



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DOUTORADO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

TESE DE DOUTORADO

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DAS INDÚSTRIAS DE
CERÂMICAS E DE CALÇADOS NA ELABORAÇÃO DE
MATERIAIS E PRODUTOS À BASE DE CIMENTO
PORTLAND REFORÇADOS COM FIBRAS DE SISAL**

ANTÔNIO FARIAS LEAL

Campina Grande - PB
Março - 2004

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DAS INDÚSTRIAS DE
CERÂMICAS E DE CALÇADOS NA ELABORAÇÃO DE
MATERIAIS E PRODUTOS À BASE DE CIMENTO
PORTLAND REFORÇADOS COM FIBRAS DE SISAL**

ANTÔNIO FARIAS LEAL

Tese apresentada ao Doutorado em Engenharia de
Processos da Universidade Federal de Campina
Grande para obtenção do grau de Doutor.

ORIENTADOR: JOSÉ WALLACE B. DO NASCIMENTO

Campina Grande - PB
Março - 2004

DIGITALIZAÇÃO:
SISTEMOTECA - UFCG

Leal, Antônio Farias

L435u Utilização de resíduos das indústrias de cerâmicas e de calçados na elaboração de materiais e produtos à base de cimento portland reforçados com fibras de sisal./ Antônio Farias Leal. – Campina Grande: UFCG, 2004.
128p. il.

Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande.

1.Compósitos 2.Fibras de sisal 3.Resíduos industriais
4.Durabilidade I. Título

CDU: 691.32

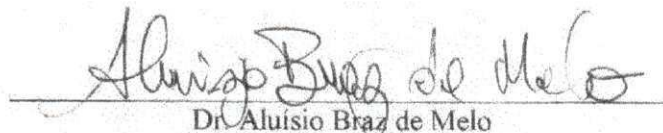
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DOUTORADO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

Tese

“UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DAS INDÚSTRIAS DE CERÂMICAS E DE
CALÇADOS NA ELABORAÇÃO DE MATERIAIS E PRODUTOS À BASE
DE CIMENTO REFORÇADOS COM FIBRAS DE SISAL”

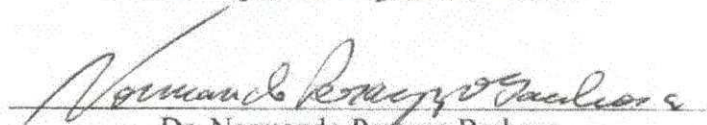
ANTÔNIO FARIAS LEAL

Banca examinadora:



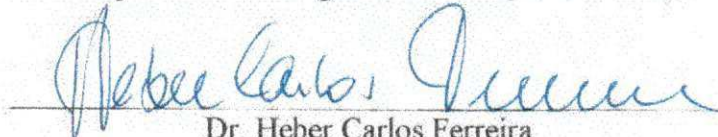
Dr. Aluísio Braz de Melo

Prof. Depto. de Arquitetura – UFPB



Dr. Normando Perazzo Barbosa

Prof. Depto. de Tecnologia da Construção Civil – UFPB



Dr. Heber Carlos Ferreira

Prof. Depto. de Engenharia de Materiais – UFCG



Dr. Raimundo Leidimar Bezerra

Associação Técnico-Científica Ernesto Luiz de Oliveira Junior – ATECEL



Dr. José Wallace B. do Nascimento - Orientador

Prof. Depto. de Engenharia Agrícola – UFCG

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. José Wallace Barbosa do Nascimento (DEAG-UFCG), pela amizade, orientação e constante encorajamento durante o curso desse trabalho.

Ao Prof. Romildo Dias Toledo Filho (COPPE-RJ), um agradecimento especial, pelo incentivo a realização do doutorado, pelas orientações e informações prestadas e pela amizade sempre renovada.

Agradeço ao Prof. Normando Perazzo Barbosa (DTCC-UFPB) pela amizade e por sua contribuição para a realização deste trabalho. Pelo fornecimento do material moído do resíduo de bloco cerâmico, pelas informações, orientações e ajudas prestadas.

