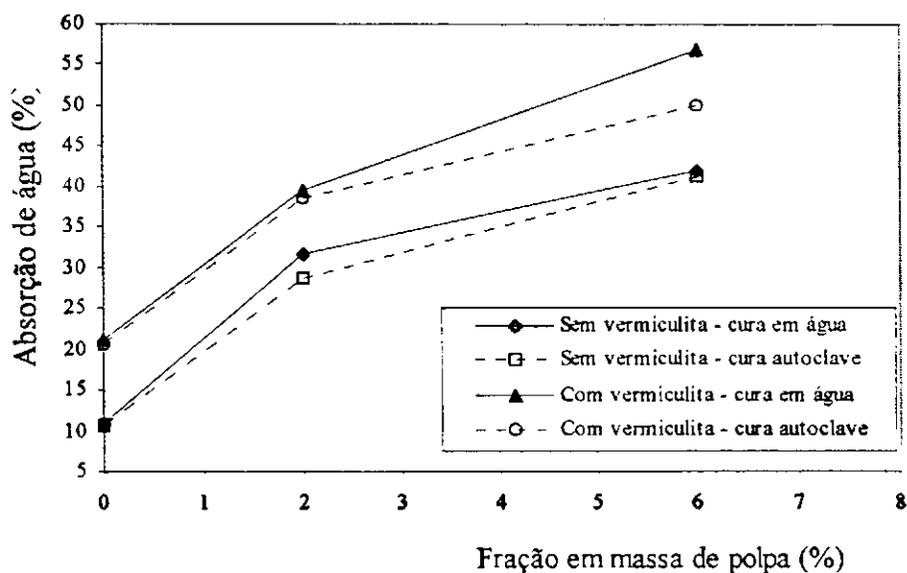


FIGURA 4.7 - Absorção de água dos compósitos em função do tipo de cura

A Figura 4.8 apresenta a influência do processo de produção na absorção de água dos compósitos. Uma redução na absorção de água de 30% para os compósitos produzidos com energia de prensagem foi observado. Na mistura sem vermiculita e com

2% de polpa de sisal a redução na absorção de água foi de cerca 10%. A redução na absorção está relacionada com a redução do índice de vazios devido a prensagem.

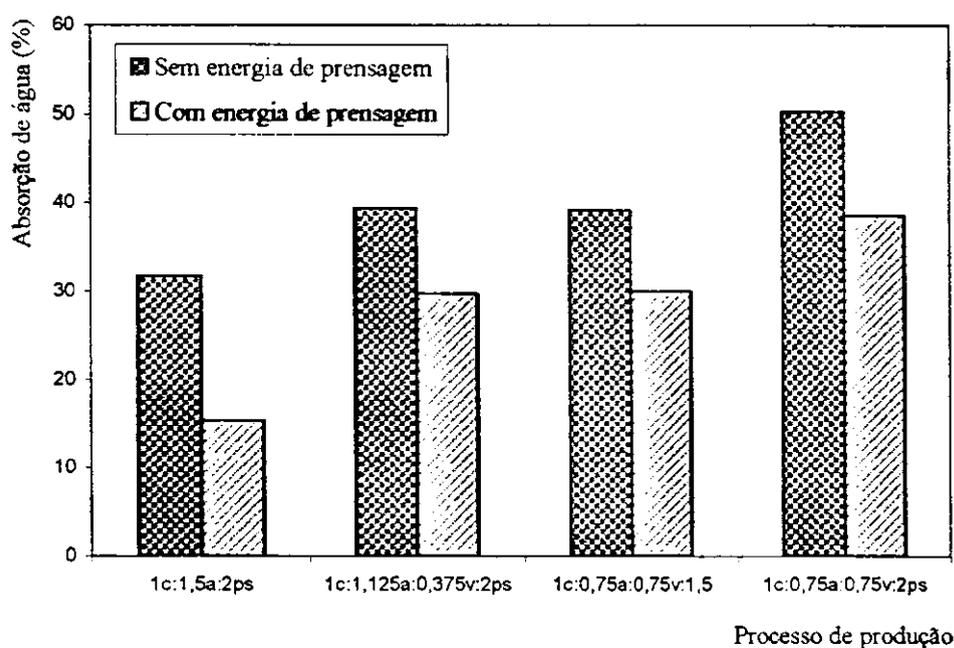


FIGURA 4.8 - Absorção de água dos compósitos em função processo de produção

A Figura 4.9 apresenta a variação da absorção de água com a densidade aparente para as misturas estudadas. Os resultados obtidos indicam que a absorção de água é inversamente proporcional à densidade específica. Uma equação linear foi estabelecida para o conjunto de dados experimentais obtidos. A equação proposta é válida para valores de densidade aparente variando de 850 a 1500 kg/m³.

$$ABS = - 0,064\gamma + 119,2 \quad (4.1)$$

Onde:

ABS – Absorção de água (%)

γ - Densidade aparente (kg/m³)

A Tabela 4.3 apresenta uma comparação entre os dados experimentais e os previstos com o uso da Equação 4.1. O percentual de erros na Tabela 4.3 mostra a exatidão da equação proposta.

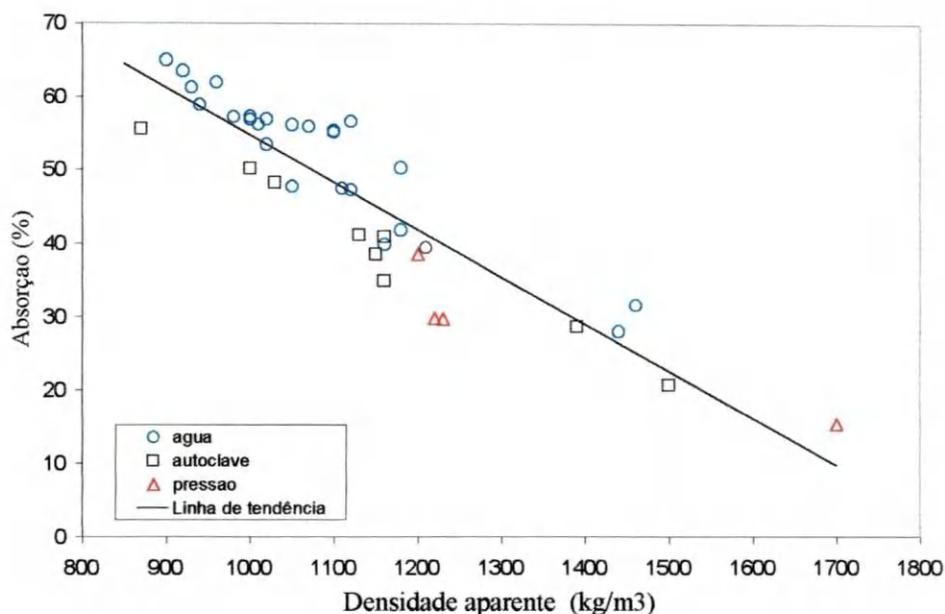


FIGURA 4.9 – Relação entre absorção de água e densidade aparente

TABELA 4.3 – Resultados experimentais e previstos pela equação 4.1.

Mistura	Densidade Aparente (kg/m ³)	Absorção de água (%)		Erro (%)
		Resultados experimentais	Valores obtidos	
1c:0,75a:0,75v:6ps:2,25	900	65,0	61,6	-5,23
1c:0,75a:0,75v:2ps:2,25	960	62,0	57,76	-6,83
1c:0,75a:0,75v:6ps:1,75	1000	57,3	55,2	-3,66
1c:1,125a:0,375v:5ps:2,0	1050	56,1	52,0	-7,30
1c:1,5a:2,25v:6ps:2,25	1120	47,3	47,52	+0,50
1c:0,75a:0,75v:2ps:1,75	1160	40,9	44,96	+9,92
1c:1,5a:6ps:1,75	1180	41,8	43,68	+4,50
1c:1,125a:0,375v:2ps:2,0	1210	39,4	41,76	+5,98
1c:1,5v:2ps:2,25	1440	28,0	27,04	-3,40
1c:1,5a:2ps:1,75	1460	31,7	25,76	-18,70

Resultados de absorção de água versus densidade aparente obtidos por COUTTS e WARDEN (1992) para argamassas de cimento reforçadas com polpa de sisal e moldadas sob pressão e, resultados obtidos por SOROUSHIAN (1994) para compósitos de cimento reforçado com polpa de celulose, são apresentados na Figura 4.10 juntamente com os resultados observados para os compósitos curados em autoclave ou moldadas sob pressão em estudo. Uma boa concordância pode ser observada para toda a faixa de densidade aparente estudada.

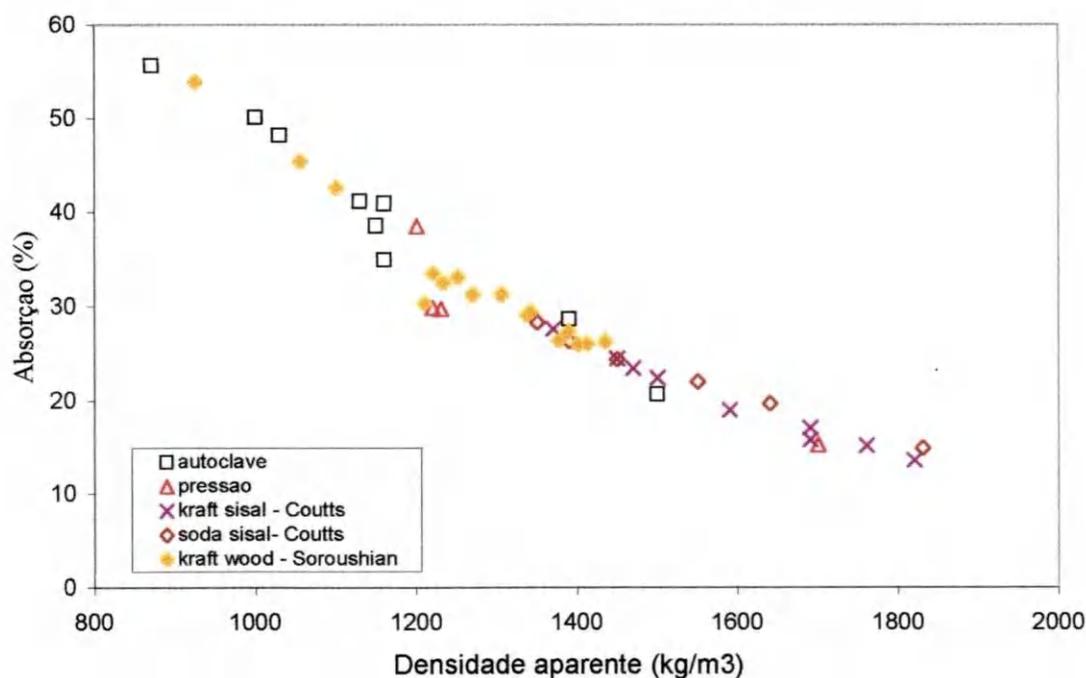


FIGURA 4.10 – Relação de absorção de água versus densidade aparente observada na literatura e no presente estudo.

A Tabela 4.4 apresenta os valores médios do índice de vazios para os compósitos curados em água, autoclave bem como para os compósitos produzidos com energia de prensagem. A Figura 4.11 à 4.14 mostra o índice de vazios em função da fração em massa de polpa, da relação vermiculita/areia, do tipo de cura e do processo de produção utilizado.

Observando-se os resultados, nota-se que aumentando-se a fração de polpa ocorre um aumento no índice de vazios dos compósitos, sendo tal fato mais significativo

para os compósitos com polpa de sisal mais fibra de sisal. Por exemplo, o índice de vazios dos compósitos reforçados com polpa de bambu aumentou 14% quando aumentou-se a fração de polpa de 2 para 6%, enquanto que o índice de vazios aumentou 17,87% quando aumentou-se a fração de 2 para 6% e adicionou-se 0,5% de fibra (ver Figura 4.11). O índice de vazios dos compósitos com polpa de sisal foi cerca de 1,56% menor que os dos compósitos com polpa mais fibra de sisal.

TABELA 4.4 – Valores médios e coeficiente de variação do índice de vazios dos compósitos.

Mistura Nº	Traço	Índice de vazios (%) – CV (%)		
		Água	Autoclave	Pressão
1	1c: 1,5a: 2ps: 1,75	41,2 – 1,3	39,8 – 0,8	26,1 – 0,7
2	1c: 1,5a: 6ps: 1,75	46,3 – 1,9	45,9 – 1,6	
3	1c: 1,5a: 2ps: 2,25	39,2 – 2,3		
4	1c: 1,5c: 6ps: 2,25	53,8 – 4,2		
5	1c: 0,75a: 0,75v: 2ps: 1,75	45,6 – 2,4	43,6 – 3,8	42,7 – 1,7
6	1c: 0,75a: 0,75v: 6ps: 1,75	52,0 – 1,7	49,0 – 3,4	
7	1c: 0,75a: 0,75v: 6ps: 2,25	51,4 – 2,1		
8	1c: 0,75a: 0,75v: 6ps: 2,25	51,9 – 2,8		
9	1c: 1,125a: 0,375v: 4ps: 2,0	50,4 – 3,2	48,1 – 1,2	
10	1c: 1,125a: 0,375v: 2ps: 2,0	42,0 – 1,3	41,2 – 4,1	37,1 – 3,9
11	1c: 1,125a: 0,375v: 3ps: 2,0	47,7 – 3,4		
12	1c: 1,125a: 0,375v: 5ps: 2,0	51,1 – 3,7		
13	1c: 1,125a: 0,375v: 6ps: 2,0	52,2 – 1,8	50,2 – 3,3	
14	1c: 0,9375a: 0,5625: 2ps: 2,0	52,6 – 0,9		
15	1c: 1,315: 0,185: 4ps: 2,0	49,5 – 2,1		
16	1c: 1,5a: 0,5	21,4 – 2,1	21,2 – 1,2	16,4 – 2,3
17	1c: 1,125a: 0,375v: 0,9	31,0 – 1,8	30,8 – 1,9	
18	1c: 0,75a: 0,75v: 1,5	43,5 – 2,4	40,8 – 2,8	36,5 – 4,1
19	1c: 1,125a: 0,375v: 2pb: 2,0:	39,1 – 3,8		
20	1c: 1,125a: 0,375v: 3pb: 2,0	40,7 – 1,1		
21	1c: 1,125a: 0,375v: 4pb: 2,0	43,2 – 2,7		
22	1c: 1,125a: 0,375v: 5pb: 2,0	43,4 – 2,2		
23	1c: 1,125a: 0,375v: 6pb: 2,0	45,5 – 4,6		
24	1c: 1,125a: 0,375v: 2ps: 0,5fs: 2,0	43,5 – 1,9		
25	1c: 1,125a: 0,375v: 3ps: 0,5fs: 2,0	48,5 – 3,1		
26	1c: 1,125a: 0,375v: 4ps: 0,5fs: 2,0	51,0 – 4,3		
27	1c: 1,125a: 0,375v: 5ps: 0,5fs: 2,0	51,9 – 4,9		
28	1c: 1,125a: 0,375v: 6ps: 0,5fs: 2,0	52,6 – 5,6		

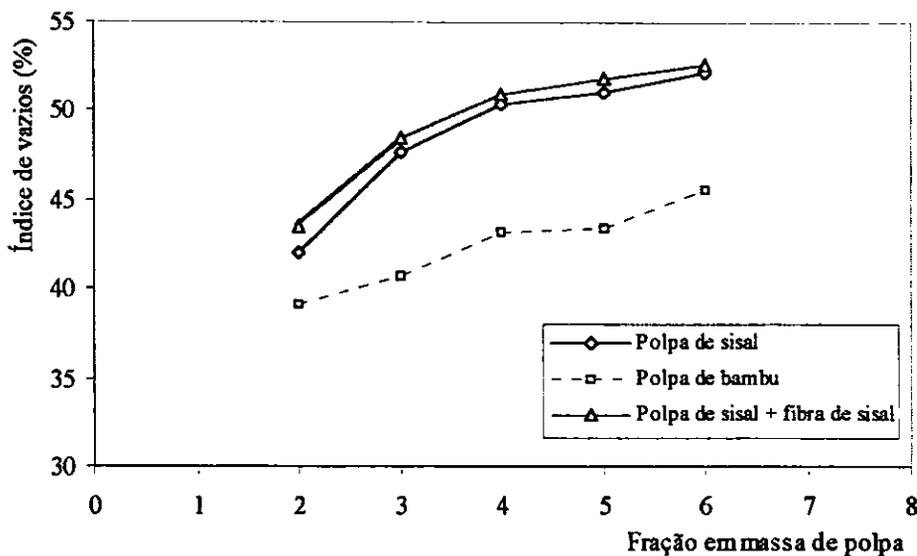


FIGURA 4.11 - Índice de vazios dos compósitos em função da fração em massa de polpa na mistura.

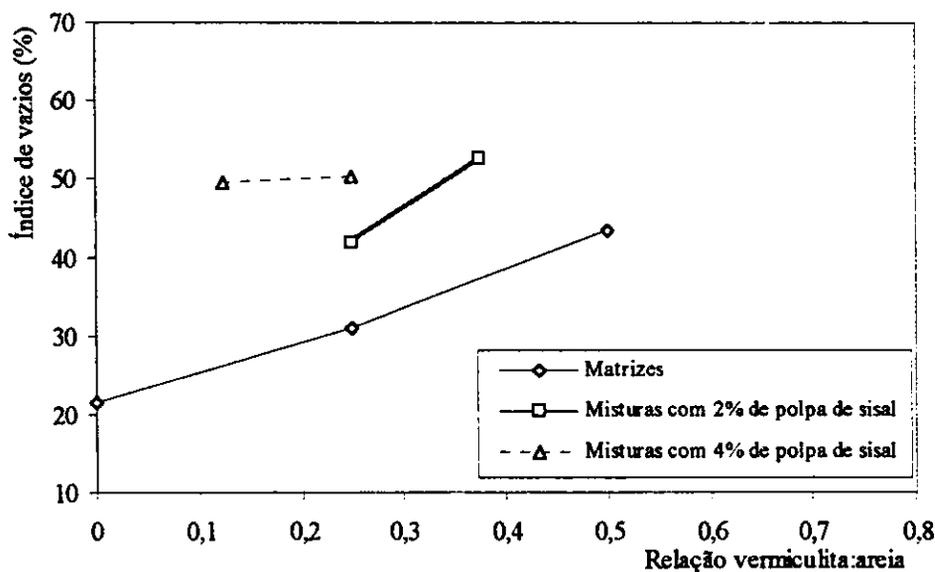


FIGURA 4.12 - Índice de vazios dos compósitos em função da relação vermiculita/areia na mistura.

Com relação a substituição de vermiculita por areia, os resultados indicam um considerável aumento no índice de vazios a medida que aumentou-se o teor de vermiculita. O aumento do índice de vazios para as matrizes foi de cerca de 51% quando a relação vermiculita/areia passou de zero para 0,5 (ver Figura 4.12). A mesma tendência

aconteceu para os compósitos. Por exemplo, quando a relação vermiculita/areia que passou de 0,1233 para 0,25 observou-se uma elevação de 25% no índice de vazios. Os compósitos com 2% de polpa de sisal. O índice de vazios dos compósitos reforçados com polpa de sisal e com relação vermiculita/areia 0,25 aumentou 20% quando a fração em massa de polpa aumentou de 2 para 4%.

A Figura 4.13 mostra a variação do índice de vazios com o tipo de cura. Uma redução do índice de vazios ocorreu quando os compósitos foram curadas em autoclave. A redução do índice de vazios dos compósitos foi de cerca de 4%.