Também sou grato ao Prof. Aluísio Braz Melo (DA-UFPB) pela amizade estabelecida e pelas informações e experiências compartilhadas, principalmente sobre os resíduos e agregados leves de EVA.

Agradeço ao Prof. Héber Carlos Ferreira (DEMA-UFCG) pelos ensinamentos ministrados, pelas experiências e informações compartilhadas. Sempre muito atencioso e prestativo nas minhas indagações.

Agradeço ao Prof. Francisco de Assis Santos e Silva (DEAG-UFCG) pela análise estatística e o fornecimento do software utilizado.

Agradeço ao Prof. Bernardo B. da Silva e ao Prof. Mário de Miranda V. B. R. Leitão (DCA-UFCG) pelas informações, orientações e ajudas prestadas.

Agradeço ao Doutorado em Engenharia de Processos, na pessoa da Profa. Odélsia L. S. de Alsina (coordenadora), pelo acolhimento e esforços dispensados para o reconhecimento e melhoramento deste curso, bem como seu constante incentivo para a conclusão deste trabalho.

Agradeço ao PRODETAB/EMBRAPA pelo apoio financeiro, que possibilitou o desenvolvimento deste trabalho.

Quero agradecer aos laboratórios do Departamento de Engenharia de Materiais e aos laboratórios de Solos do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

A grande maioria do trabalho experimental foi realizada no laboratório de Construções Rurais e Ambiência do Departamento de Engenharia Agrícola da UFCG. Gostaria de agradecer aos professores e funcionários deste laboratório e desse departamento. Agradeço particularmente aos meus colegas Marluce, Dermeval e Wallace por terem assumido minhas atividades acadêmicas enquanto estive no doutoramento.

Eu gostaria de agradecer ao funcionário Edil Grigório, que me ajudou com o árduo trabalho de peneirar, pesar e misturar os materiais, e ainda moldar, desmoldar, curar e cortar os corpos de prova, sempre com grande dedicação.

Quero registrar um agradecimento especial ao empresário Januário Ferreira de Souza Neto pelo empréstimo dos moldes metálicos e pelas informações sobre a fabricação de pré-moldados prensados.

Aos companheiros de curso Milton, Daizy, Cléa, e demais colegas pelo companheirismo que tivemos na batalha das disciplinas. Também agradeço aos companheiros Alex e Salustiano pelas informações compartilhadas.

Esse trabalho afastou-me de casa, mas sempre contei com o amor e apoio de minha esposa (Sandra) e dos nossos filhos (Rayssa, Jéssica e Matheus). Quero agradecer aos meus sogros, Prof. Hélio e Profª. Valdenira, que sempre nos ajudaram e nos dedicaram amor e carinho. Também agradeço aos meus pais, João e Odacir, pelo apoio que tenho recebido e pela alegria de tê-los sempre por perto.

SUMÁRIO

	Pág.
Resumo	i
Abstract	ii
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	vi
Lista de Simbologia	viii
Capítulo 1 Introdução	1
1.1 Considerações gerais	1
1.2 Justificativa	3
1.3 Objetivos gerais	4
1.3.1 Objetivos específicos	5
1.4 Apresentação da tese	5
Capítulo 2 A fibra do sisal e a matriz cimentícia	7
2.1 O agro-negócio do sisal	7
2.2 Características das fibras de sisal	10
2.3 Aplicação de fibras vegetais no reforço de materiais à base de cimento ...	11
2.4 Desempenho mecânico dos compósitos cimentícios fibrosos	12
2.5 Degradação das fibras naturais em meios alcalinos	13
2.6 Métodos usados para redução da degradação das fibras e dos compósitos	15
2.6.1 A substituição parcial do cimento Portland por pozolanas	16
2.7 O aproveitamento de resíduos industriais nas matrizes cimentícias	18
2.7.1 Resíduos da indústria cerâmica	19
2.7.2 Resíduos da indústria de calçados	20
Capítulo 3 Produção de compósitos estruturais reforçados com fibras	23
3.1 Generalidades	23
3.2 Materiais utilizados	24
3.2.1 Fibras de sisal	24
3.2.2 Aglomerante	24
3.2.3 Agregado miúdo	24
3.2.4 Resíduo cerâmico	25
3.2.4.1 Determinação da atividade pozolânica do resíduo cerâmico	26
3.3 Desenvolvimento de compósitos estruturais	26