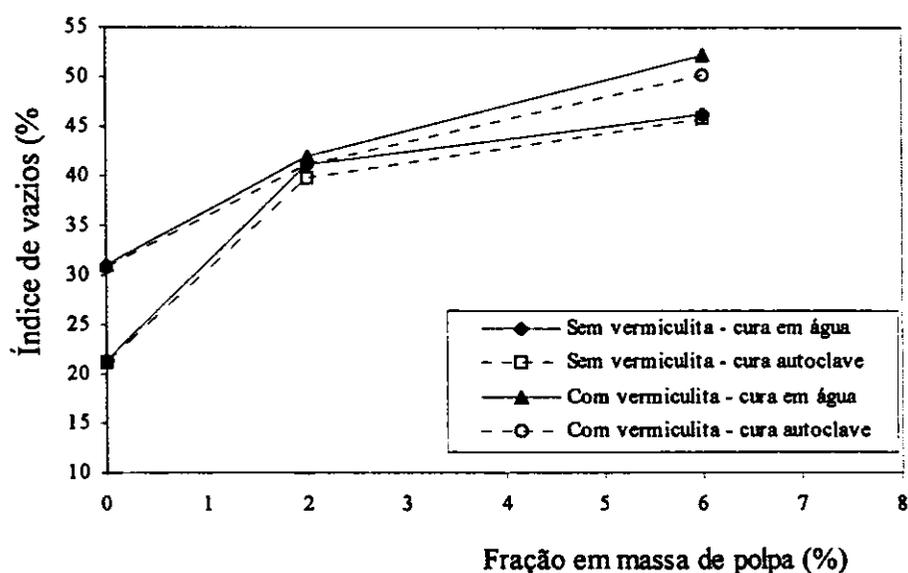


FIGURA 4.13 - Índice de vazios dos compósitos em função em função do tipo de cura

A Figura 4.14 apresenta a influência do processo de produção no índice de vazios dos compósitos. A redução no índice de vazios foi de cerca de 15% para os compósitos produzidos com energia. Na mistura sem vermiculita e com 2% de polpa de sisal a redução no índice de vazios foi de cerca 57%.

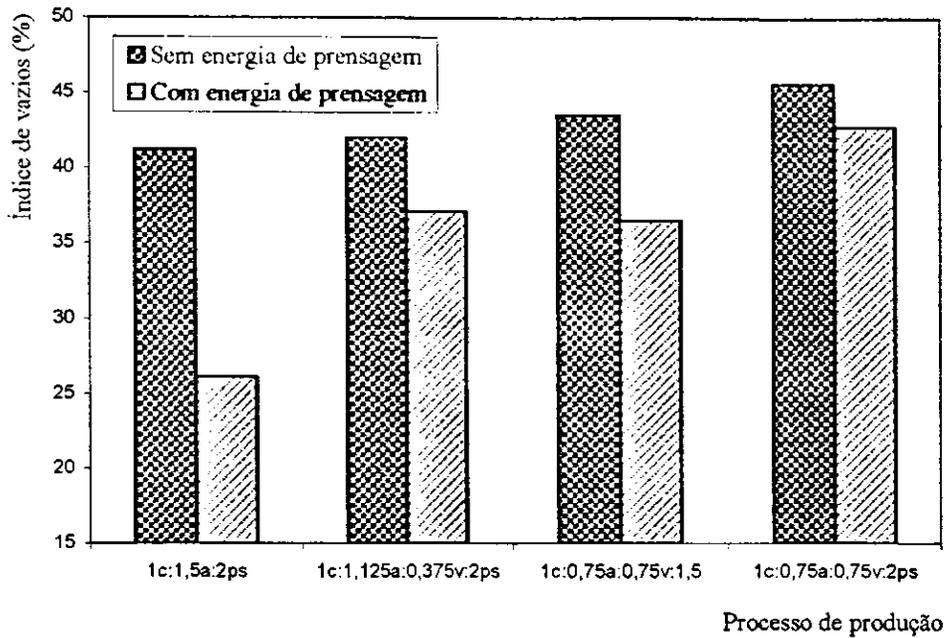


FIGURA 4.14 - Índice de vazios dos compósitos em função do processo de produção

Dos resultados apresentados, conclui-se que aumentando-se o teor de polpa ou fração de vermiculita na mistura reduz-se a densidade e aumenta-se a absorção de água e o índice de vazios. Isso é de se esperar vista a característica higroscópica da polpa e da vermiculita. Outro fator importante é a baixa densidade desses constituintes quando comparada à da areia e do cimento portland.

4.1.2 Massa específica unitária seca em estufa, absorção de água e variações dimensionais até a saturação das placas compósitas

A Tabela 4.5 apresenta os valores da massa unitária, absorção de água e variações dimensionais até a saturação das placas compósitas.

TABELA 4.5 . Valores da massa unitária, absorção de água e variações dimensionais até a saturação das placas compósitas

Misturas N ^o	Traço	Massa unitária seca em estufa (kg/m ³)	Absorção de água até a saturação (%)	Variações dimensionais até a saturação (mm/m)
16	lc:1,5a:0,5	1860,70	13,88	0,54
1	lc:1,5a:2ps:1,75	1218,21	37,81	0,97
10	lc:1,125a:0,375v:2ps:2,0	940,31	57,97	1,68
18	lc:0,75a:0,75v:1,75	1144,00	41,90	2,25
5	lc:0,75a:0,75v:2ps:1,75	885,92	62,89	2,29

Nas Figuras 4.15 e 4.16 apresenta-se, respectivamente, a variação da absorção de água com a massa específica seca em estufa e os valores da variação dimensional em função da massa específica seca em estufa para os cinco traços estudados.

Com o objetivo de se obter uma previsão da absorção de água até a saturação das placas, uma equação linear foi estabelecida para o conjunto de dados experimentais obtidos. A equação proposta é a seguinte:

$$ABS = - 0,064\gamma + 113,6 \tag{4.2}$$

Onde:

ABS_{Sat} – Absorção de água até a saturação (%)

γ_s – Massa específica seca em estufa (kg/m³)

A Tabela 4.6 apresenta uma comparação entre os dados experimentais e aqueles previstos com o uso da equação 4.2. O percentual de erros na Tabela 4.6 mostra a exatidão da equação proposta.

TABELA 4.6 – Resultados experimentais e previstos pela equação

Mistura	Massa seca em estufa (kg/m ³)	Absorção de água das placas (%)		Erro (%)
		Resultados experimentais	Valores Obtidos	
lc:1,5a:2ps:1,75	1218,21	37,81	41,20	+8,96
lc:1,125a:0,375v:2ps:2,0	940,31	57,97	59,00	+1,77
lc:0,75a:0,75v:1,75	1144,00	41,90	45,98	+9,70
lc:0,75a:0,75v:2ps:1,75	885,92	62,89	62,50	-0,60

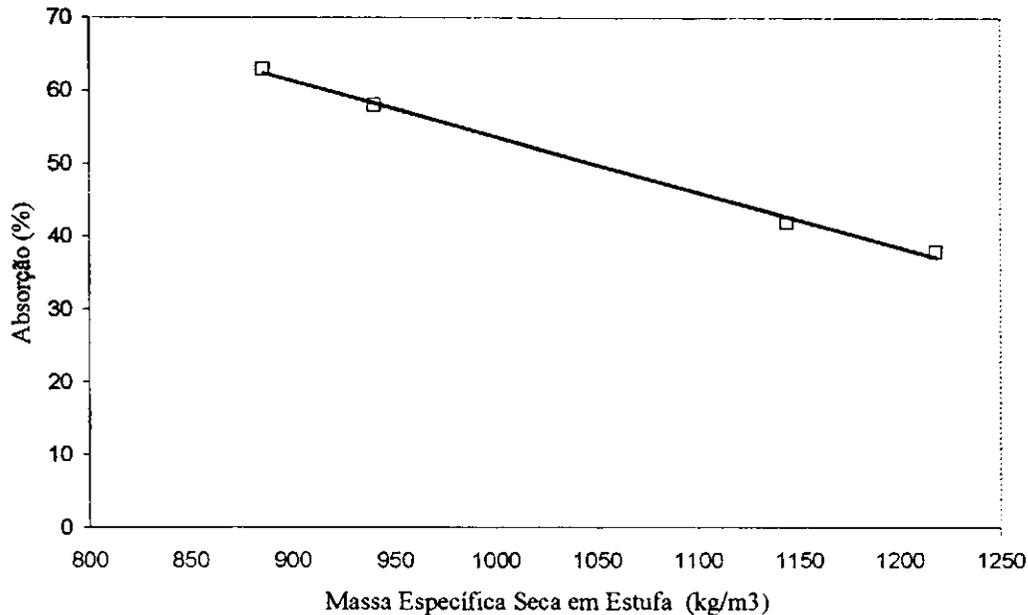


FIGURA 4.15 – Variação da absorção de água em função da massa específica seca em estufa.

Com relação às variações dimensionais, os resultados obtidos indicam a expansão dos compósitos em presença de água. Normalmente estuda-se a expansão de compósitos a base de fibras de celulose variando-se a umidade relativa de 40% à 90% (SARJA, 1988). No presente estudo mediu-se a expansão da condição de seco em estufa a 105^oC até a completa saturação o que representa o caso extremo de variação dimensional.

Os valores obtidos indicam que a expansão das placas aumentou de 0,54 mm/m para 2,25 mm/m quando a relação vermiculita/areia variou de zero para 0,5. A presença de 2% de polpa de sisal na mistura aumentou a expansão em cerca de 79,60% para a matriz sem vermiculita e 132% para a matriz com vermiculita.

SARJA (1988) mediu a expansão de compósitos com polpa de celulose com densidade variando de 700 à 1500 kg/m³ curados a 65% de umidade relativa e logo após cura imersos em água por 24 horas. A deformação da expansão atingiu 3 mm/m para o

compósito com a densidade de 700 kg/m³ e 2 mm/m para o compósito com 1500 kg/m³ de massa unitária.

TESFAYE (1978) mediu variações dimensionais de placas de 1,5 m de comprimento de argamassas reforçadas com fibra de vidro (traço de 1:3 com w/c = 0,35, uso de superplastificante e 5% em peso de fibra de vidro) e o máxima expansão observado foi de 1,7 mm/m.

As variações observadas no presente estudo estão, portanto, dentro da faixa de valores encontrados na literatura e bem abaixo dos 80 mm/m que, segundo SARJA (1988), é permitido para placas de cimento reforçada com serragem de madeira (“wood chip composite”). Os valores encontrados demonstram que, assim como na absorção de água, existe uma tendência para a diminuição da variação dimensional com o aumento da massa específica do material. O gráfico da Figura 4.16 demonstra essa tendência.

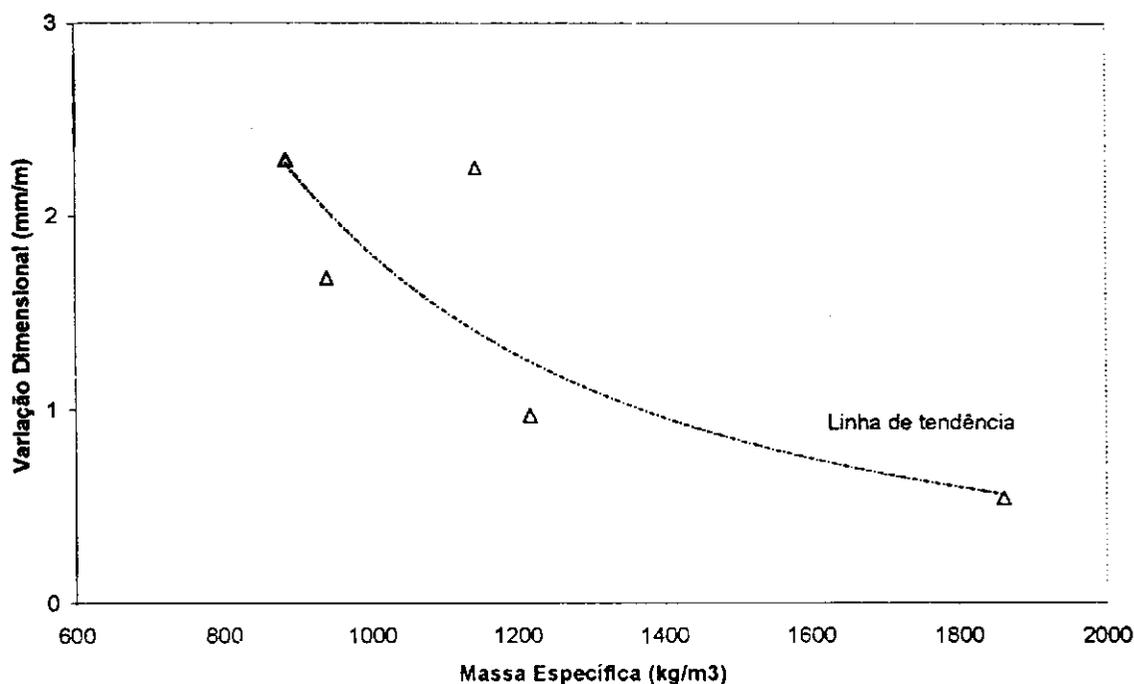


FIGURA 4.16 – Variação dimensional em função da massa específica seca em estufa.

4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS

4.2.1 Resistência à compressão

4.2.1.1 Resistência à compressão dos compósitos produzidos sem energia de prensagem e curadas em água

4.2.1.2 Influência da fração em massa de polpa, do teor de vermiculita e do fator água/cimento na resistência à compressão - análise do desenho fatorial 2^3

A Figura 4.17 apresenta os valores médios (em MPa) e o coeficiente de variação (em %) para a resistência à compressão, das argamassas reforçadas com polpas de sisal.

Os resultados apresentados na Figura 4.17 podem ser combinados de sete maneiras diferentes com o objetivo de se estimar diferentes efeitos. Por exemplo, existem quatro observações da resistência à compressão, no nível mais alto do fator X_1 e quatro no seu nível mais baixo. A diferença média entre elas é uma estimativa do efeito principal de X_1 . Da mesma forma os efeitos principais dos fatores X_2 e X_3 podem ser calculados. Os resultados apresentados na Tabela 4.7 mostram que o efeito médio do teor de polpa (X_3) na a resistência à compressão das argamassas é uma redução de 1,1841 MPa no seu valor. Essa redução, no entanto, é maior para a porcentagem de substituição de vermiculita de 50%. No efeito médio da relação água/cimento (X_2) houve um decréscimo de 0,6225 MPa no seu valor. Essa redução, no entanto, é maior para a porcentagem de 6% de polpa de sisal. O efeito médio da relação areia/vermiculita (X_1) na resistência à compressão das argamassas é um decréscimo de 1,1608 MPa no seu valor. Esse decréscimo é maior para a

relação água/cimento de 1,75 do que para a relação água/cimento de 2,25 como pode ser visto na Figura 4.17. Esses fatos mostram que os fatores X_3 e X_1 ; X_2 e X_3 ; X_1 e X_2 não apresentam um comportamento de adição e que existe uma interação entre os mesmos. Uma estimativa da interação $X_1 \times X_3$ é dada pela metade da diferença entre o efeito principal de X_1 , no nível mais alto de X_3 , e o efeito principal de X_1 , no nível mais baixo de X_3 . As interações $X_1 \times X_2$, $X_2 \times X_3$ e $X_1 \times X_2 \times X_3$ podem ser avaliadas de forma similar. Os resultados das interações são apresentados na Tabela 4.7.

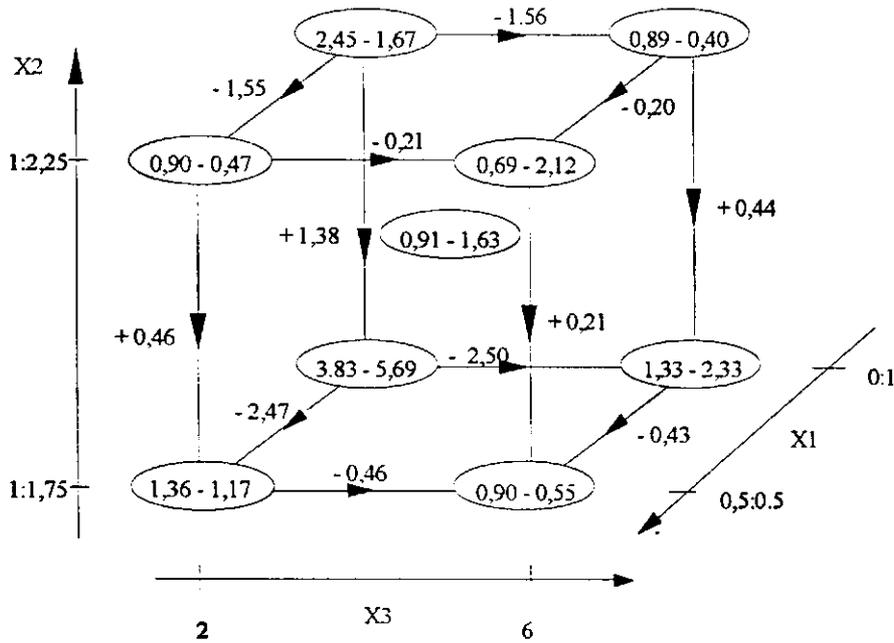


FIGURA 4.17 – Valores médios dos ensaios da resistência à compressão, em MPa e coeficiente de variação, CV, em (%).

TABELA 4.7 – Efeitos principais e interações

Efeitos principais (MPa)			Interações (MPa)			
X_1	X_2	X_3	$X_1 \times X_2$	$X_1 \times X_3$	$X_2 \times X_3$	$X_1 \times X_2 \times X_3$
-1,1608	-0,6225	-1,1841	-0,2875	-0,8458	0,2941	0,1725

Uma análise de variância foi realizada para mostrar se os efeitos eram significativos. A significância de cada efeito foi testada a níveis de confiança de 95,0; 97,5 e 99,0% usando-se o ensaio F. A Tabela 4.8 apresenta os resultados da análise de variância realizada para os dados obtidos nessa investigação.

Com base nos valores da Tabela 4.8, pode-se notar que os fatores principais X_1 e X_3 influenciam significativamente, com 97,5% de confiança a resistência à compressão dos compósitos. Interação $X_1 \times X_3$ influencia significativamente, com 95% de confiança, a resistência à compressão dos compósitos.

TABELA 4.8 – Análise de variância

Fonte de variação	Soma dos quadrados SS	Graus de Liberdade	Média ao Quadrado	Relação média quadrada – MSR F_0 - ratio	MSR mínimo necessário para um fator ser significativo		
					$F_{0,05,1,8}$	$F_{0,025,1,8}$	$F_{0,001,1,8}$
Fatores principais							
X_1 (areia:vermiculita)	8,0852	1	8,0852	10,28	5,32	7,57	11,3
X_2 (a/c)	2,3250	1	2,3250	2,96	5,32	7,57	11,3
X_3 (volume polpa)	8,4135	1	8,4135	10,70	5,32	7,57	11,3
Interações							
$X_1 \times X_2$	0,4959	1	0,4959	0,63	5,32	7,57	11,3
$X_1 \times X_3$	4,2926	1	4,2926	5,46	5,32	7,57	11,3
$X_2 \times X_3$	0,5192	1	0,5192	0,66	5,32	7,57	11,3
$X_1 \times X_2 \times X_3$	0,1785	1	0,1785	0,23	5,32	7,57	11,3
Erro experimental	6,29	8	0,78625				

Com objetivo de se obter um modelo para a resistência à compressão dos compósitos, uma equação de regressão linear múltipla foi estabelecida para o conjunto de dados experimentais obtidos. O modelo pode ser escrito em termos das observações como:

$$\sigma_c = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + E \quad (4.3)$$

Onde:

σ_c - é a resistência à compressão;

$\{\beta_i\}$ - são os coeficientes de regressão desconhecidos;

$\{X_i\}$ - são os fatores; e

$\{E\}$ - representa os erros aleatórios

O modelo ajustado aos dados que é válido para os níveis estudados é dado pela equação 4.3. A Tabela 4.9 apresenta uma comparação entre os dados experimentais e aqueles previstos com o uso da equação 4.4.

$$\sigma_c = 5,7 - 2,3 \% \text{ vermiculita} - 1,29 \text{ a/c} - 0,29 \% \text{ polpa} \quad (4.4)$$

TABELA 4.9 – Resultados experimentais e previstos pelo modelo para resistência à compressão

Mistura	Resultados experimentais (MPa)	Valores previstos (MPa)	Erro (%)
1c:1,5a:2ps:1,75	3,83	3,04	-20,62
1c:1,5a:6ps:1,75	1,33	1,85	+39,10
1c:1,5a:2ps:2,25	2,45	2,39	-2,45
1c:1,5a:6ps:2,25	0,89	1,21	+35,95
1c:0,75a:0,75v:2ps:1,75	1,36	1,87	+37,50
1c:0,75a:0,75v:6ps:1,75	0,90	0,69	-22,78
1c:0,75a:0,75v:2ps:2,25	0,90	1,23	+36,67
1c:0,75a:0,75v:6ps:2,25	0,69	0,695	+0,72

A equação 4.4, que descreve um hiperplano no espaço tridimensional das variáveis independentes $\{X_i\}$, conduziu a valores que atingiu 40% de erro quando comparados aos resultados experimentais. Sem dúvida são erros altos, mas a equação pode ser usada como uma primeira aproximação para os valores de resistência à compressão. A Tabela 4.10 apresenta resultados dos ensaios de resistência à compressão realizados no ponto central e em outros seis níveis intermediários dos fatores e compara os resultados com aqueles calculados com o uso da equação 4.4.

TABELA 4.10 – Resultados previstos e observados da resistência à compressão em níveis intermediários

Mistura	Resultados experimentais (MPa)	Valores previstos (MPa)	Erro (%)
1c:1,125a:0,375v:4ps:2,0	1,14	1,54	+35,08
1c:1,125a:0,375v:3ps:2,0	1,36	1,84	+35,29
1c:1,125a:0,375v:5ps:2,0	1,06	1,24	+16,98
1c:1,125a:0,375v:6ps:2,0	0,91	0,95	+4,39
1c:1,315a:0,185v:4ps:2,0	1,36	1,83	+34,55
1c:0,9375a:0,5625v:2ps:2,0	1,20	1,84	+53,33
1c:1,125a:0,375v:2ps:2,0	1,75	2,13	+21,71

4.2.1.3 Influência do tipo de polpa, e da polpa de sisal mais fibra de sisal na resistência à compressão

A Tabela 4.11 apresenta os valores médios da resistência à compressão para compósitos reforçados com polpa de sisal, polpa de bambu e com polpa de sisal mais fibra de sisal com os seus respectivos coeficiente de variação. A Figura 4.18 mostra os valores de resistência à compressão das misturas curadas em água em função da fração em massa de polpa e do tipo de polpa utilizadas no traço.

TABELA 4.11–Valores de resistência à compressão média e cv para os compósitos reforçados com polpa de sisal (ps), bambu (pb) e polpa de sisal+fibras de sisal (ps+fs).

Misturas Nº	Traço	ps	pb	ps +fs
		σ_c - CV (MPa) - (%)	σ_c - CV (MPa) - (%)	σ_c - CV (MPa) - (%)
10, 19 e 24	1c:1,125a:0,375v:2polpa:2,0	1,75 - 4,87	1,37 - 1,00	1,80 - 0,89
11, 20 e 25	1c:1,125a:0,375v:3polpa:2,0	1,36 - 0,18	1,29 - 8,71	1,47 - 3,55
9, 21 e 26	1c:1,125a:0,375v:4polpa:2,0	1,14 - 1,24	1,18 - 0	1,26 - 9,90
12, 22 e 27	1c:1,125a:0,375v:5polpa:2,0	1,06 - 2,91	1,05 - 3,33	1,13 - 3,59
13, 23 e 28	1c:1,125a:0,375v:6polpa:2,0	0,91 - 1,10	0,91 - 0,39	1,10 - 0,70

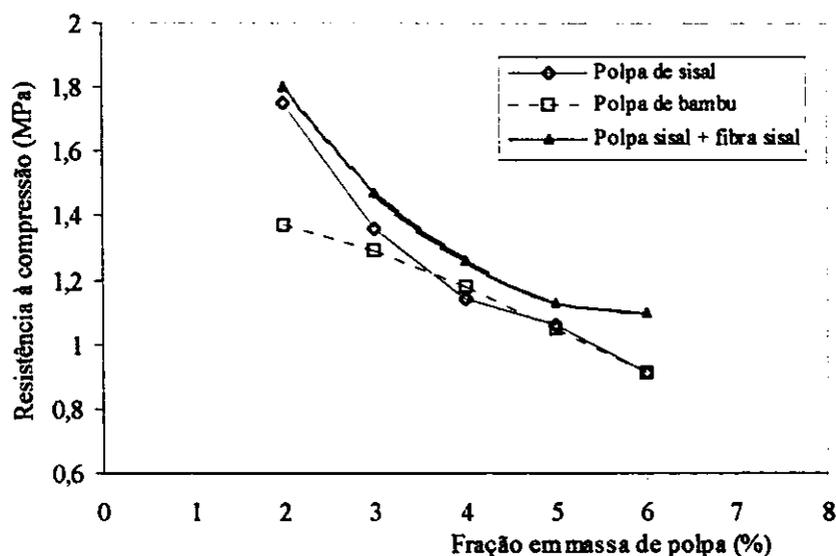


FIGURA 4.18 – Resistência de compressão em função da fração em massa

Os resultados indicam que o uso da polpa mais fibra de sisal conduziu a maiores valores de resistência à compressão para todas as misturas estudadas. Com relação a influência do tipo de polpa, nota-se que até 3% a polpa de sisal foi mais eficiente que a fibra de bambu mas que a partir desse teor as duas polpas conduzem ao mesmo resultado.

Com relação à fração de reforço, nota-se que aumentando-se a fração de polpa ocorre uma redução na resistência de compressão dos compósitos, sendo tal fato mais significativo para os compósitos com polpa de sisal e polpa mais fibra de sisal. Por exemplo, a resistência à compressão reforçados com polpa de bambu caiu 33% quando aumentou-se a fração de polpa de 2 para 6%. Para as mesmas frações em massa de polpa de sisal, o decréscimo observado na resistência à compressão foi de 48%. A presença de fibra de sisal em acréscimo a polpa como elemento de reforço dos compósitos diminuiu a resistência à compressão e cerca de 38,88% (ver Figura 4.18).

O comportamento descrito está em concordância com o observado para a densidade dos compósitos (ver Figura 4.1). O compósito com polpa de sisal possui maior densidade que o compósito com polpa de bambu para o teor de polpa de 2% mas reduziu mais rapidamente a densidade com o aumento do volume de polpa. O fato dos compósitos com fibra de sisal mais polpa de sisal terem apresentados maior resistências pode estar relacionado com o fato de a fibra de 25 mm de comprimento ser mais efetiva no controle da micro-fissuração do compósito.

4.2.1.4 Influência da substituição parcial da areia por vermiculita

A Tabela 4.12 apresenta os valores médios de resistência à compressão com seus respectivos coeficiente de variação, para os compósitos com a substituição de areia por vermiculita.

TABELA 4.12 – Resistência à compressão de compósitos com substituição da areia por vermiculita

Mistura Nº	Traço	Relação areia:vermiculita	σ_c - CV (MPa) - (%)
16	lc:1,5a:0,5	0	26,17 – 5,59
17	lc:1,125a:0,375v:0,9	0,25	5,77 – 1,63
18	lc:0,75a:0,75v:1,5	0,75	1,69 – 4,28
10	lc:1,125a:0,375v:2ps:2,0	0,25	1,75 - 4,87
14	lc:0,9375a:0,5625v:2ps:2,0	0,375	1,20 - 7,06
15	lc:1,3125a:0,185v:4ps:2,0	0,1233	1,36 - 2,84
9	lc:1,125a:0,375v:4ps:2,0	0,25	1,14 - 1,24

A Figura 4.19 mostra os valores médios de resistência à compressão das misturas curadas em água em função da relação areia/vermiculita, das matrizes e da polpa de sisal.

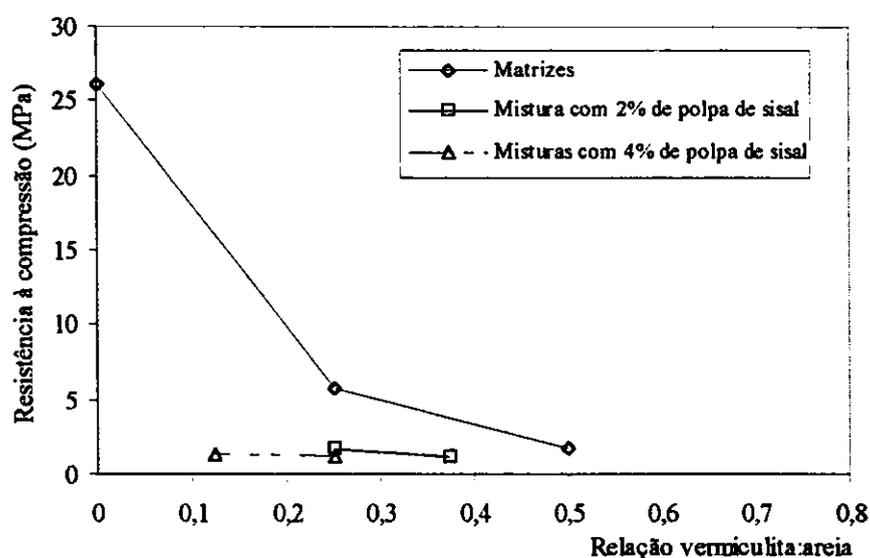


FIGURA 4.19 – Resistência de compressão em função da relação vermiculita/areia

Com relação a substituição de vermiculita por areia, os resultados indicam uma considerável redução na resistência à compressão a medida que aumentou-se o teor de vermiculita. A redução na resistência à compressão para as matrizes foi de cerca de 15,48 vezes quando a relação vermiculita/areia que passou de zero para 0,5 (ver Figura 4.19). A mesma tendência aconteceu, em menor escala, para os compósitos. Por exemplo, quando a relação de vermiculita/areia que passou de 0,25 para 0,375 a redução na resistência à

compressão foi 31,42% para os compósitos com 2% de polpa de sisal. Para os compósitos com 4% de polpa de sisal que tiveram relação de vermiculita/areia aumentada de 0,1233 para 0,25 observou-se uma redução na resistência à compressão de 19,29%. A redução da resistência à compressão para os compósitos reforçados com 4% de polpa de sisal foi de 34,85% quando comparados com a resistência de compósitos com 2% de polpa e relação vermiculita/areia de 0,25.

A Figura 4.20 mostra a variação da resistência à compressão com a densidade aparente dos compósitos. Observando os resultados, nota-se que a variação da resistência à compressão com a densidade é não-linear, fato também observado por SARMA (1988) para compósitos com polpa de celulose, pelo FIP (1983) para o concreto leve estrutural e por NEVILLE (1993) para o concreto celular.

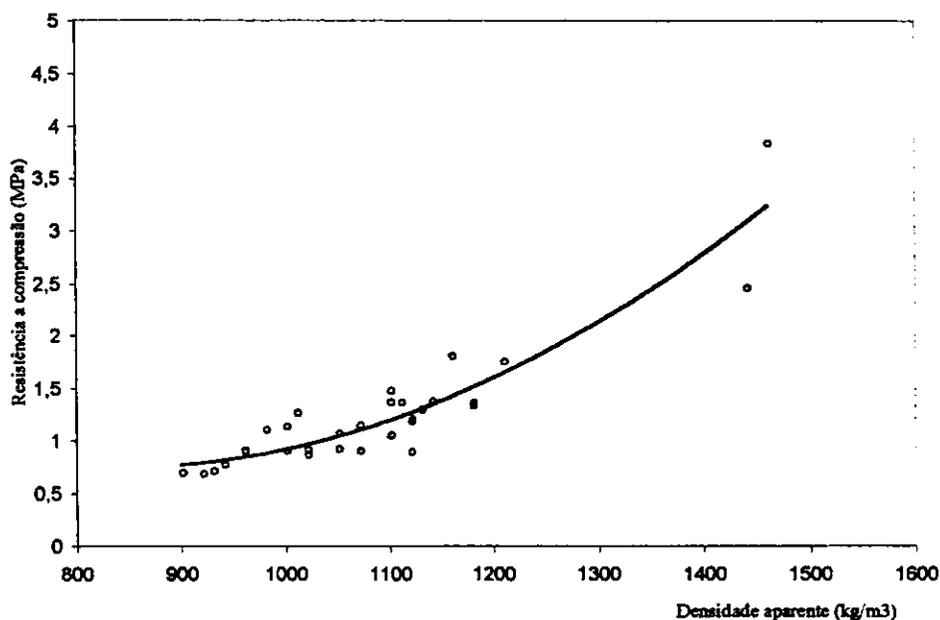


FIGURA 4.20 – Resistência de compressão em função da densidade aparente

4.2.1.2 Resistência à compressão dos compósitos curadas em autoclave

A Tabela 4.13 apresenta os valores médios de resistência à compressão para compósitos curadas em água e em autoclave e o módulo de elasticidade para os compósitos curadas em autoclave com os seus respectivos coeficiente de variação. A influência do tipo de cura pode ser vista observando-se os dados apresentados na Tabela 4.13.

TABELA 4.13 – Resistência à compressão e módulo de elasticidade para as misturas curadas em água e em autoclave

Misturas N ^o	Traço	Resistência à compressão – CV (MPa) - (%)		Módulo de elasticidade - CV (GPa) - (%)
		Cura em água	Cura em autoclave	Cura em autoclave
16	1c:1,5a:0,5	26,17 – 5,59	39,11 – 2,71	-
17	1c:1,125a:0,375v:0,9	5,77 – 1,63	8,30 --	-
18	1c:0,75a:0,75v:1,5	1,69 – 6,05	4,28 – 7,26	3,60 -
1	1c:1,5a:2ps:1,75	3,83 – 5,69	5,23 – 8,64	4,74 – 3,00
2	1c:1,5a:6ps:1,75	1,33 – 2,33	2,70 – 1,85	2,98 – 13,00
5	1c:0,75a:0,75v:2ps:1,75	1,36 – 1,17	2,20 – 1,50	2,80 – 25,00
6	1c:0,75a:0,75v:6ps:1,75	0,90 – 0,55	0,93 --	-
9	1c:1,125a:0,375v:4ps:2,0	1,14 – 1,24	1,91 – 8,12	2,40 – 20,8
10	1c:1,125a:0,375v:2ps:2,0	1,75 – 4,87	4,05 – 6,76	3,86 – 21,90
13	1c:1,125a:0,375v:6ps:2,0	0,91 – 1,10	1,29 – 5,15	1,48 – 34,00

Os resultados mostram que as amostras curadas em autoclave apresentaram resistência à compressão significativamente maior do que as amostras curadas em água. As matrizes, por exemplo, apresentaram acréscimo variando de 49% (matriz sem vermiculita) até 350% (matriz que teve substituição de 50% de areia por vermiculita). A cura a vapor de água é mais efetiva para o concreto com agregado leve porque ele possui menor capacidade calorífica e maior capacidade de isolamento térmico do que o concreto normal. O resultado final é um aumento na temperatura interna do concreto leve em comparação com a do concreto mais denso e, conseqüentemente, uma maior elevação na resistência (FIP, 1983).

A alta temperatura durante a autoclavagem acelera a hidratação do cimento portland e, conseqüentemente, o ganho de resistência. Os produtos de hidratação sujeitos a autoclavagem são estáveis e não apresentam regressão com o tempo (NEVILLE, 1993).

As misturas curadas em autoclave apresentaram valores de módulo de elasticidade variando de 1,48 a 4,74 GPa. A Figura 4.21 mostra a variação do módulo de elasticidade com a densidade aparente.

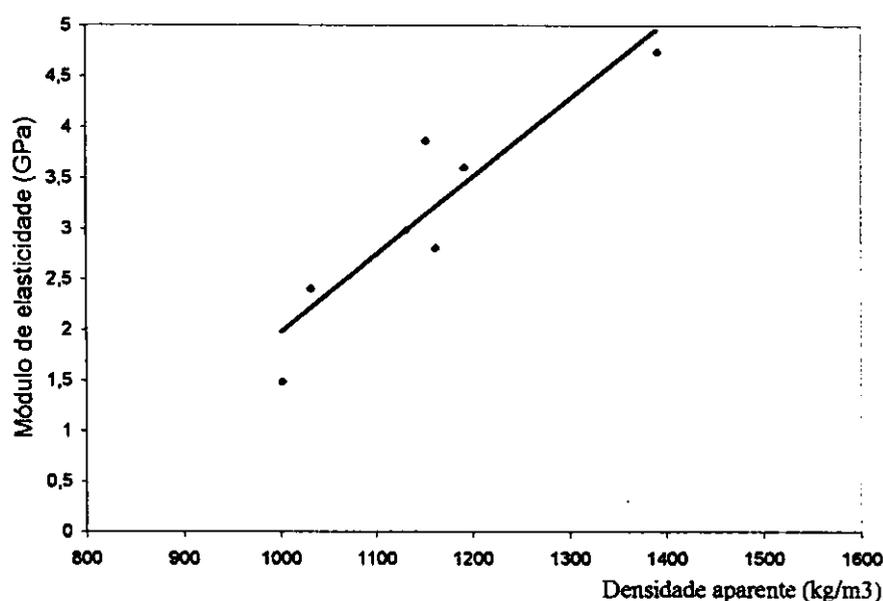


FIGURA 4.21 – Relação entre o módulo de elasticidade e a densidade aparente para os compósitos curados em autoclave.

O módulo de elasticidade do concreto é geralmente considerado como sendo uma função da sua resistência à compressão, e da sua densidade γ . O código de Construção do ACI (1977) recomenda uma relação empírica entre o módulo de elasticidade E, a densidade e a resistência à compressão σ_c do concreto como:

$$E = 43 \gamma^{1,5} (\sigma_c)^{0,5} \times 10^{-6} \text{ (GPa)} \dots\dots\dots (4.5)$$

onde:

γ - massa específica do concreto em kg/m³

σ_c - resistência à compressão uniaxial do cilindro em MPa.

A equação do ACI foi usada para prever o módulo de elasticidade estático dos compósitos com polpa. Uma comparação entre os resultados experimentais e os obtidos usando-se a equação 4.5 é mostrada na Tabela 4.14. Os resultados mostram que o uso da fórmula do ACI subestimou o módulo de elasticidade dos compósitos com polpa de 2,5 a 22% estando, portanto a favor da segurança. U única exceção foi para a mistura M1 que superestimou o módulo em cerca de 7%. Os resultados sugerem que fórmula do ACI prevê com razoável acurácia o módulo de elasticidade dos compósitos com polpa de sisal curados em autoclave.

TABELA 4.14 - Comparação do módulo de elasticidade medido com o previsto pelo ACI

Misturas Nº	Traço	σ_c (MPa)	γ (kg/m ³)	E (GPa) Medido	E (GPa) previsto	Super/sub estimativa (%)
1	1c:1,5a:2ps:1,75	3,83	1390	4,74	5,10	+ 7,06
2	1c:1,5a:6ps:1,75	2,70	1130	2,98	2,86	- 4,19
5	1c:0,75a:0,75v:2ps:1,75	2,20	1160	2,80	2,52	- 11,11
9	1c:1,125a:0,375v:4ps:2,0	1,91	1030	2,40	1,96	- 22,44
10	1c:1,125a:0,375v:2ps:2,0	4,05	1150	3,86	3,37	- 14,54
13	1c:1,125a:0,375v:6ps:2,0	1,29	1000	1,48	1,54	-3 ,89
18	1c:0,75a:0,75v:1,5	4,28	1160	3,60	3,51	- 2,56

A influência da adição de polpa de sisal na resistência á compressão da matriz sem vermiculita curadas em autoclave pode ser vista observando-se os dados apresentados no Tabela 4.13. Os resultados mostram que a adição de 2% de polpa reduz a resistência da matriz em cerca de sete vezes. A presença de 6% de polpa na mistura reduz a resistência da matriz em cerca de 14 vezes.

A influência de se aumentar teor de polpa de 2 para 6% no módulo de elasticidade dos compósitos sem vermiculita pode ser vista na Figura 4.22. O módulo de elasticidade da mistura com 6% de polpa é cerca de 41% menor que a da mistura com 2% de polpa.

A Figura 4.23 apresenta curvas tensão versus deformação para as misturas com substituição parcial de 50% de areia por vermiculita com e sem reforço de polpa de

sisal. Os resultados indicam uma redução de carga de 2,0 vezes na resistência à compressão e de 22% no módulo de elasticidade quando 2% de polpa estava presente na mistura.