3.3.1	Desenvolvimento de uma matriz de baixa alcalinidade	26
3.3.2	Planejamento experimental	27
3.4	Caracterização dos compósitos estruturais	30
3.4.1	Caracterização física	30
3.4.2	Caracterização mecânica	30
3.5	Estudo da durabilidade dos compósitos	33
3.5.1	Envelhecimento sob intemperismo natural	33
3.6	Resultados e discussão	34
3.6.1	Cimento Portland	34
3.6.2	Areia	35
3.6.3	Resíduo moído de bloco cerâmico	36
3.6.3.1	A atividade pozolânica	36
3.6.3.2	Teor de hidróxido de cálcio	37
3.6.4	Propriedades físicas dos compósitos estruturais	39
3.6.5	Propriedades mecânicas dos compósitos estruturais	45
3.7	Conclusões parciais	56
Capítulo 4	Produção de telhas com matrizes reforçadas com fibra de sisal	58
4.1	Generalidades	58
4.2	Produção das telhas	59
4.3	Envelhecimento natural sob condições de uso	62
4.4	Caracterização física das telhas	63
4.5	Caracterização mecânica das telhas	64
4.6	Avaliação do comportamento térmico das telhas	65
4.7	Resultados e discussão	67
4.7.1	Propriedades físicas das telhas	67
4.7.2	Ensaio de permeabilidade	70
4.7.3	Propriedades mecânicas das telhas	70
4.7.3.1	Capacidade de carga da telha inteira	70
4.7.3.2	Propriedades mecânicas em corpos-de-prova recortados das telhas	71
4.7.4	Análise do comportamento térmico das telhas	77
4.8	Conclusões parciais	79
Capítulo 5	Compósitos leves utilizando resíduos da indústria de calçados	81
5.1	Generalidades	81
5.2	Materiais compósitos leves à base de cimento	82
5.2.1	Concretos leves	82
5.2.2	Concretos com agregados leves	83
5.2.3	Concretos sem finos	84
5.3	Materiais utilizados	85

5.3.1	Cimento, fibra vegetal e resíduo cerâmico	85
5.3.2	Agregados leves de resíduos da indústria de calçados	85
5.4	Preparação dos compósitos leves	87
5.5	Estudo da durabilidade dos compósitos leves	88
5.5.1	Caracterização física dos compósitos leves	88
5.5.2	Caracterização mecânica dos compósitos leves	88
5.5.2.1	Resistência à compressão simples	88
5.5.2.2	Resistência à flexão	88
5.5.3	<i>Envelhecimento sob intemperismo natural</i>	90
5.6	Avaliação do comportamento térmico dos compósitos leves	90
5.7	Resultados e discussão	93
5.7.1	Agregados leves reciclados	93
5.7.2	Durabilidade dos compósitos leves	96
5.7.2.1	Propriedades físicas dos compósitos leves	96
5.7.2.2	Resistência à compressão simples	99
5.7.2.3	Ensaio de flexão em três pontos	100
5.7.3	Análise do comportamento térmico dos compósitos leves	104
5.8	Conclusões parciais	106
Capítulo 6	Conclusões	107
	Referências Bibliográficas	112