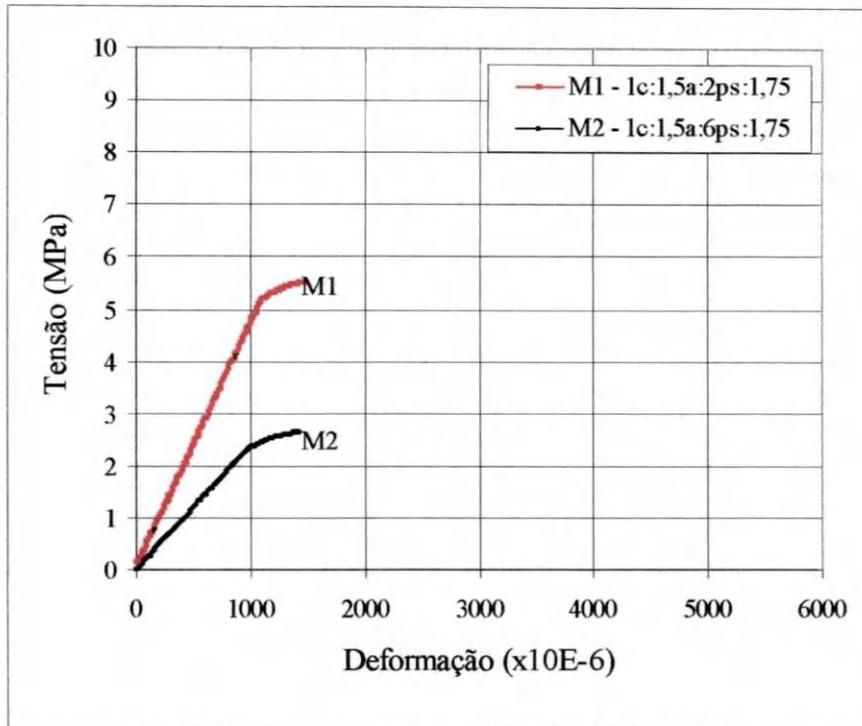


FIGURA 4.22 – Curva tensão-deformação das misturas M1 e M2 curadas em autoclave

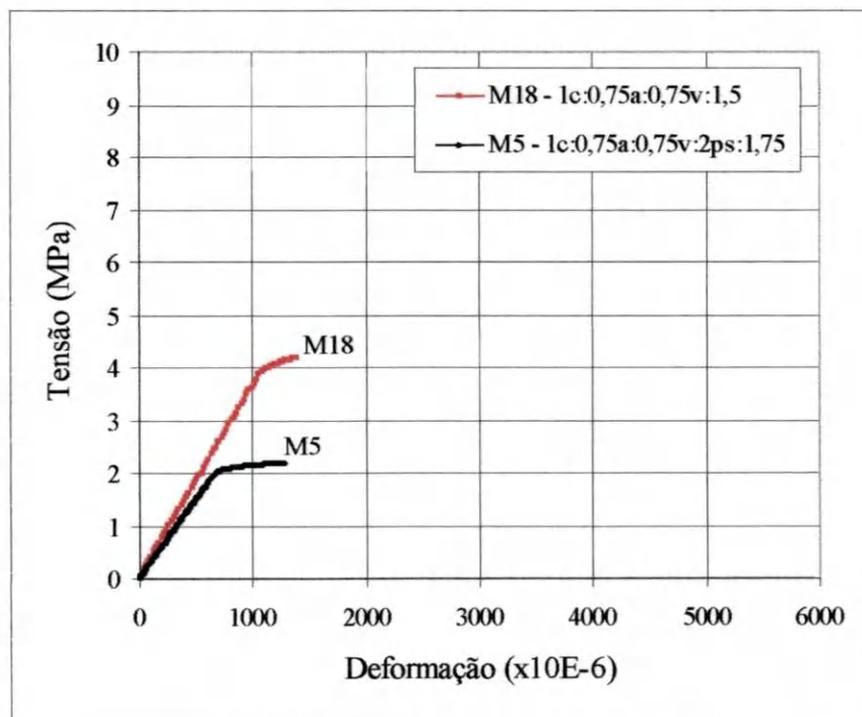


FIGURA 4.23 – Curva tensão-deformação das misturas M5 e M18 curadas em autoclave

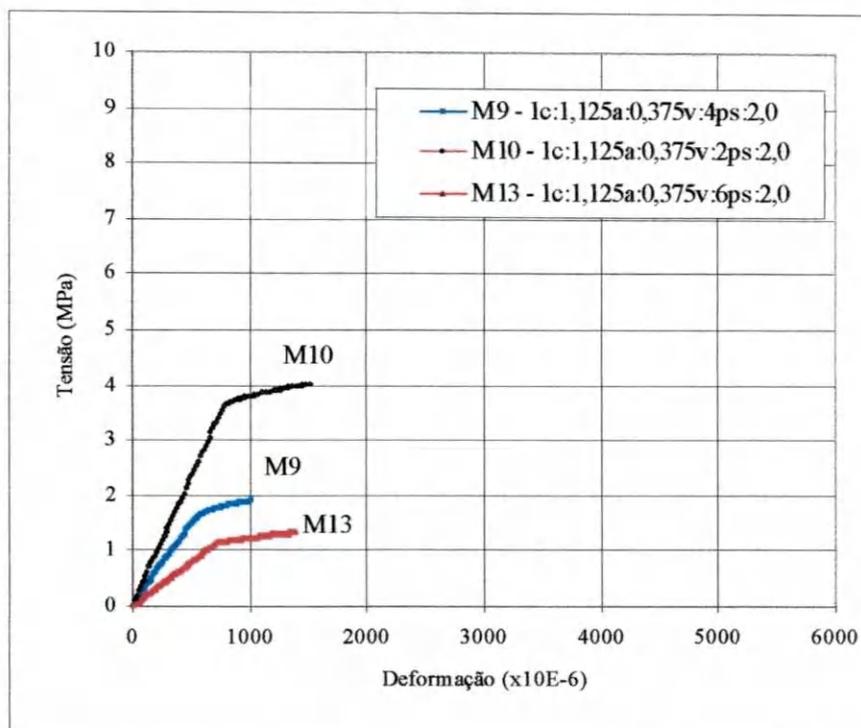


FIGURA 4.24– Curva tensão-deformação das misturas M9, M10 e M13 curadas em autoclave

A influência do teor de polpa de sisal na resistência à compressão dos compósitos curados em autoclave e com relação vermiculita/areia de 0,25 pode ser vista observando-se as curvas tensão-deformação apresentados na Figura 4.24. Os resultados mostram a mesma tendência já observada para a matriz sem vermiculita, isto é, que aumentando-se o volume de polpa reduz-se a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos compósitos

4.2.1.3 Resistência à compressão das amostras moldadas com energia de prensagem

A Tabela 4.15 apresenta os valores médios da resistência à compressão e módulo de elasticidade dos compósitos moldados com e sem energia de prensagem. As curvas tensão-deformação são apresentados na Figura 4.15. Os resultados mostram que as amostras moldadas com energia de prensagem apresentaram resistência à compressão

significativamente maior do que as amostras moldadas sem energia de prensagem. O acréscimo de resistência para a matriz sem vermiculita foi de 51% enquanto que a matriz com vermiculita teve a sua resistência aumentada em cerca de 2,7 vezes. O maior incremento observado para a mistura com vermiculita está relacionado com a redução do índice de vazios (ver item 4.1.1) promovido pela energia de prensagem. A mistura sem vermiculita e com 2% de polpa apresentou um acréscimo de cerca de 9 vezes na resistência à compressão. As misturas com vermiculita e 2% de polpa tiveram um acréscimo variando de 5,3 a 8,4 vezes na resistência à compressão dos compósitos moldados sem energia de prensagem. Com relação a influência da presença de 2% de polpa de sisal no módulo de elasticidade das matrizes, os resultados indicam que tal adição não modificou significativamente (redução de cerca de 1%) o módulo da matriz.

TABELA 4.15 – Resistência à compressão e módulo de elasticidade das misturas moldadas com e sem energia de prensagem

Misturas N ^o	Traço	Resistência à compressão – CV (MPa) - (%)		Módulo de elasticidade - CV (GPa) - (%)
		Moldagem sem energia	Moldagem com energia	Moldagem com energia
16	1c:1,5a:0,5	26,17 – 5,59	39,3 – 7,88	26,33 – 3,98
18	1c:0,75a:0,75v:1,5	1,69 – 6,05	4,62 – 1,73	3,05 – 7,21
1	1c:1,5a:2ps	3,83 – 5,69	34,80 – 0,83	25,82 -
10	1c:1,1255a:0,375v:2ps	1,75 – 4,87	14,65 – 9,16	14,04 - 12,30
5	1c:0,75a:0,75v:2ps:2.0	1,36 – 1,17	7,20 – 4,32	3,02 -

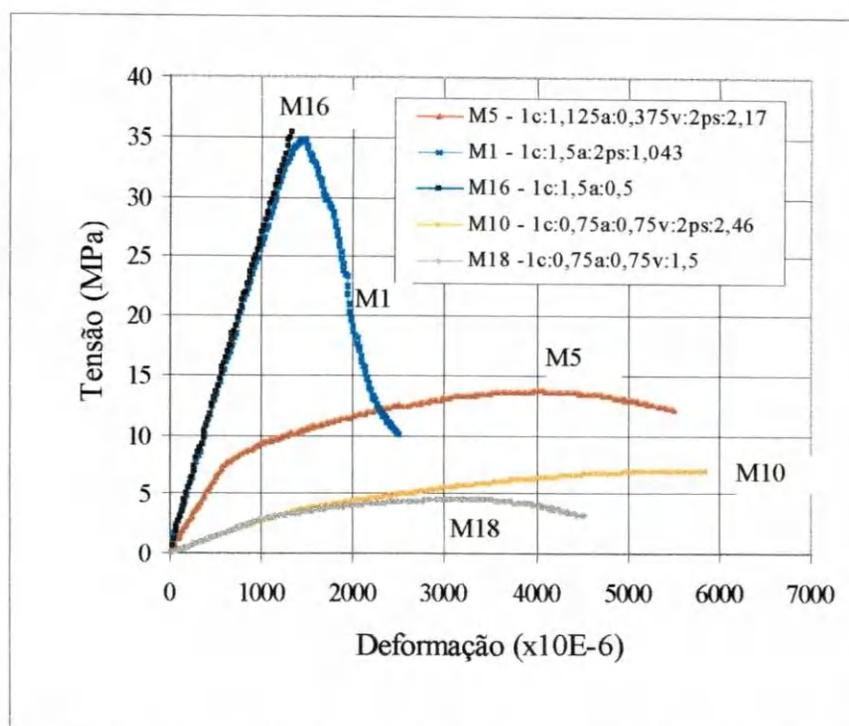


FIGURA 4.25 – Curva tensão deformação das misturas moldadas com energia de prensagem.

4.2.2 Resistência à flexão

4.2.2.1. Influência da fração em massa de polpa, do teor de vermiculita e do fator água/cimento na resistência à flexão - análise do desenho fatorial 2^3

A Figura 4.26 apresenta os valores médios (em MPa) e o coeficiente de variação (em %) para a resistência à flexão das argamassas reforçadas com polpa de sisal. Os resultados podem ser combinados de sete maneiras diferentes com o objetivo de se estimar diferentes efeitos. Por exemplo, existem quatro observações da resistência à flexão no nível mais alto do fator X_1 e quatro no seu nível mais baixo. A diferença média entre elas é uma estimativa do efeito principal de X_1 . Da mesma forma os efeitos principais dos fatores X_2 e X_3 podem ser calculados. Os resultados apresentados na Tabela 4.16 mostram

que o efeito médio do teor de polpa (X_3) na resistência à flexão das argamassas é uma redução de 0,2325 MPa no seu valor. Essa redução, no entanto, é maior para a porcentagem de substituição de vermiculita de 50%. O efeito médio da relação água/cimento (X_2) houve um decréscimo de 0,1358 MPa no seu valor. Essa redução, no entanto, é maior para a porcentagem de 6% de polpa de sisal. O efeito médio da relação areia/vermiculita (X_1) para a resistência à flexão, das argamassas é um decréscimo de 0,2425 MPa no seu valor. Esse aumento é maior para a relação água/cimento de 1,75 do que para a relação água/cimento de 2,25 como pode ser visto na figura 4.26. Esses fatos mostram que os fatores X_3 e X_1 ; X_2 e X_3 ; X_1 e X_2 não apresentam um comportamento de adição e que existe uma interação entre os mesmos. Uma estimativa da interação $X_1 \times X_3$ é dada pela metade da diferença entre o efeito principal de X_1 , no nível mais alto de X_3 , e o efeito principal de X_1 , no nível mais baixo de X_3 . As interações $X_1 \times X_2$, $X_2 \times X_3$ e $X_1 \times X_2 \times X_3$ podem ser avaliadas de forma similar.

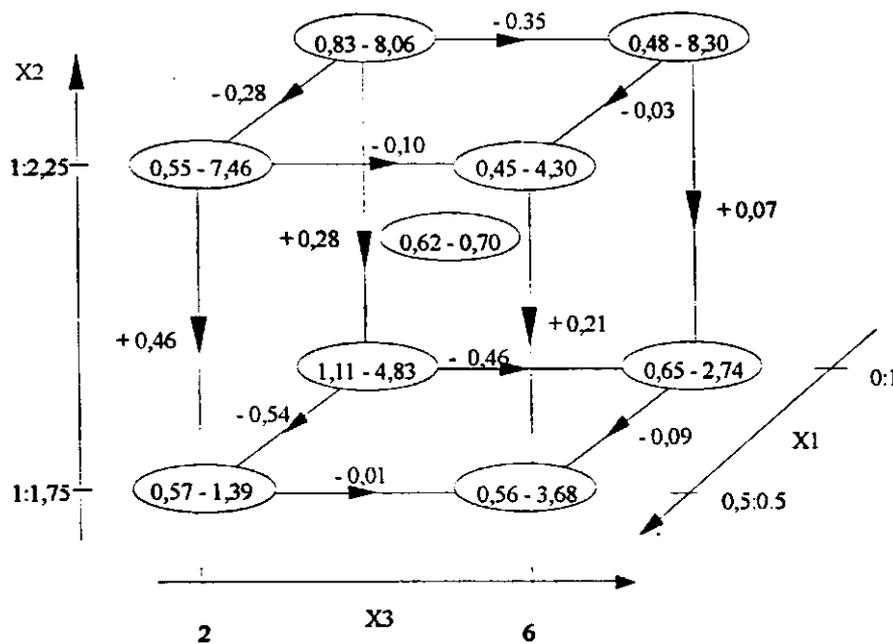


FIGURA 4.26 – Valores médios dos ensaios da resistência à flexão, em MPa e coeficiente de variação, CV, em (%).

TABELA 4.16 – Efeitos principais e interações

Efeitos principais (MPa)			Interações (MPa)			
X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ x X ₂	X ₁ x X ₃	X ₂ x X ₃	X ₁ x X ₂ x X ₃
-0,2425	- 0,1358	- 0,2325	- 0,007083	- 0,1775	0,00083	0,04583

Uma análise de variância foi realizada para mostrar se os efeitos eram significativos. A significância de cada efeito foi testada a níveis de confiança de 95,0; 97,5 e 99,0% usando-se o ensaio F. A Tabela 4.17 apresenta os resultados da análise de variância realizada para os dados obtidos nessa investigação.

Com base nos valores da Tabela 4.17, pode-se notar que os fatores principais X₁ e X₃ influenciam significativamente, com 97,5% de confiança, a resistência à flexão dos compósitos, e o fator de interação X₁ x X₃ influencia significativamente, com 95% de confiança, a resistência à flexão dos compósitos.

TABELA 4.17 – Análise de variância

Fonte de variação	Soma dos quadrados SS	Graus de Liberdade	Média ao quadrado	Relação média quadrada -- MSR F _o - ratio	MSR mínimo necessário para um fator ser significativo		
					F _{0,05;1,8}	F _{0,025;1,8}	F _{0,001;1,8}
Fatores principais							
X ₁ (areia.vermiculita)	0,3528	1	0,3528	10,45	5,32	7,57	11,3
X ₂ (a/c)	0,1107	1	0,1107	3,28	5,32	7,57	11,3
X ₃ (volume polpa)	0,3243	1	0,3243	9,60	5,32	7,57	11,3
Interações							
X ₁ x X ₂	0,03010	1	0,03010	0,89	5,32	7,57	11,3
X ₁ x X ₃	0,1890	1	0,1890	5,60	5,32	7,57	11,3
X ₂ x X ₃	0,0000416	1	0,0000416	0,00012	5,32	7,57	11,3
X ₁ x X ₂ x X ₃	0,01260	1	0,01260	0,37	5,32	7,57	11,3
Erro experimental	0,27	8	0,03375				

Com o objetivo de se obter um modelo para a resistência à flexão dos compósitos e em função das variáveis estudadas, uma equação de regressão linear múltipla

foi estabelecida para o conjunto de dados experimentais obtidos. O modelo pode ser escrito em termos das observações como:

$$\text{MOR} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + E \quad (4.6)$$

Onde:

MOR - é a resistência à flexão;

{ β_i } - são os coeficientes de regressão desconhecidos;

{ X_i } - são os fatores; e

{E} - representa os erros aleatórios

O modelo ajustado aos dados que é válida para os níveis estudados é dado pela equação 4.7. A Tabela 4.18 apresenta uma comparação entre os dados experimentais e aqueles previstos com o uso da equação 4.5.

$$\text{MOR} = 1,5775 - 0,47 \times \% \text{ vermiculita} - 0,29 \times a/c - 0,066875 \times \% \text{ polpa de sisal} \quad (4.7)$$

TABELA 4.18 – Resultados experimentais e previstos pelo modelo para resistência à flexão

Mistura	Resultados experimentais (MPa)	Valores previstos (MPa)	Erro (%)
1c:1,5a:2ps:1,75	1,11	0,94	-15,30
1c:1,5a:6ps:1,75	0,65	0,67	+3,10
1c:1,5a:2ps:2,25	0,83	0,79	-4,66
1c:1,5a:6ps:2,25	0,43	0,52	+8,30
1c:0,75a:0,75v:2ps:1,75	0,57	0,70	+22,80
1c:0,75a:0,75v:6ps:1,75	0,56	0,44	-21,40
1c:0,75a:0,75v:2ps:2,25	0,55	0,56	+1,80
1c:0,75a:0,75v:6ps:2,25:	0,45	0,29	-35,50

A equação 4.7, que descreve um hiperplano no espaço tridimensional das variáveis independentes { X_i }, conduziu a valores que atingiu 35% de erro quando comparados aos resultados experimentais. Sem dúvida são erros altos, mas a equação pode ser usada como uma primeira aproximação para os valores de resistência à flexão. A Tabela 4.19 apresenta resultados dos ensaios de resistência à flexão realizados no ponto

central e em outros seis níveis intermediários dos fatores e compara os resultados com aqueles calculados com o uso da equação 4.7.

TABELA 4.19 – Resultados previstos e observados da resistência em flexão em níveis intermediários

Mistura	Resultados experimentais (MPa)	Valores previstos (MPa)	Erro (%)
1c:1,125a:0,375v:4ps:2,0	0,70	0,61	-12,50
1c:1,125a:0,375v:3%2,0	0,75	0,68	-9,40
1c:1,125a:0,375v:5ps:2,0	0,67	0,55	-18,50
1c:1,125a:0,375v:6ps:2,0	0,58	0,48	-17,20
1c:1,315a:0,185v:4ps:2,0	0,50	0,67	+34,40
1c:0,9375a:0,5625v:2ps:2,0:	0,55	0,69	+25,40
1c:1,125a:0,375v:2ps:2,0	0,79	0,75	-5,10

4.2.2.2 Resistência à flexão dos compósitos produzidos sem energia de prensagem e curadas em água

A Tabela 4.20 apresenta os valores médios da carga de primeira fissura, carga máxima e módulo de ruptura obtidos dos ensaios de resistência à flexão para os compósitos curados em água e produzidos sem energia de presagem.

TABELA 4.20 Valores médios de resistência à flexão para amostras curadas em água

Mistura Nº	Traço	Carga de 1ª fissura (kN)	Carga máxima (kN)	MOR (MPa) - C.V. (%)
16	1c:1,5a:0,5	0,135775	0,135775	3,83 – 10,32
17	1c:1,125a:0,375v:0,9	0,074813	0,074813	2,25 – 9,61
18	1c:0,75a:0,75v:1,5	0,021367	0,021367	0,64 – 9,78
1	1c:1,5a:2ps:1,75:	0,033555	0,034168	1,11 – 4,83
2	1c:1,5a:6ps:1,75:	0,021057	0,026476	0,65 – 2,74
5	1c:0,75a:0,75v:2ps:1,75	0,022021	0,022021	0,57 – 1,39
6	1c:0,75a:0,75v:6ps:1,75	0,021229	0,021229	0,56 – 3,68
9	1c:1,125a:0,375v:4ps:2,0	0,027587	0,027587	0,70 – 3,14
10	1c:1,125a:0,375v:2ps:2,0	0,026403	0,026716	0,79 – 9,05
13	1c:1,125a:0,375v:6ps:2,0	0,019123	0,021165	0,58 – 8,80

Na Figura 4.27 apresenta-se as curvas carga-deflexão das matrizes com e sem vermiculita. Como já observado nos ensaios de compressão, os resultados mostraram que o módulo de ruptura foi maior para as amostras sem vermiculita. Por exemplo, quando a relação vermiculita/areia passou de zero para 0,25 o módulo de ruptura apresentou um decréscimo 70%. Quando a relação vermiculita/areia passou de zero para 0,50 a redução no módulo de ruptura da mistura M16 foi de cerca de 6 vezes. Quanto à forma da curva carga-deflexão, observa-se que as matrizes rompem de forma frágil, após o aparecimento da primeira fissura.

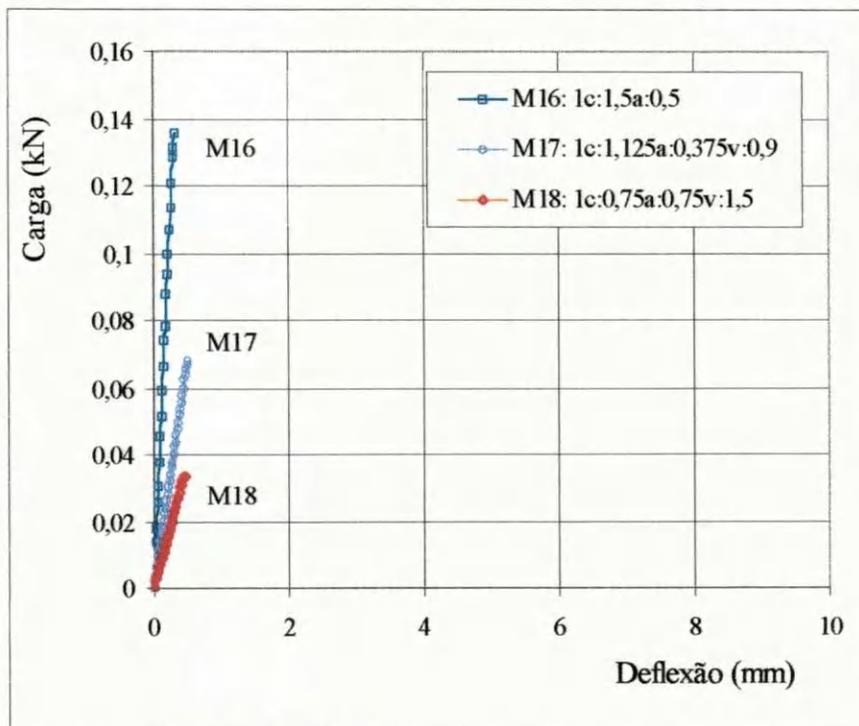


FIGURA 4.27 - Curva carga-deflexão das matrizes curadas em água

A influência do teor de polpa de sisal na resistência à flexão da matriz sem vermiculita pode ser vista observando-se as curvas carga-deflexão da Figura 4.28 e os dados apresentados na Tabela 4.20. A curva carga-deflexão da matriz é plotada como referência. Os resultados mostram que a presença de 2% de polpa reduziu o módulo de ruptura da matriz em cerca de 3,5 vezes. A tendência de declínio continuou com o aumento da porcentagem de polpa para 6%. Nesse caso a redução na resistência à flexão da mistura foi de 5,89 vezes. Com relação ao comportamento pós-fissuração, observa-se que a adição

de polpa aumentou a tenacidade da matriz frágil. O teor de polpa parece não ter afetado significativamente a tenacidade do material. Uma vez que as curvas carga-deflexão são praticamente coincidentes. Note que a capacidade de suporte do compósito permanece inalterada até a deflexão de cerca de 2,00 mm. A partir daí, observa-se o gradual declínio de carga com o aumento da deflexão.

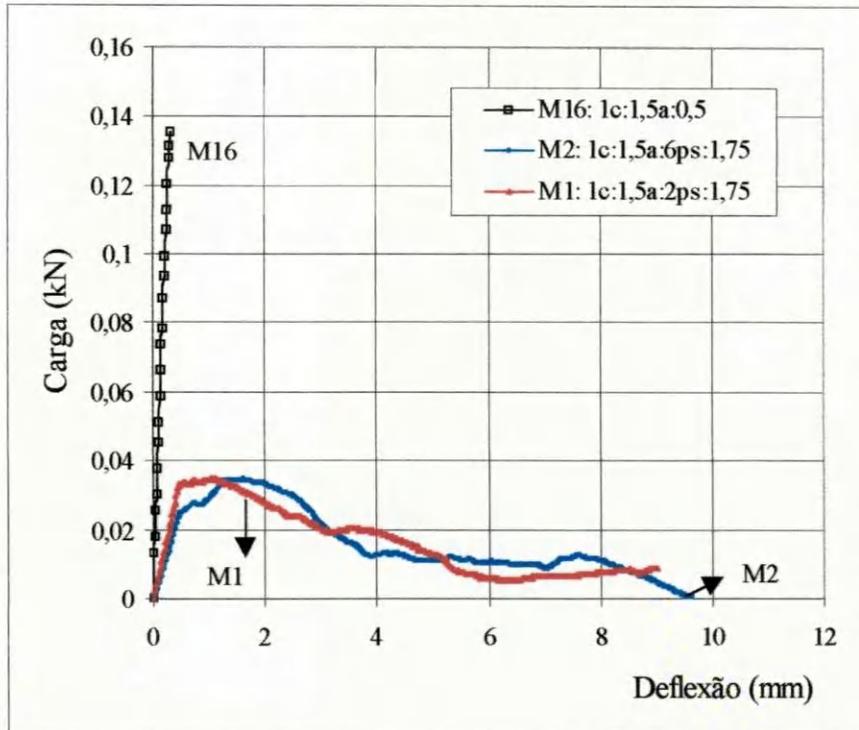


FIGURA 4.28 - Curva carga-deflexão para as misturas M1, M2 e M16 curadas em água

Na Figura 4.29 mostra-se as curvas carga-deflexão da matriz e dos compósitos com substituição de areia por 25% de vermiculita. Os resultados mostram que a presença de 2% de polpa reduziu o módulo de ruptura da matriz em cerca de 2,85 vezes. A tendência do declínio continuou com o aumento da porcentagem de polpa para 4% e 6%. Nesse caso o declínio da resistência à flexão das misturas foi de, respectivamente, 3,21 e 3,85 vezes. O bserve que essa redução foi bem menor que a ocorrida para as misturas sem vermiculita. Com relação ao comportamento pós-fissuração, observa-se que a adição de polpa aumentou a tenacidade da matriz frágil, com o melhor comportamento sendo observado para a fração em massa de 4% de polpa.

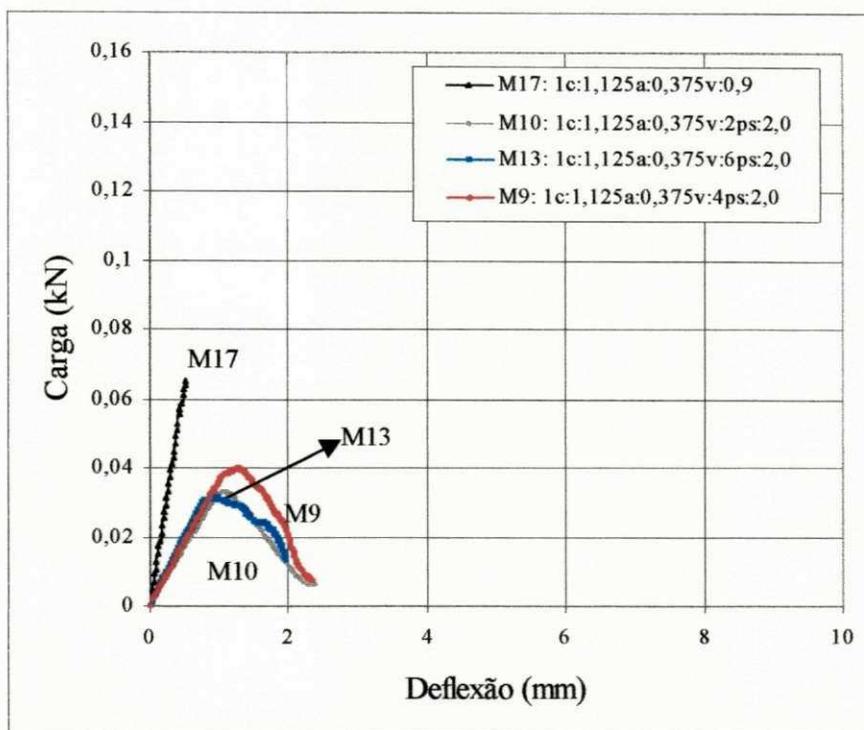


FIGURA 4.29 - Curva carga-deflexão para as misturas M9, M10, M13 e M17 curadas em água

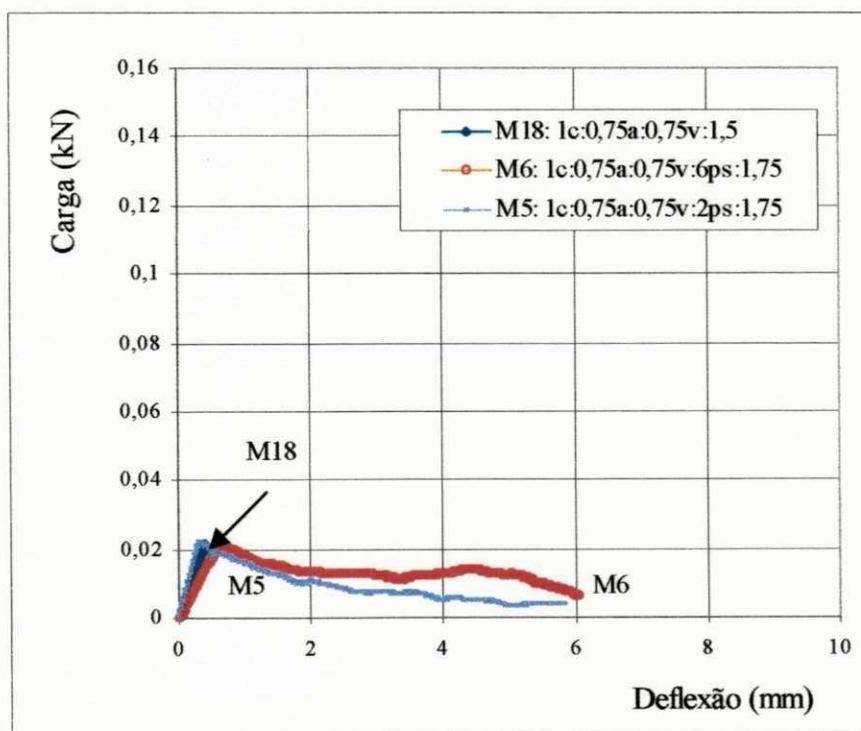


FIGURA 4.30 - Curva carga-deflexão para as misturas M5, M6 e M18 curadas em água

Na Figura 4.30 mostra-se curvas carga-deflexão da matriz e dos compósitos com substituição de areia por 50% de vermiculita. Os resultados indicam que a matriz possui módulo de ruptura apenas 12% maior que o dos compósitos os quais, por sua vez, apresentaram praticamente o mesmo módulo de ruptura. Esse fato confirma que o acréscimo do teor de vermiculita tem grande importância na redução da resistência à flexão das misturas. Com relação ao comportamento pós-fissuração, observa-se que a adição de polpa aumentou significativamente a tenacidade da matriz frágil. A presença de 6% de polpa conduziu a misturas com maior capacidade de absorver energia.

4.2.2.3 Influência do tipo de polpa

A Tabela 4.21 apresenta os valores médios da carga de primeira fissura, carga máxima e módulo de ruptura obtidos dos ensaios de resistência à flexão para os compósitos com reforço de polpa de sisal e bambu.

TABELA 4.21 – Valores médios de resistência à flexão dos compósitos com reforço de polpa de sisal e bambu

Mistura Nº	Traço	Carga máxima (kN)	σ_b (MPa) - C.v. (%)
10	1c:1,125a:0,375v:2ps:2,0	0,026716	0,79 – 9,05
19	1c:1,125a:0,375v:2pb:2,0	0,036335	1,10 – 10,30
11	1c:1,125a:0,375v:3ps:2,0	0,029796	0,75 – 0,36
20	1c:1,125a:0,375v:3pb:2,0	0,033347	0,93 – 4,03
9	1c:1,125a:0,375v:4ps:2,0	0,027587	0,70 – 3,14
21	1c:1,125a:0,375v:4pb:2,0	0,03024	0,83 – 6,20
12	1c:1,125a:0,375v:5ps:2,0	0,024788	0,67 – 0,10
22	1c:1,125a:0,375v:5pb:2,0	0,026736	0,73 – 0,80
13	1c:1,125a:0,375v:6ps:2,0	0,021165	0,58 – 8,80
23	1c:1,125a:0,375v:6pb:2,0	0,023656	0,65 – 1,23

Nas Figuras 4.31 a 4.35 apresenta-se as curvas carga-deflexão dos compósitos reforçados com polpa de sisal e bambu. Observando os resultados nota-se que os compósitos com polpa de bambu apresentaram módulo de ruptura maior do que os compósitos com polpa de sisal para todas as frações em massa de reforço. No entanto, as maiores diferenças são observadas para os teores mais baixos de polpa (para 2% de reforço a diferença foi de 39%). Com relação ao comportamento pós-fissuração, observa-se que os compósitos com polpa de sisal apresentaram maior tenacidade para todas as misturas. Isso pode ser atribuído ao maior comprimento da polpa de sisal que propiciou uma transferência de carga mais eficiente da matriz para o elemento de reforço.

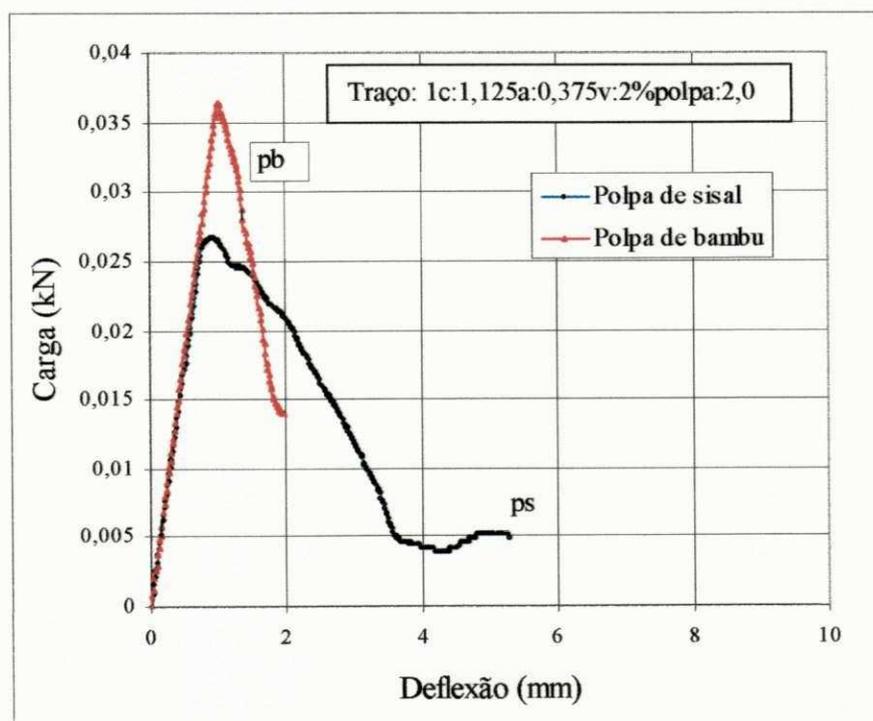


FIGURA 4.31– Curva carga-deflexão para os compósitos com 2% de polpa de sisal e bambu

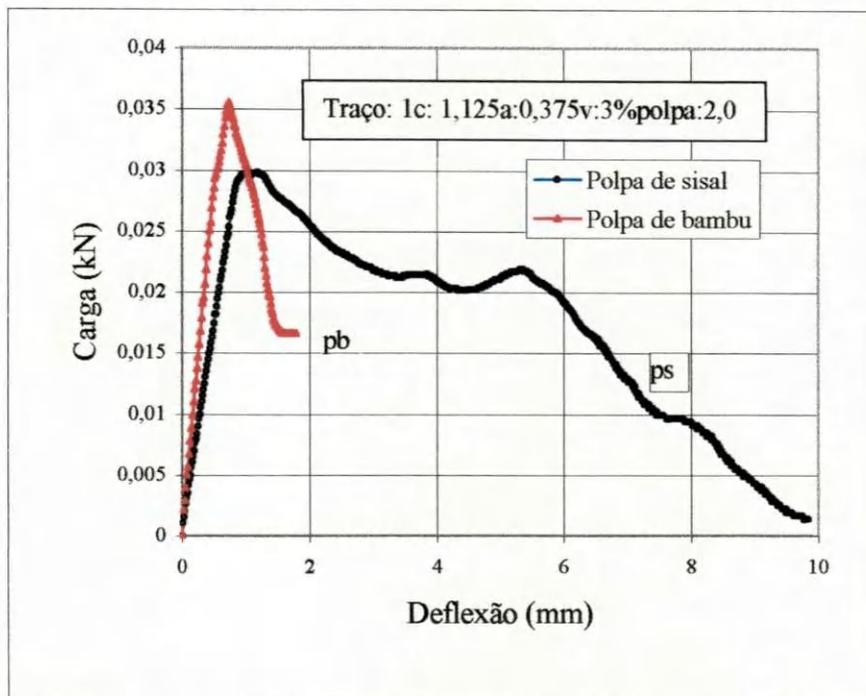


FIGURA 4.32 – Curva carga-deflexão para os compósitos com 3% de polpa de sisal e Bambu

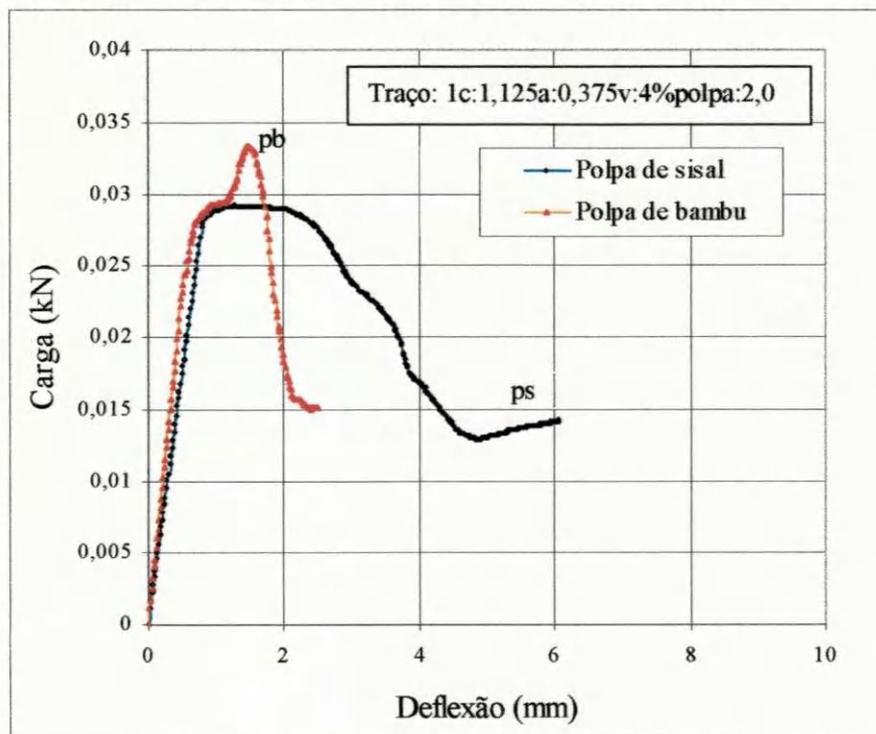


FIGURA 4.33 – Curva carga-deflexão para os compósitos com 4% de polpa de sisal e Bambu