RESUMO

A geração de resíduos na produção industrial aumenta com o crescimento desse setor. Estes resíduos nem sempre são tratados de forma correta, trazendo conseqüências nocivas ao meio ambiente. A reutilização ou recuperação dos resíduos industriais além de ajudar nas questões sanitárias e na preservação das reservas naturais de matérias-primas, pode reduzir custos, proporcionando bons resultados para as empresas envolvidas e para a sociedade em geral. A construção civil tem grande potencial de absorver estes resíduos. Isto se justifica pela necessidade de redução dos custos e pela grande variedade de matéria-prima e produtos aplicados nas obras. Esta tese estuda o desenvolvimento e comportamento de compósitos à base de cimento Portland reforçados com fibras de sisal, com aproveitamento de resíduos das indústrias de blocos cerâmicos e de calçados. Primeiramente, foram desenvolvidos compósitos com fins estruturais. Foram idealizadas várias misturas com e sem reforço de fibras de sisal. No intuito de reduzir a alcalinidade da matriz cimentícia e aumentar a durabilidade das fibras no interior dos compósitos, foi realizada a substituição parcial do cimento Portland por um material pozolânico proveniente da fina moagem de resíduos de blocos cerâmicos. Também foram utilizadas duas formas de compactação da matriz: vibração mecânica e prensagem na moldagem. Para avaliação da durabilidade, realizaram-se ensaios para caracterização física e mecânica dos compósitos em duas condições de exposição: amostras submetidas ao intemperismo natural e amostras abrigadas em laboratório. Em seguida, foi desenvolvido um modelo de telha capa-canal que dispensa o uso de caibros e ripas, utilizando-se algumas das misturas dos compósitos estruturais estudados. Foram realizados ensaios físicos e mecânicos para avaliação da durabilidade de telhas abrigadas em laboratório e expostas ao intemperismo natural sobre um modelo em uma situação de uso em escala real. Determinaram-se as características físicas e mecânicas ao longo do tempo em amostras recortadas das telhas. Analisou-se também o comportamento térmico em modelos reduzidos expostos à radiação solar e monitorados eletronicamente. Finalmente, foram desenvolvidos compósitos cimentícios leves sem a presença de areia, utilizando resíduos da indústria de calçados como agregados miúdos leves. As misturas foram preparadas com e sem o resíduo moído de blocos cerâmicos e utilizando-se fibras de sisal em uma das misturas. Foram realizados ensaios físicos e mecânicos para avaliação da durabilidade sob diferentes condições de exposição. Também foi desenvolvido um ensaio de comportamento térmico em uma estufa, simulando um revestimento de parede. Esses estudos demonstraram as potencialidades do aproveitamento desses resíduos industriais locais, abundantes, de alto valor agregado, e que são tratados como entulho e lançados no meio-ambiente. Os compósitos produzidos apresentaram propriedades físicas e mecânicas que atenderam à maioria das normas que tratam do assunto. A utilização das fibras nos compósitos cimentícios apresentou vantagens nas primeiras idades de cura, evitando a ruptura frágil e absorvendo pequenos impactos existentes durante o manuseio, transporte e instalação de produtos. Os compósitos produzidos também apresentaram um melhor comportamento térmico que as matrizes de referência.

Palavras-chaves: compósitos fibrosos, fibras de sisal, durabilidade, resíduos cerâmicos, resíduos de EVA.