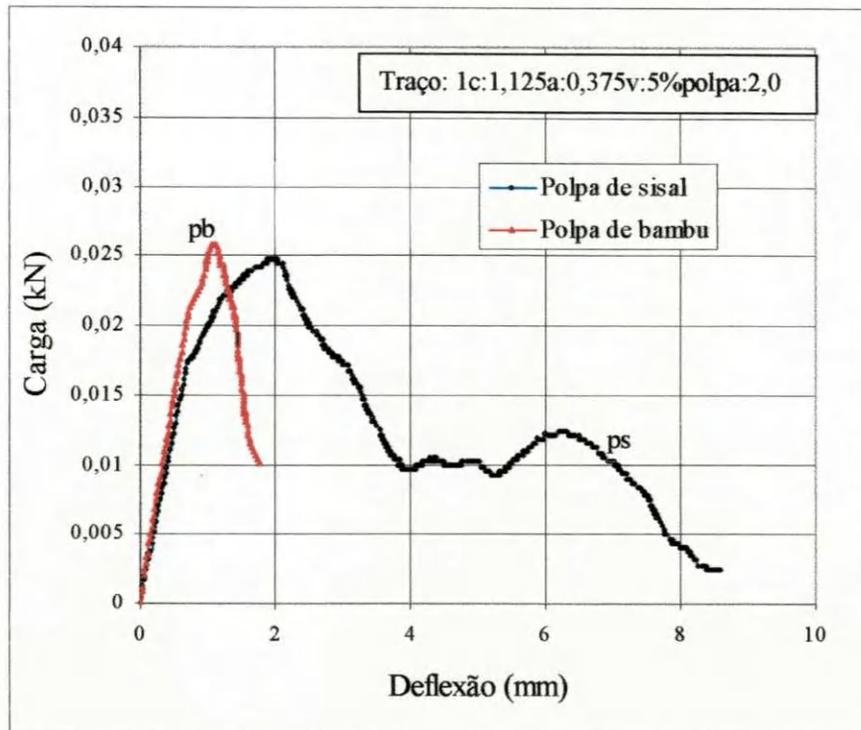


FIGURA 4.34 – Curva carga-deflexão para os compósitos com 5% de polpa de sisal e Bambu

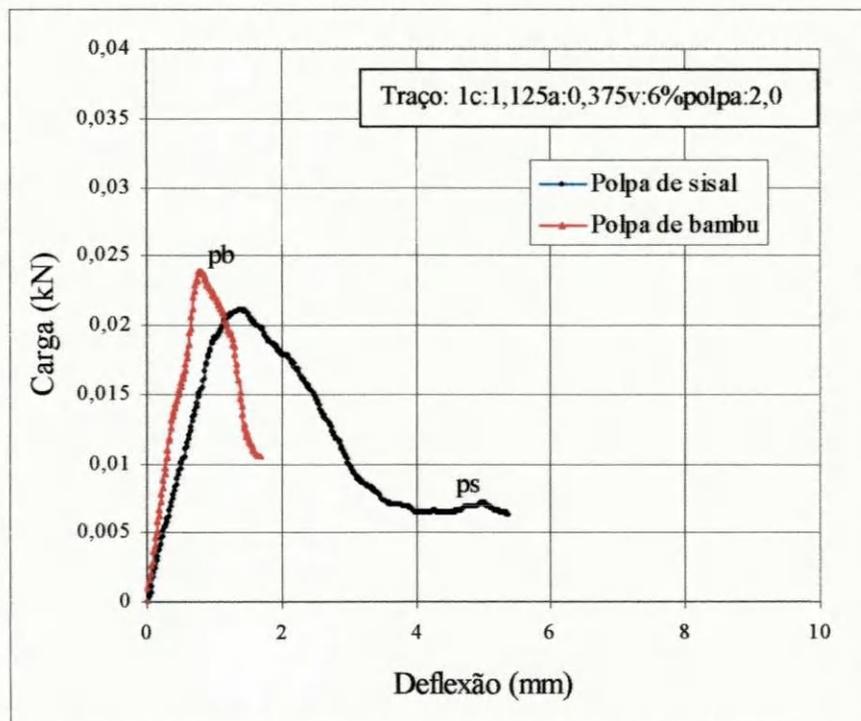


FIGURA 4.35 – Curva carga-deflexão para os compósitos com 5% de polpa de sisal e bambu

4.2.2.4 Influência da fibra de sisal em acréscimo à polpa

A Tabela 4.22 apresenta os valores médios da carga de primeira fissura, carga máxima e módulo de ruptura obtidos dos ensaios de resistência à flexão para os compósitos com reforço de polpa de sisal e polpa mais fibra de sisal.

TABELA 4.22 – Valores médios de resistência à flexão dos compósitos com reforço de polpa de sisal e polpa com adição de fibra de sisal

Mistura N ^o	Traço	Carga máxima (kN)	σ_b (MPa) - CV (%)
10	1c:1,125a:0,375v:2ps:2,0:	0,026716	0,79 – 9,05
24	1c:1,125a:0,375v:2ps:0,5fs2,0:	0,035888	0,95 – 9,16
11	1c:1,125a:0,375v:3ps:2,0:	0,029796	0,75 – 0,36
25	1c:1,125a:0,375v:3ps:0,5fs:2,0	0,032482	0,85 – 5,20
9	1c:1,125a:0,375v:4ps:2,0	0,027587	0,70 – 3,14
26	1c:1,125a:0,375v:4ps:0,5fs:2,0	0,026857	0,75 – 2,98
12	1c:1,125a:0,375v:5ps:2,0	0,024788	0,67 – 0,10
27	1c:1,125a:0,375v:5ps:0,5fs:2,0	0,027925	0,70 – 2,79
13	1c:1,125a:0,375v:6ps:2,0	0,021165	0,58 – 8,80
28	1c:1,125a:0,375v:6ps:0,5fs:2,0	0,024154	0,65 – 1,40

Nas Figuras 4.36 à 4.40 apresenta-se as curvas carga-deflexão dos compósitos reforçados com polpa de sisal e polpa mais fibra de sisal. Observando os resultados, nota-se que os compósitos com polpa mais fibra de sisal apresentaram módulo de ruptura maior do que os compósitos com polpa de sisal para todas as frações em massa de reforço. No entanto, as maiores diferenças são observadas para os teores mais baixos de polpa (para 2% de reforço a diferença foi de 20,25%). Com relação ao comportamento pós-fissuração, observa-se que os compósitos com polpa e fibra de sisal apresentaram maior tenacidade para todas as misturas em especial para as misturas com teor de polpa até 3%. O aumento na capacidade de absorver energia do material pode ser atribuído a presença da fibra de sisal que propiciou uma transferência de carga mais eficiente.

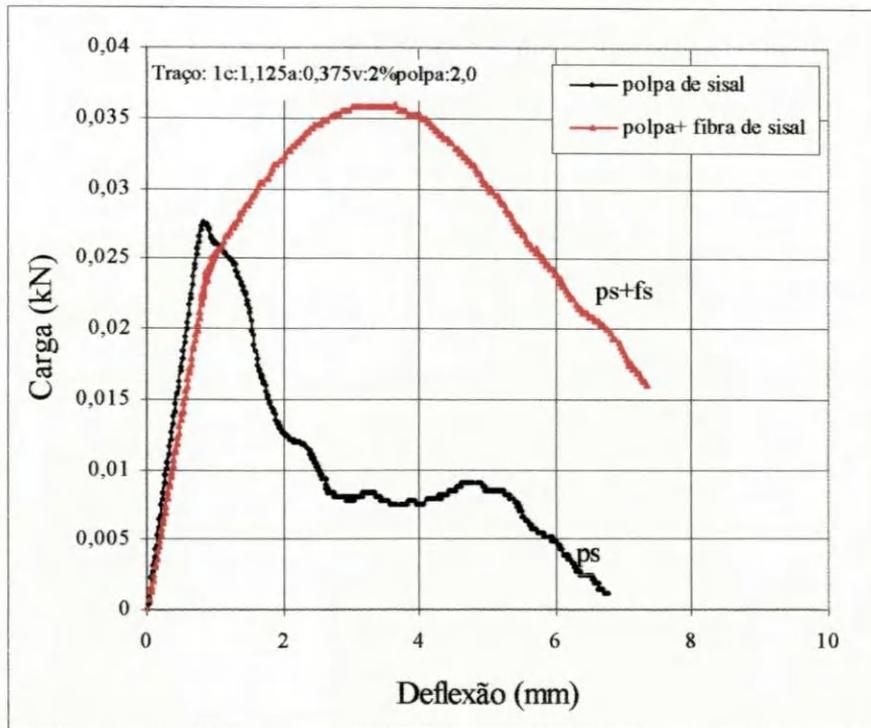


FIGURA 4.36 – Curva carga-deflexão para os compósitos com 2% de polpa de sisal e polpa com adição de fibra de sisal

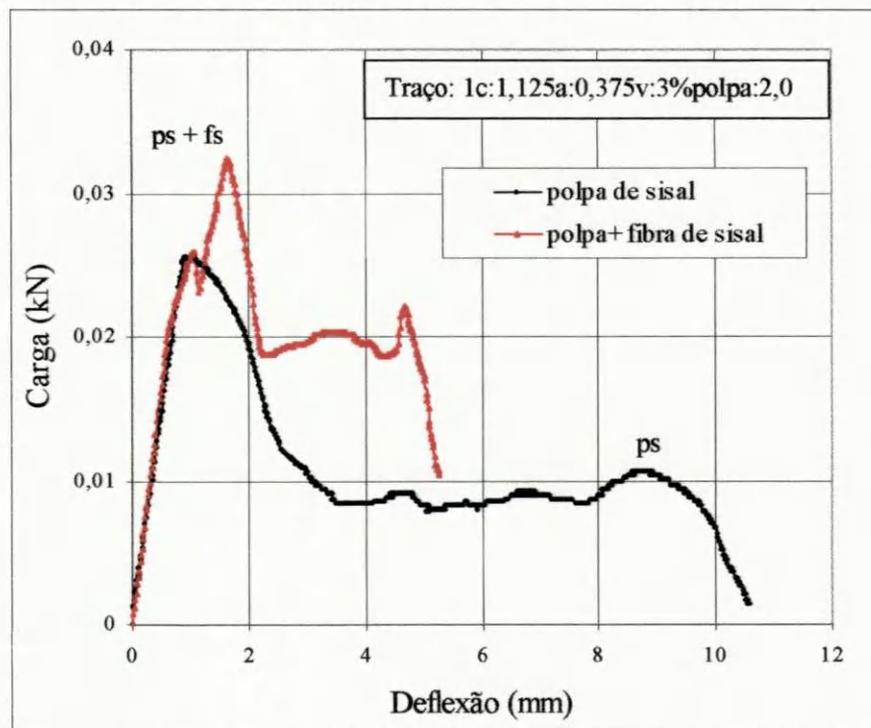


FIGURA 4.37 – Curva carga-deflexão para os compósitos com 3% de polpa de sisal e polpa com adição de fibra de sisal

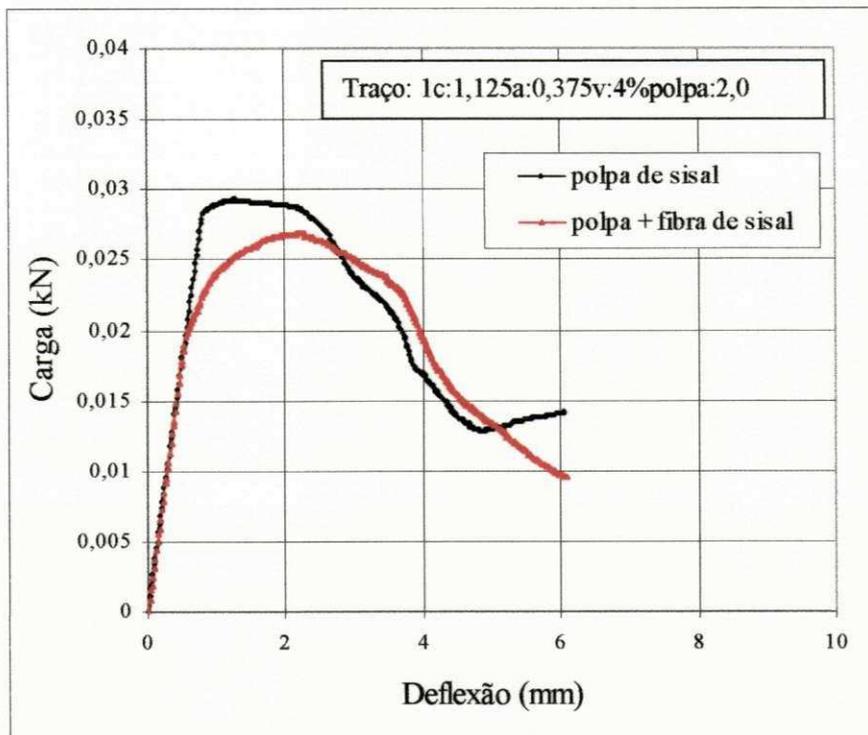


FIGURA 4.38 – Curva carga-deflexão para os compósitos com 4% de polpa de sisal e polpa com adição de fibra de sisal

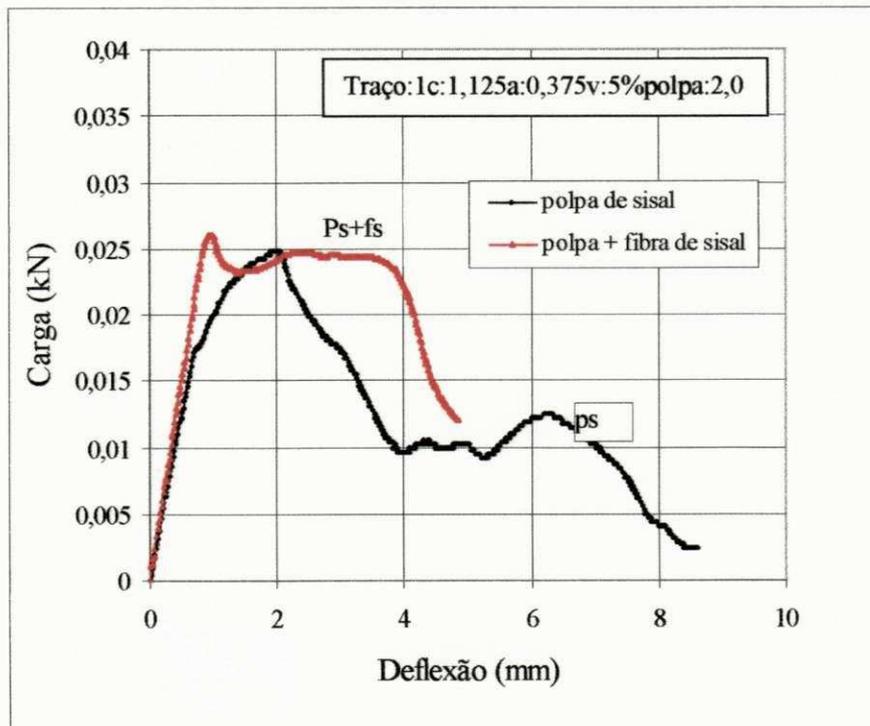


FIGURA 4.39 – Curva carga-deflexão para os compósitos com 5% de polpa de sisal e polpa com adição de fibra de sisal

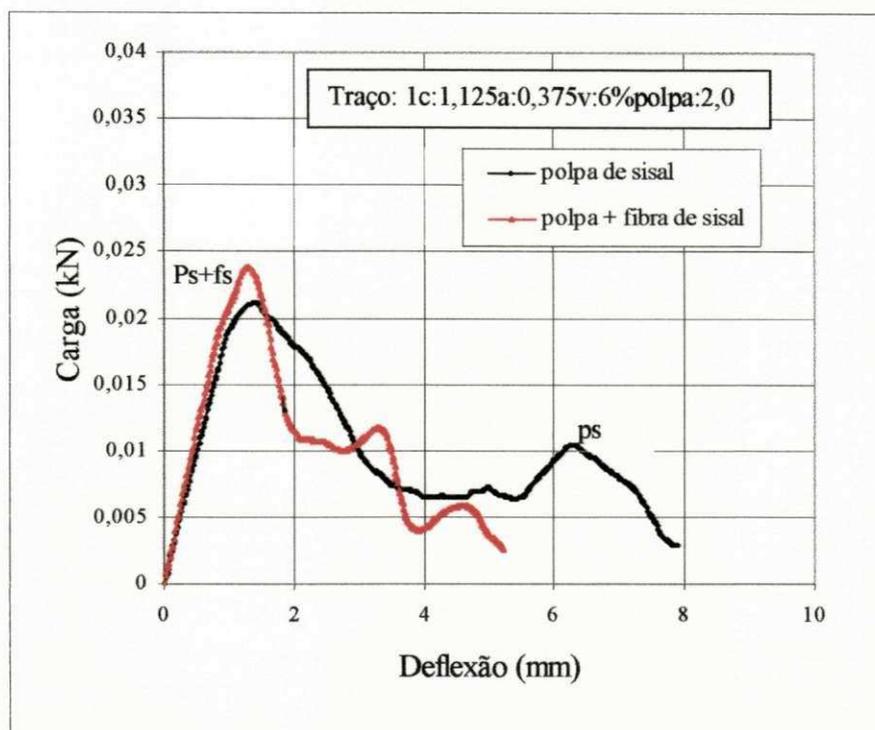


FIGURA 4.40 – Curva carga-deflexão para os compósitos com 6% de polpa de sisal e polpa com adição de fibra de sisal

4.2.2.4 Resistência à flexão dos compósitos curado em autoclave

A Tabela 4.24 apresenta os valores médios da carga de primeira fissura, carga máxima e módulo de ruptura obtidos dos ensaios de resistência à flexão para os compósitos com reforço de polpa de sisal curado em autoclave.

Na Figura 4.41 apresenta-se as curvas carga-deflexão das matrizes com e sem vermiculita. Como já observado para as amostras curadas em água, os resultados mostraram que o módulo de ruptura foi maior para as amostras sem vermiculita. Por exemplo, quando a relação vermiculita/areia passou de zero para 0,25 o módulo de ruptura apresentou uma redução de 2,2 vezes. Quando a relação vermiculita/areia passou de zero para 0,50 a redução no módulo de ruptura foi de cerca de 4,38 vezes. Quanto à forma da curva carga-deflexão, observa-se ruptura frágil das matrizes.

Observando-se os resultados das tabelas 4.20 e 4.24 nota-se que a cura em autoclave aumentou mais a resistência à flexão das misturas com vermiculita. Tal comportamento foi também observado e explicado para as amostras curadas em compressão.

TABELA 4.24 – Valores médios de resistência à flexão dos compósitos curadas em autoclave

Mistura Nº	Traço	Carga de 1ª fissura (kN)	Carga máxima (kN)	σ_b (MPa) - CV (%)
16	Ic:1,5a:0,5	0,160414	0,160414	4,60 – 4,05
17	Ic:1,125a:0,375v:0,9	0,068168	0,068168	2,10 – 3,34
18	Ic:0,75a:0,75v:1,5	0,033286	0,033286	1,05 – 4,47
1	Ic:1,5a:2ps:1,75:	0,080885	0,080885	1,92 – 1,04
2	Ic:1,5a:6ps:1,75:	0,037692	0,037692	1,23 – 9,96
5	Ic:0,75a:0,75v:2ps:1,75	0,023552	0,025169	0,84 – 8,47
6	Ic:0,75a:0,75v:6ps:1,75	0,024356	0,025007	0,93 - -
9	Ic:1,125a:0,375v:4ps:2,0	0,037998	0,040083	1,17 – 7,25
13	Ic:1,125a:0,375v:6ps:2,0	0,03398	0,034012	1,02 – 5,64
10	Ic:1,125a:0,375v:2ps:2,0	0,033011	0,033011	1,13 – 9,96

A influência do teor de polpa de sisal na resistência à flexão da matriz sem vermiculita pode ser vista observando-se as curvas carga-deflexão da Figura 4.42 e os dados apresentados na Tabela 4.24. A curva carga-deflexão da matriz é plotada como referência. Os resultados mostram que a presença de 2% de polpa reduziu o módulo de ruptura da matriz em cerca de 2,39 vezes. A tendência de declínio continuou com o aumento da porcentagem de polpa para 6%. Nesse caso a redução na resistência à flexão da mistura foi de 4,38 vezes. Com relação ao comportamento pós-fissuração, observa-se que a adição de polpa aumentou a tenacidade da matriz frágil. Observando-se as Figuras 4.28 e 4.42 observa-se que a cura em autoclave reduziu a tenacidade com compósitos curados em água.

Na Figura 4.43 mostra-se as curvas carga-deflexão da matriz e dos compósitos com substituição de areia por 25% de vermiculita. Os resultados mostram que a presença de 2% e 6% de polpa reduziu o módulo de ruptura da matriz em cerca de, respectivamente, 1,85 e 2,05 vezes. Com relação ao comportamento pós-fissuração,

observa-se que a adição de polpa aumentou significativamente a tenacidade da matriz frágil.

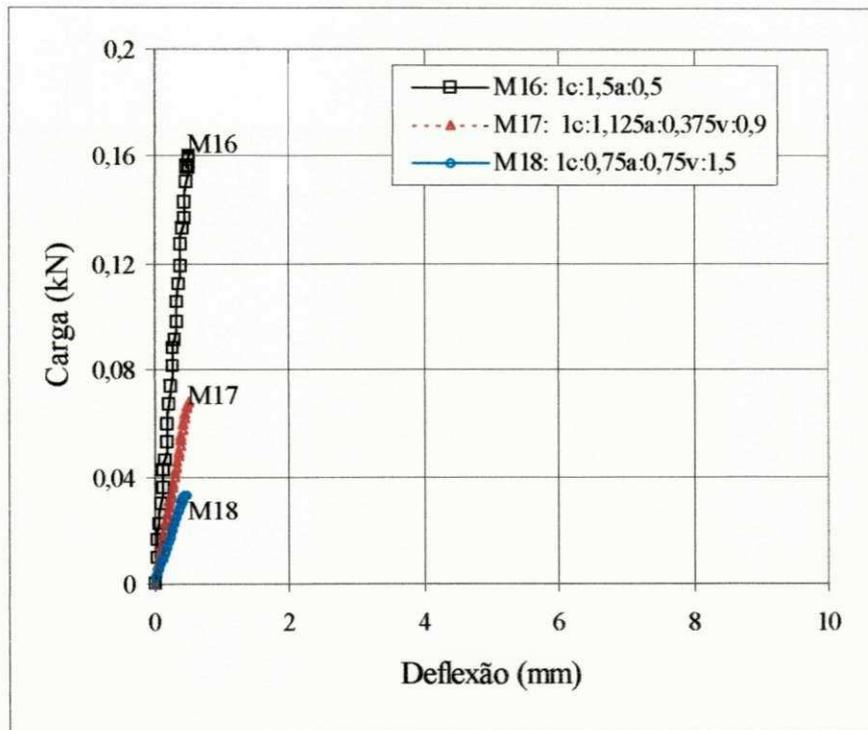


FIGURA 4.41 – Curva carga-deflexão para as misturas M16, M17 e M18 curadas em Autoclave

Na Figura 4.44 mostra-se as curvas carga-deflexão da matriz e dos compósitos com substituição de areia por 50% de vermiculita. Os resultados mostram que a presença de 2% e 6% de polpa reduziu o módulo de ruptura da matriz em cerca de, respectivamente de 1,25 e 1,13 vezes. Com relação ao comportamento pós-fissuração observa-se que a adição de polpa aumentou a tenacidade da matriz frágil.

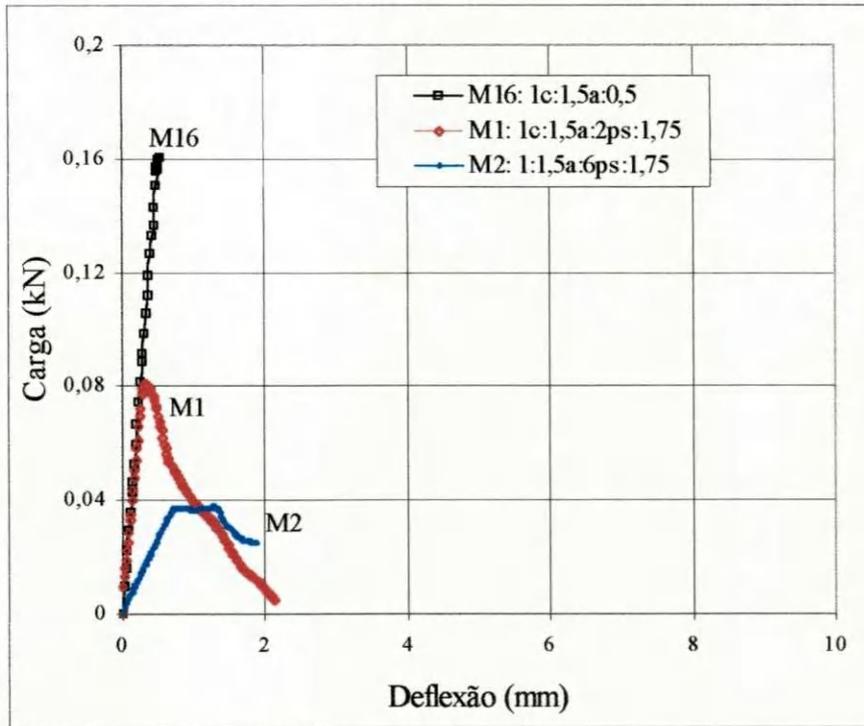


FIGURA 4.42– Curva carga-deflexão para as misturas M1, M2 e M16 curadas em Autoclave

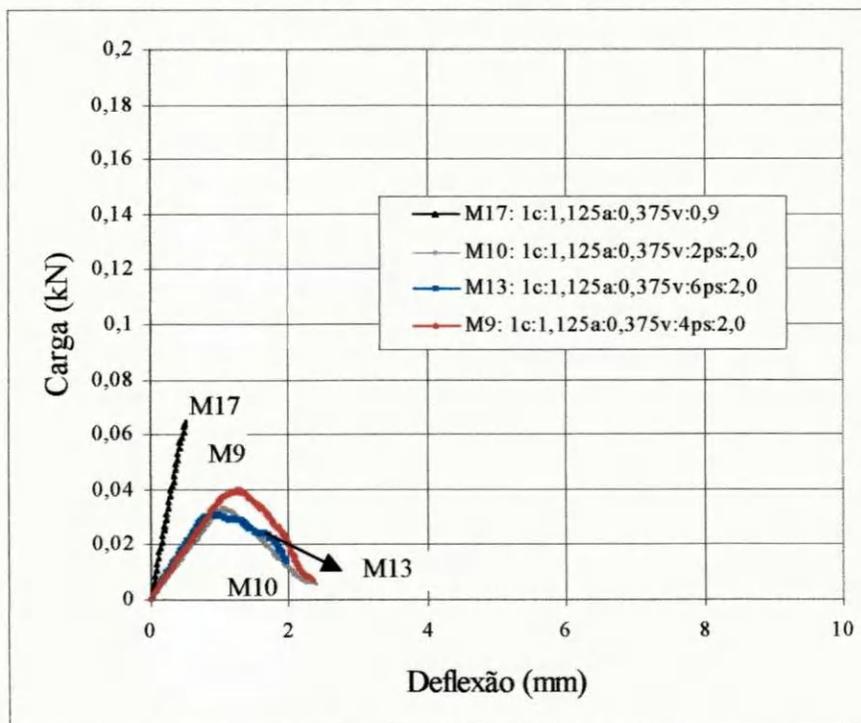


FIGURA 4.43 - Curva carga-deflexão para as misturas M9, M10, M13 e M17 curadas em autoclave

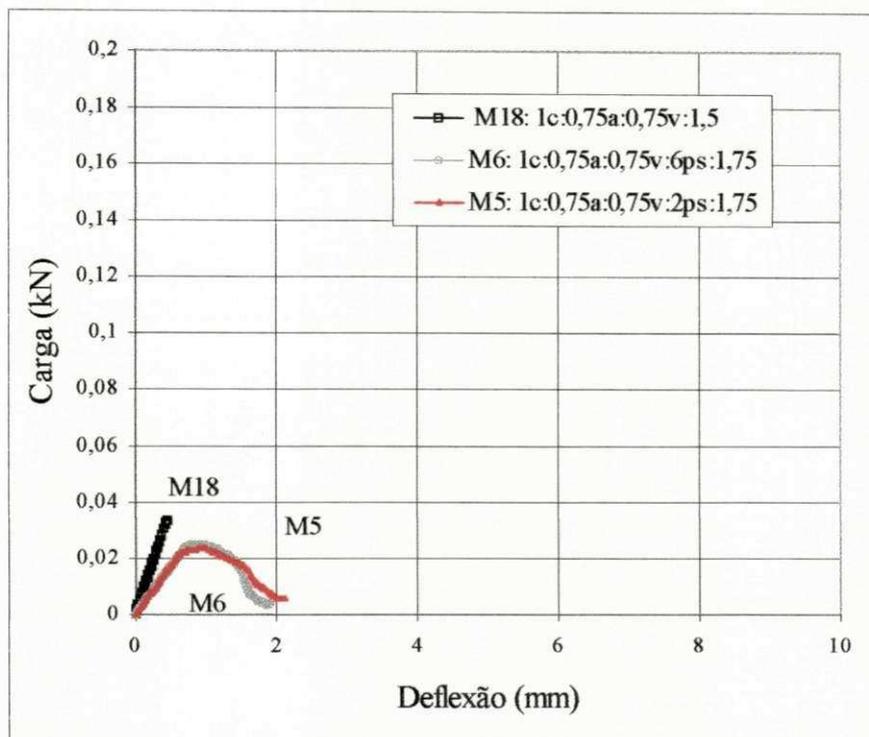


FIGURA 4.44 - Curva carga-deflexão para as misturas M18, M5 e M6 curadas em autoclave

4.2.2.5 Resistência à flexão dos compósitos produzidos com energia de prensagem e curadas em água

A Tabela 4.25 apresenta os valores médios da carga de primeira fissura, carga máxima e módulo de ruptura obtidos dos ensaios de resistência à flexão para os compósitos produzidos com energia de prensagem. Os resultados obtidos indicam um considerável aumento no módulo de ruptura das misturas, moldadas sob pressão. Por exemplo, a mistura M1, com 2% de polpa, aumentou o módulo de ruptura da mistura curada em água em 2,82 vezes. A mistura M18, com relação vermiculita de 0,5, teve módulo de ruptura aumentado por um fator de cerca de 3,2.

TABELA 4.25 – Valores médios de resistência à flexão dos compósitos reforçados com polpa de sisal e produzidos com energia de prensagem.

Mistura N ^o	Traço	Carga de 1 ^a fissura (kN)	Carga máxima (kN)	σ_b (MPa) - CV (%)
16	1c:1,5a:0,5	0,252964	0,252964	5,87 – 3,57
18	1c:0,75a:0,75v:1,5	0,053938	0,053938	2,03 – 4,93
1	1c:1,5a:2ps:1,75:	0,174057	0,174057	3,13 – 7,82
5	1c:0,75a:0,75v:2ps:1,75	0,02785	0,032932	1,01 – 2,28
10	1c:1,125a:0,375v:2ps:2,0	0,054216	0,054216	1,94 – 4,37

A influência do processo de moldagem na resistência à flexão das matrizes, com e sem vermiculita, pode ser vista observando-se as curvas carga-deflexão das Figura 4.45 e 4.46. Os resultados mostram que a presença de 2% de polpa reduziu o módulo de ruptura da matriz sem vermiculita em cerca de 1,87 vezes. Essa redução é consideravelmente menor que a observada para as misturas moldadas sem prensagem e curadas em água.

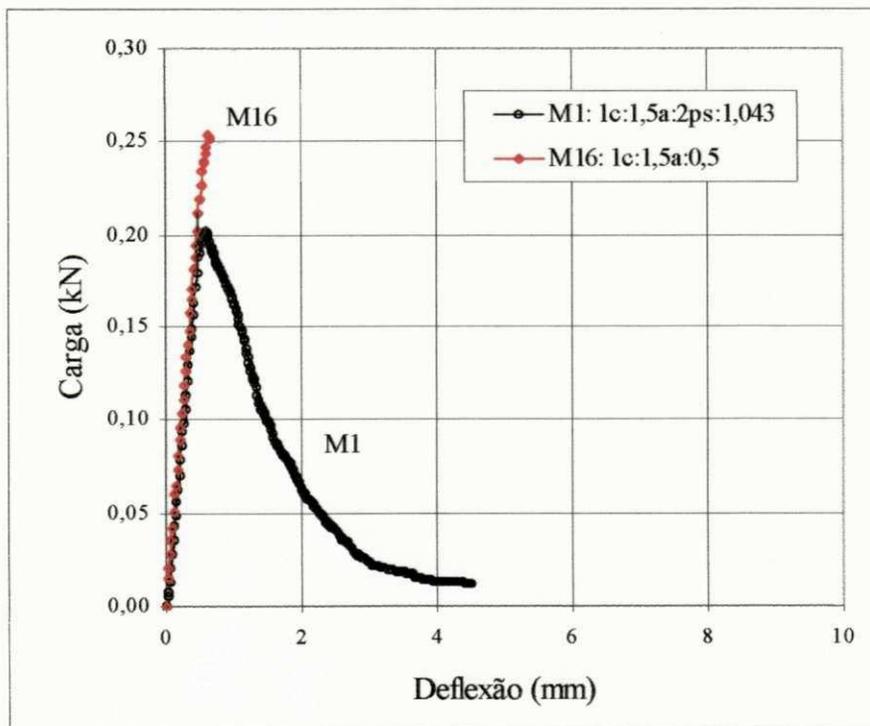


FIGURA 4.45 – Curva carga-deflexão para a matriz M16 e a mistura M1 moldadas com energia de prensagem

No caso da matriz com vermiculita, os resultados mostram que a presença de 2% de polpa nas misturas com 25% e 50% reduziu o módulo de ruptura da matriz em cerca de, respectivamente, 1,25 e 2,00 vezes. Com relação ao comportamento pós-fissuração, observa-se que a adição de polpa aumentou significativamente a tenacidade de ambas as misturas.

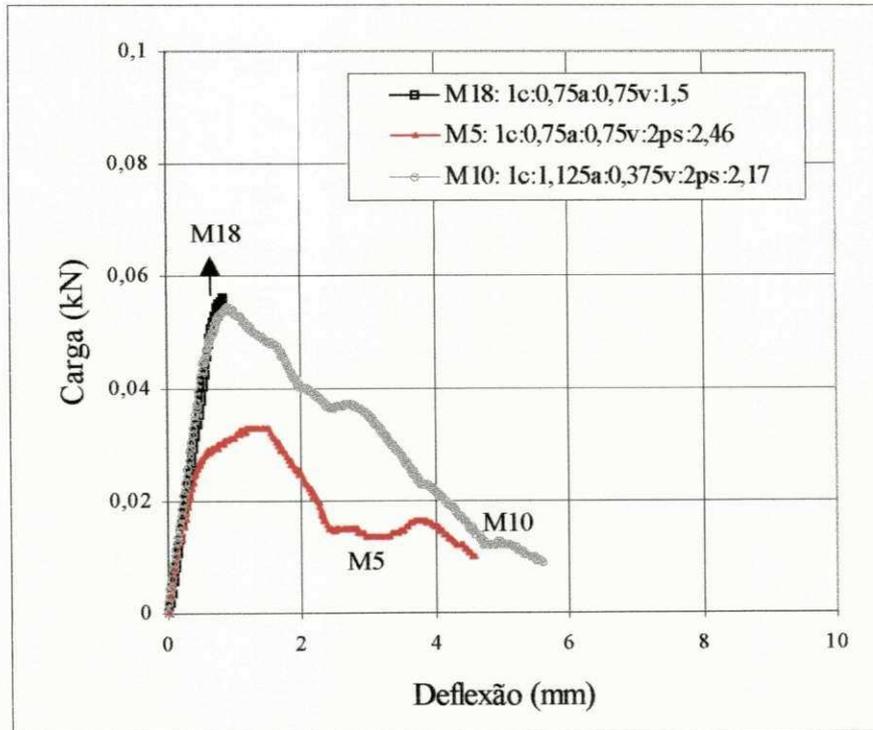


FIGURA 4.46 – Curva carga-deflexão para a matriz M18 e as misturas M5 e M10 moldadas com energia de prensagem

4.3 CONDUTIVIDADE TÉRMICA DOS COMPÓSITOS

A Tabela 4.26 apresenta as propriedades térmicas dos compósitos.

TABELA 4.26 – Propriedades térmicas dos compósitos.

Mistura N ^o	Traço	Densidade aparente seca (kg/m ³)	Condutivid. térmica (W/mK)	Resistividade térmica (mK/W)	Condutância térmica (W/m ² K)	Resistência térmica (m ² K/W)
M16	lc:1,5a:0,5	1840,02	0,74	1,35	61,66	0,016
M1	lc:1,5a:2ps:1,75	1218,21	0,44	2,87	36,66	0,027
M18	lc:0,75a:0,75v:1,50	955,94	0,29	3,41	20,928	0,0480
M10	lc:1,125a:0,375v:2ps:2,0	1112,28	0,19	5,32	12,533	0,0798
M5	lc:0,75a:0,75v:2ps:1,75	871,74	0,16	6,17	11,571	0,0860

Para o concreto pode-se dizer que, em geral, o valor da condutividade térmica é diretamente proporcional à massa específica. Isto ocorre porque a diminuição da massa específica está relacionada à presença de ar dentro na mistura. No entanto, além da massa específica, vários outros fatores influenciam a condutividade térmica dos concretos e argamassas, como o tipo de material constituinte, sua proporção e o método de moldagem. Desta forma, é possível obter concretos com mesma massa específica, mas condutividade diferentes ou com mesma condutividade e massa específica diferente.

Segundo ANDRADE (1997) a condutividade térmica do cimento, madeira, areia quartzosa, água e ar é igual a, respectivamente, 1,30, 0,08, 3,06, 0,59 e 0,02 W/mK. A vermiculita possui, na forma de flocos, e condutividade térmica 0,068 W/m.K. A condutividade térmica do algodão é de 0,06 W/m.K.

Os resultados apresentados na Tabela 4.26 são mostrados na forma de gráfico nas figuras a seguir a fim de se determinar a influência dos materiais constituintes dos compósitos na sua condutividade térmica. A Figura 4.47 mostra a influência da adição de 2% de polpa na condutividade da matriz sem vermiculita. Os resultados mostram uma redução de cerca de 69% na condutividade térmica quando a polpa está presente na mistura. Observe a redução de 51% na massa específica do compósito com a adição de polpa de sisal.

A Figura 4.48 mostra a influência da adição de vermiculita na condutividade térmica das argamassas. Os resultados obtidos indicam uma redução de 155% na condutividade das argamassas quando 50% de areia foi substituída por vermiculita. A

redução na densidade da argamassa foi de cerca de 93%.