ABSTRACT

The generation of industrial residues is improve by the growth of the branch of activity. These residues not always they are treated in a correct way, bringing noxious consequences to the environment. The reuse or recovery of those residues besides helping in the sanitary subjects and in the preservation of the nature reserves of raw materials, it can reduce costs, providing good results for the involved companies and for the society in general. The civil construction has great potential of absorbing the industrial residues. This is justified for the need of reducing costs and for the abundant raw material variety and products applied in the constructions. This thesis studies the development and behaviour of mortar composites reinforced with sisal fibres, using residues resulting from both bricks and shoes manufacturing. Firstly, composites were developed for structural applications. Several mixtures were prepared with and without reinforcement of sisal fibres. In order to reduce the alkalinity of the cementitious matrix and to increase the durability of the fibres inside the composites, a partial substitution of cement was accomplished using a pozzolanic material resulting from the fine grinding of residues of ceramic bricks. Furthermore, two forms of compacting the matrix were used: mechanical vibration and press compacting. For durability evaluation, tests for physical and mechanical characterisation of the composites were made under two exposure conditions: some samples were submitted to natural weather and some samples were sheltered. Soon afterwards, a prototype of roofing tiles was developed, using some of the studied composite mixtures. They significantly spared the use of roof timber. Physical and mechanical tests were made for evaluation of the durability both of sheltered tiles and tiles exposed to natural weather. Physical and mechanical characteristics were determined along the time in samples cut out of the tiles. Moreover, the thermal behaviour was analysed by having models exposed to solar radiation, being electronically monitored. Finally, light cementitious composites were developed without sand using, as light aggregate, residues from shoes factories. The mixtures were prepared with and without the fine grinding of ceramic residues. Sisal fibres were used in one of the mixtures. Physical and mechanical tests were made for evaluation of durability under different exposure conditions. In addition, a test of thermal behaviour was made in a heat chamber, simulating a wall plaster. Those studies clearly showed the potentialities of the use of local, abundant industrial residues, of high aggregated value, which are presently treated as dump and thrown in the environment. The produced composites presented physical and mechanical properties that fulfil most of the norms dealing with the matter. The use of fibres in cementitious composites presented advantages in the first months after the cure, avoiding fragile rupture and absorbing small impacts during handling, transportation and mounting of the products. Additionally, the composites presented thermal behaviour better than the reference matrix.

Keywords: fibrous composites, fibre-reinforced mortars, sisal fibres, durability, ceramic residues, EVA residues.

LISTA DE FIGURAS

	Pág	
FIGURA 2.1	Seção transversal de uma fibra de sisal	10
FIGURA 2.2	Resíduos de blocos cerâmicos lançados no meio-ambiente (Santa Rita-PB)	20
FIGURA 2.3	Resíduos de EVA estocados em galpão	21
FIGURA 3.1	Resíduos de blocos cerâmicos antes da moagem	25
FIGURA 3.2	Resíduos de blocos cerâmicos após moagem	25
FIGURA 3.3	Desenho mostrando os níveis estabelecidos para as variáveis nos compósitos de cimento Portland	28
FIGURA 3.4	Prensa e molde metálico usados para produção dos compósitos estruturais	29
FIGURA 3.5	Esquema do ensaio de flexão em três pontos	31
FIGURA 3.6	Máquina utilizada para o ensaio de flexão em três pontos	32
FIGURA 3.7	Detalhe dos apoios e do corpo-de-prova antes do ensaio de flexão	32
FIGURA 3.8	Placas expostas ao intemperismo natural para estudos de durabilidade	33
FIGURA 3.9	Curva granulométrica da areia utilizada	35
FIGURA 3.10	Análises térmicas (ATD e ATG) das pastas de cimento CII-Z-32 e de diferentes teores de substituição parcial do cimento por resíduo cerâmico, após 28 dias de cura submersa	38
FIGURA 3.11	Variação da massa específica dos compósitos ao longo de 210 dias de cura em diferentes condições de exposição	42
FIGURA 3.12	Variação da absorção dos compósitos ao longo de 210 dias de cura em diferentes condições de exposição	43
FIGURA 3.13	Variação da porosidade dos compósitos ao longo de 210 dias de cura em diferentes condições de exposição	44
FIGURA 3.14	Curvas características da força x deflexão para os compósitos	44
FIGURA 3.15	Variação do módulo de ruptura (MOR) dos compósitos em diferentes condições de exposição	49