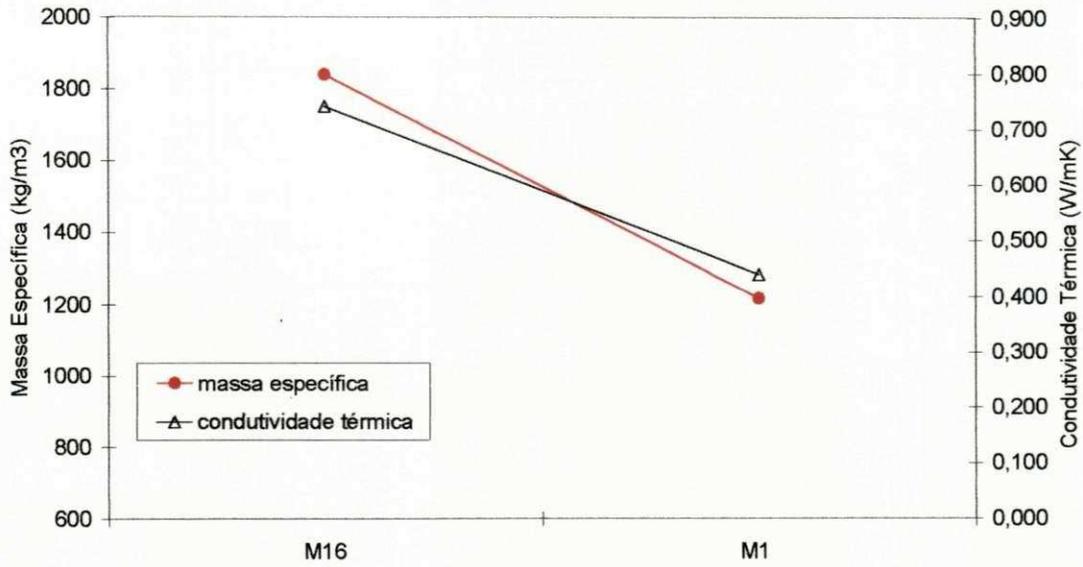


FIGURA 4.47 - Influência da polpa de sisal na massa específica e condutividade térmica de argamassas

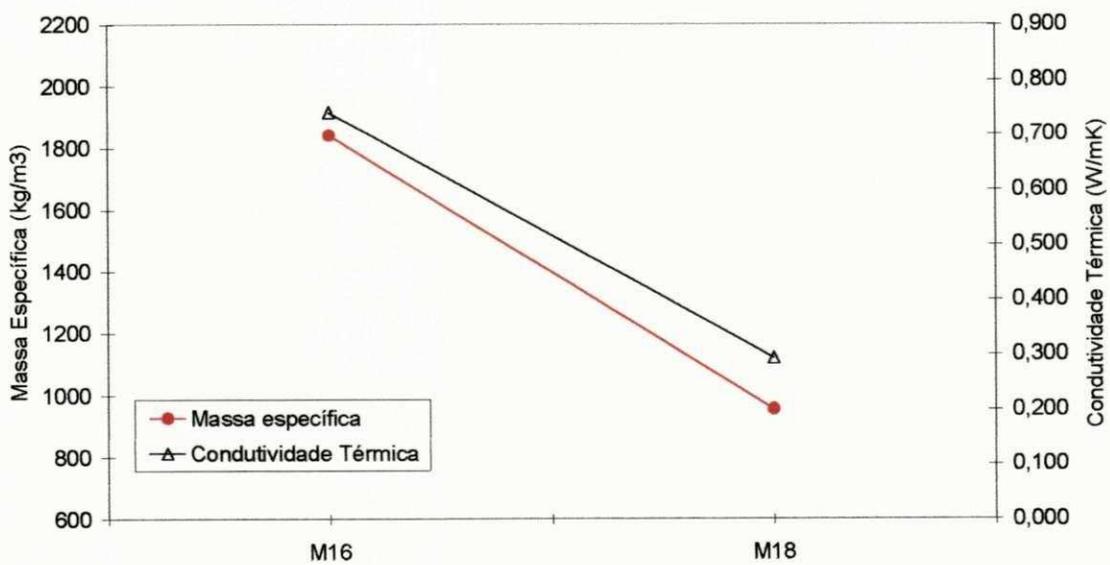


FIGURA 4.48 – Influência da vermiculita na massa específica e condutividade térmica de argamassas

Adicionando-se 2% de polpa de sisal e substituindo-se 25% de areia por vermiculita ocorre uma redução de cerca de 3,9 vezes na condutividade da argamassa. Utilizando 50% de vermiculita em substituição ao agregado miúdo, ocorre uma redução de 4,6 vezes na condutividade da argamassa de referência (ver Figuras 4.49 e 4.50).

Os resultados apresentados demonstram a eficiência da vermiculita e da polpa de sisal na produção de concretos leves isolantes.

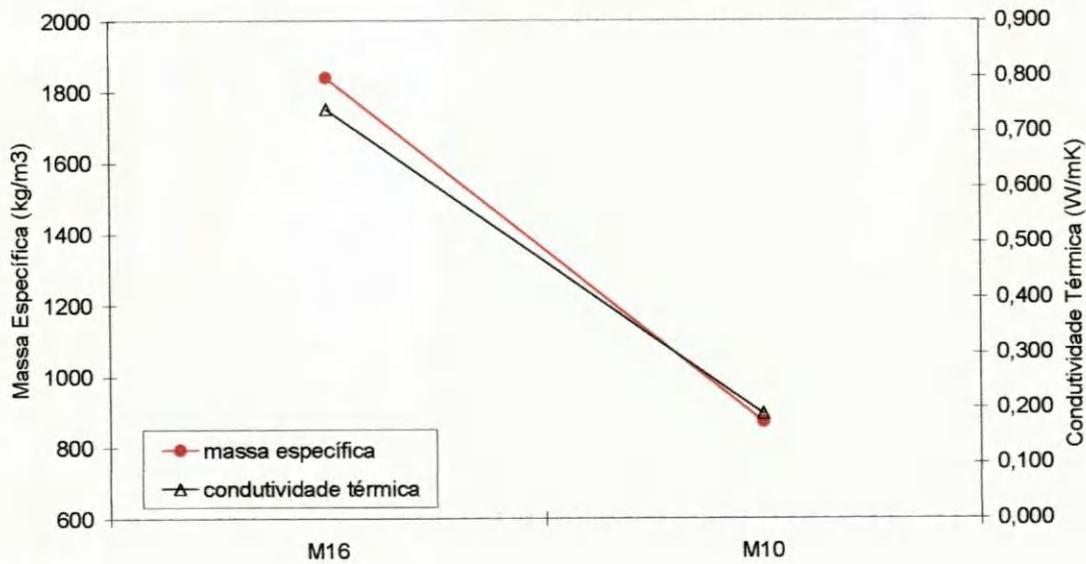


FIGURA 4.49 - Influência da polpa de sisal (2%) e vermiculita (25%) na massa específica e condutividade térmica de argamassas

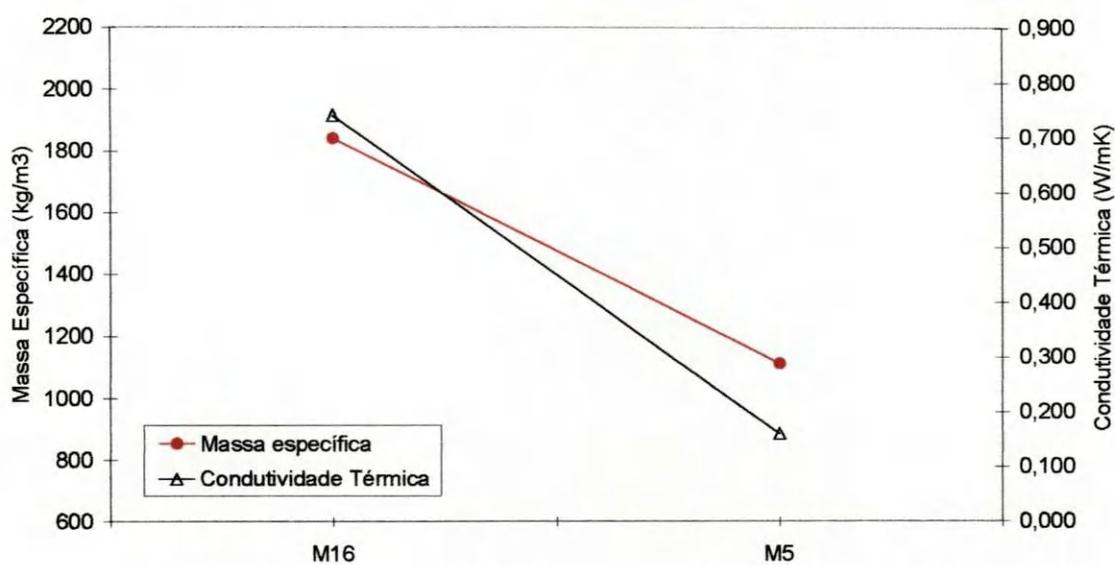


FIGURA 4.50 - Influência da polpa de sisal (2%) e vermiculita (50%) na massa específica e condutividade térmica de argamassas

CONCLUSÕES

As seguintes conclusões podem ser tiradas a partir da investigação experimental realizada:

a) a densidade aparente dos compósitos é inversamente proporcional a sua absorção de água e índice de vazios, isto é, a medida que aumenta-se a densidade do compósito uma redução na absorção e no índice de vazios é observada. Valores de densidade variando de 900 a 1460 kg/m³ foram observados para os compósitos curados em água. Os valores mais próximos do limite inferior foram obtidos para as misturas com maior teor de vermiculita e polpa. Os valores de absorção de água variaram de 31,7 a 65%. A matriz sem vermiculita apresentou absorção de água de cerca de 11%. A natureza altamente higroscópica da vermiculita e da polpa foram as responsáveis pela maior absorção do compósito. O índice de vazios variou de 39,1 a 53,8%. A cura em autoclave reduziu a densidade dos compósitos em cerca de 4% enquanto que os compósitos moldados com energia de prensagem apresentaram acréscimo na densidade de até 15%. A absorção de água e o índice de vazios decresceram com a cura em autoclave ou moldados sob prensagem.

b) a variação dimensional das placas compósitas variou de 0,97 mm/m a 2,29 mm/m. A matriz apresentou variação dimensional de 0,54 mm/m. Os valores observados encontram-se em concordância com os apresentados na literatura e atende às recomendações para uso prático.

c) a resistência à compressão dos compósitos curados em água variou de 0,89 a 3,83 MPa enquanto que a resistência à flexão variou de 0,45 a 1,11 MPa. Os baixos valores estão relacionados com a presença da polpa, da vermiculita e do alto fator água/cimento utilizado. Fator água/cimento variando de 1,75-2,25 era requerido para permitir a trabalhabilidade das misturas contendo polpa e vermiculita. A grande aplicação de todas estas misturas será com fins não estruturais.

d) os compósitos curados em autoclave apresentaram resistência à compressão variando de 0,93 a 5,23 MPa e resistência à flexão variando de 0,84-1,92 MPa. As misturas M1 e M10 apresentaram resistência à compressão superiores a 3,5 MPa com densidade aparente de 1390 e 1150 kg/m³ atendendo às prescrições do RILEM para uso estrutural/isolamento. O módulo de elasticidade dos compósitos autoclavados variou de 1,48 a 3,86 GPa.

e) os compósitos moldados sob energia de prensagem apresentaram resistência à compressão variando de 7,20 a 34,8 MPa e resistência à flexão variando de 1,01 a 3,13 MPa. O módulo de elasticidade desses compósitos variou de 3,02 a 25,82 GPa. As misturas M1 e M10 podem ser classificadas, seguindo-se a classificação de SARJA, 1988, como compósitos estruturais.

f) a presença de polpa de sisal e bambu modificaram o comportamento pós-pico das matrizes conferindo-lhes maior capacidade de absorver energia. As polpas de sisal foram mais eficazes nesse sentido por serem mais longas.

g) a condutividade térmica dos compósitos variou de 0,16 a 0,44 W/m.K enquanto que a matriz sem vermiculita e polpa apresentou uma condutividade de 0,74 W/m.K. A matriz com substituição de 50% de areia por vermiculita apresentou condutividade térmica de 0,29 W/m.K. Observa-se, assim a eficácia da vermiculita+polpa na produção de materiais isolantes térmicos e corta-fogo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, J. D., A Vermiculita como Agregado para Concreto. São Paulo, 1982. Palestra proferido no Comitê Técnico CT 501 – Alvenaria Estrutural, julho.

ANDRADE, W. P., Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades / autores Equipe de Furnas, Laboratório de Concreto, Departamento de Apoio e Controle Técnico. São Paulo: Pini, 1997.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI), Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete, ACI 544.2R-89. Detroit, Michigan, USA, 1989.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS., “Cimento Portland – Determinação da Resistência à Compressão”, NBR - 7215.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI), Guide for Precast Cellular Concrete Floor, Roof, and Wall Units; ACI 523.2R-96. Detroit, Michigan, USA, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778 – Argamassa e Concreto Endurecido: Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. EB 230 - Agregados Leves para Concreto Estrutural. Rio de Janeiro: ABNT, 1969.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7217 – Agregados – Determinação da Composição Granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13555 - Solo cimento- Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

ASSUNÇÃO, L. M. C. Estudo da Expansão e Caracterização de Vermiculitas Nordestinas. Campina Grande, PB. 1985. Tese de Mestrado.

ASTM C 196-48, Expanded or exfoliated vermiculite in thermal insulation cement.

ASTM C 330-64T, Tentative specifications for lightweight aggregates for structural concrete.

ASTM C 331-64T, Tentative specifications for lightweight aggregates for concrete Masonry units.

ASTM C 177-76, Standard test method for steady-state thermal transmission properties by means of the guarded hot plate.

ASTM C 332-61, Standard specifications for lightweight aggregates for insulating concrete.

BAETA, F. C.; SOUZA, C. F., *Ambiência em Construções Rurais*. Viçosa. UFV. 1997.

BARROS, M.A.L.; CARVALHO, O.S.; SILVA, O.R.R.F., “Economia e situação da cultura do sisal”. Embrapa-CNPA, Campina Grande, 1999 13-23pp.

BEAUDOIN, J. J., *Handbook of Fiber - Reinforced Concrete, Principles, Properties, Developments and Applications*. Ottawa, Canada, 1990.

BRASIL, Especificação para padronização, classificação e comercialização interna do sisal bruto, Ministério da Agricultura, , Brasília, 1987, 7p.

- BRASIL, Norma de identificação, qualidade, apresentação e embalagem da fibra beneficiada de sisal ou agave e seus resíduos de valor econômico, Ministério da Agricultura, Brasília, 1989, 15p.
- CARVALHO FILHO, A. C. "Mortar reinforced with sisal: mechanical behavior in flexure". In: *Vegetable Plants and Their Fibres as Building Material*. Proceeding N° 7, RILEM, Salvador, 1990.
- CHATFIELD, C., "Statistics for Technology", Chapman and Hall, Londres, 1983.
- CHATVEERA, B. e NIMITYONGSKUL, P. Influence of rice husk ash on properties of sisal pulp-mortar composite. *ACI Special Publication*, SP, 154-11, Farmington Hill, 1987, 211-228pp.
- COOK, D.J., Concrete and Cement Composites Reinforced with Natural Fibre". *Concrete International*, Ci80, Fibrous Concrete. The Concrete Society, the Construction Press, UK, 99-114.
- COLE, W. A. ; ZETTERSTROM, J. D., Investigation of lightweight aggregates of North and South Dakota, U.S. Bureau Mines R.I. 5065, 1954.
- COUTTS, R. S. P., Autoclaved Bamboo Pulp Fibre Reinforced Cement. Em: *Cement & Concrete Composites*. 1995, 99 – 106 pp.
- COUTTS, R. S. P., WOOD FIBRE REINFORCED CEMENT COMPOSITES. In: *NATURAL FIBRE REINFORCED CEMENT AND CONCRETE*, por Swamy, R. N. (1988) 1- 58 pp.
- COUTTS, R. S. P. & WARDEN, P. G., Sisal Pulp Reinforced Cement Mortar. Em *Cement & Concrete Composites*, 1992, 17-21pp.
- EVERHART, J.O., EHLERS, E. C., JOHNSON, J. E. e RICHARDSON, J. H., A study of lightweight aggregates, *Ohio State University Engineering Experiment Station Bulletin* 169, Columbus, 1958.

- FERRAZ, C. P., Vermiculita, um importante mineral industrial, DNPM, Seção Econômica, Rio de Janeiro, 1971.
- FERREIRA JUNIOR, S., Concretos Especiais para Pavimentos: Usos de Látex, Microssilica e Fibras de Aço. São Paulo, 1992, ABCP, 55p.
- FORDOS, F., Natural or modified cellulose fibres as reinforcement in cement composites. In: NATURAL FIBRE REINFORCED CEMENT AND CONCRETE, por Swamy, R. N. (1988) 173 – 207 pp.
- FULKERSON, F.B., Vermiculite, U.S. Bureau of Mines Minerals Yearbook, vol. I, p. 1295 Washington, 1972.
- JOHNSTONE, S. J. E JOHNSTONE, M. G., Vermiculite – Minerals for the chemical and allied Industries, 2ª ed., p. 696, Chapman & Hall, 1961.
- LADOO, R. B. E MYERS, W. M., Vermiculite – Non - Metallic Minerals, 2ª ed., p. 574, McGraw-Hill, New York, 1953.
- NEVILLE, A. M., The Failure of Concrete Compression Test Specimens, Civil Engineering, 52, Nº 613, 1997. pp. 773-774.
- OZISIK, M.N., Transferência de Calor. Editora Guanabarra, Rio de Janeiro, 1990.
- PETRUCCI, E. G. R., Concretos Leves Celulares e Sem Finos. São Paulo, 1973. Conferência proferido no Instituto Brasileiro do Concreto, fevereiro.
- PETRUCCI, E. G. R., Concreto de Cimento Portland. Editora Globo, Rio de Janeiro, 1980.
- PLUMER, N. E HLADIK, W. A., The manufacture of lightweight concrete aggregate from Kansas clays and shales, State Geological Survey of Kansas Bulletin 91, Lawrence, EUA, 1951.

RÉUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES D'ESSAIS ET DE RECHERCHES SUR LES MATÉRIAUX ET LES CONSTRUCTIONS (RILEM).

Classificação funcionelle des bétons légers. Matériaux et Constructions, Paris, v.11, n.64, p.281, jul/out, 1978.

RILEM TECHNICAL COMMITTEE 49 TFR. Testing Methods for Fibre reinforced Cement Based Composites. Test for the determination of modulus of rupture and limit of Proportionality of thin fibre reinforced cement sections. Vol. 17, Nº 102, Nov/Dec. 1984.

ROSENBERG, J.P., Estudo de vermiculitas brasileiras, tese de doutoramento, Inst. Química, USP, São Paulo, 1972.

SANTOS, A. L. F.; ALVES, T.M.L.; ALMEIDA, L.C.-MEDEIROS JUNIOR, C.J.; PICCOLI, G.M. E CODÁ, H.S.I. Concreto Leve de Alto Desempenho. Em: REIBRAC, 36,1994, Vol. I. Anais. Porto Alegre: Novas Práticas de Execução de Obras de Concreto, 1994, 14 p.

SANTOS, P. S., Ciência e Tecnologia de Argilas. 2ª ed. Editora Edgard Blucher LTDA. São Paulo, SP, 1992.

SANTOS, P. S., Ciência e Tecnologia de Argilas. 3ª ed. Editora Edgard Blucher LTDA. São Paulo, SP, 1992.

SARJA, A., Wood fibre reinforced concrete. Em: NATURAL FIBRE REINFORCED CEMENT AND CONCRETE, por Swamy, R. N. (1988) 63 - 88 pp.

SAROUSHIAN, P.; MARIKUNTE. E WON, J.P. "Statistical Evaluation of the Physical Properties of Wood Fiber-Cement Composites" In: Thin Reinforced Concrete Products and Systems". Balapuru, 1994:130-138pp.

SILVA, E. A.; NEYRET, A.; PETERLI, Z.; LEAL, M. B., Concretos Poliméricos. No 30ª Reunião Anual de Pavimentação, Salvador, Bahia, 1996.

- SILVA, O.R.R.F.; CARVALHO, O.S. e RAMOS, E. S. B. Cultivo do Sisal no Nordeste. In: O Agropecário do Sisal no Brasil, Embrapa, Campina Grande, 1999, pp. 53-92.
- SMOOK, G. A., Handbook for Pulp & Paper Technologists. Atlanta, GA, USA. 1989.
- SOBRAL, H. S., Concretos Leves: Tipos e Comportamento Estrutural. 3.ed. São Paulo: ABCP, 1996. 68p. (ET-86)
- TESFAYE, E.; CLARKE JR., L.L. e COHEN, E.B. "Test method for measuring moisture movements in fibre concrete panels". In: RILEN SIMPOSIUM – Testing and Test methods of fibre cement composites", R. N. Swamy The Construction Press. 1999, 159-171pp.
- TEZUKA, Y., Concreto de Cimento e Polímero. São Paulo, ABCP, 1988, 30p.
- TINÔCO, I. F. F., Ambiência e Instalações para Avicultura Industrial. In: III ENCONTRO NACIONAL DE TÉCNICOS, PESQUISADORES E EDUCADORES DE CONSTRUÇÕES RURAIS, 1998, Lavras, UFLA / SBEA. p. 1 – 86.
- TOLÊDO FILHO, R.D.; "Materiais compósitos Reforçados com Fibras Naturais Vegetais", In: Simpósio XXVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA - Materiais não Convencionais para Construções Rurais", Campina Grande, 1997, pp 49-82.
- TOLÊDO FILHO, R. D., Natural Fibre Reinforced Mortar Composites: Experimental Characterisation, Ph.D Thesis, DEC-PUC-Rio/DEC-Imperial College, London, U.K., 1997 472pp.
- TOLÊDO FILHO, R. D., Aproveitamento dos resíduos do desfibramento e beneficiamento do sisal como reforço de materiais de construção, Projeto submetido à avaliação do Banco Mundial \ PRODETAB, 1997.
- TOLÊDO FILHO, R.D. Utilização da Fira de Sisal na Construção Civil. In: O Agronegócio do sisal no Brasil, Embrapa-CNPA, Campina Grande, 1999. 177-200pp.

ZOLLO, R. F. E HAYS, C. D., Engineering Material Properties of a Fiber Reinforced Cellular Concrete, ACI Materials Journal, V. 95, Nº 5, September-October 1998, pp. 631-635.