FIGURA 3.16	Varição do módulo de elasticidade (MOE) dos compósitos em diferentes condições de exposição	50
FIGURA 3.17	Varição da energia específica (EE) dos compósitos em diferentes condições de exposição	51
FIGURA 3.18	Influência da fibra de sisal, do resíduo de bloco e da prensagem no módulo de ruptura (MOR) dos compósitos	52
FIGURA 3.19	Influência da fibra de sisal, do resíduo de bloco e da prensagem no módulo de elasticidade (MOE) dos compósitos	53
FIGURA 3.20	<i>Influência fibra de sisal, do resíduo de bloco e da prensagem na energia específica (EE) em placas de diferentes idades</i>	54
FIGURA 3.21	Curvas força x deflexão para a mistura M30S submetida ao intemperismo	55
FIGURA 4.1	Molde em madeira e chapa metálica para confecção das telhas	60
FIGURA 4.2	Esquema da fôrma para moldagem das telhas (sem escala)	61
FIGURA 4.3	Telhas submetidas ao envelhecimento natural sob condições de uso em um modelo em escala real	62
FIGURA 4.4	Detalhe do ensaio de permeabilidade	63
FIGURA 4.5	Telha recortada para extração de corpos de prova	64
FIGURA 4.6	Ensaio da capacidade de carga da telha inteira	64
FIGURA 4.7	Detalhes dos modelos usados na análise do comportamento térmico (a) e (b)	66
FIGURA 4.8	Varição das propriedades físicas das telhas ao longo do tempo	69
FIGURA 4.9	Face inferior de telhas submetidas ao ensaio de permeabilidade	70
FIGURA 4.10	Varição do módulo de ruptura (MOR) das telhas	73
FIGURA 4.11	Varição do módulo de elasticidade (MOE) das telhas	74
FIGURA 4.12	Varição da energia específica (EE) das telhas	75
FIGURA 4.13	Superfície de fratura de telhas submetidas ao intemperismo natural após 570 dias de envelhecimento	76
FIGURA 4.14	Superfície de fratura de corpos de prova retirados de telhas submetidas ao intemperismo natural em diferentes idades	77
FIGURA 4.15	Influência da radiação global na temperatura de superfície inferior dos diversos tipos de telhas	78
FIGURA 4.16	<i>Influência dos diversos tipos de telhas na temperatura de globo negro</i>	79
FIGURA 5.1	Resíduos de placas e solas de EVA	86
FIGURA 5.2	Moinho triturador de facas rotativas	86

FIGURA 5.3	Abertura da peneira e dimensão máxima do agregado obtido	86
FIGURA 5.4	Molde metálico usado para confecção dos compósitos leves	89
FIGURA 5.5	Ensaio de flexão em três pontos do compósito leve	89
FIGURA 5.6	Esquema do ensaio de comportamento térmico dos compósitos leves	90
FIGURA 5.7	Equipamentos utilizados no ensaio de comportamento térmico dos compósitos leves	91
FIGURA 5.8	Fluxo de calor através da placa e do bloco	92
FIGURA 5.9	Produtividade em função da $D_{máx}$ do agregado de EVA	94
FIGURA 5.10	Curva de absorção de água do agregado de EVA utilizado	95
FIGURA 5.11	Curva granulométrica do agregado de EVA escolhido	96
FIGURA 5.12	Variação das propriedades físicas dos compósitos leves ao longo do tempo	97
FIGURA 5.13	Compósitos leves aos 90 dias borrifados com solução de fenolftaleína	98
FIGURA 5.14	Evolução da resistência à compressão simples dos compósitos leves	99
FIGURA 5.15	Curvas característica do ensaio de flexão dos compósitos leves	100
FIGURA 5.16	Variação do módulo de ruptura à flexão (MOR) dos compósitos leves	103
FIGURA 5.17	Variação módulo de elasticidade (MOE) dos compósitos leves	103
FIGURA 5.18	Variação da energia específica (EE) dos compósitos leves	103
FIGURA 5.19	Comportamento térmico característico dos conjuntos ensaiados	104
FIGURA 5.20	Gradientes de temperatura dos conjuntos após 6 horas de ensaio	105

LISTA DE TABELAS

	Pág.
TABELA 2.1	Produção mundial e principais produtores de sisal (em 1.000t) 08
TABELA 2.2	Propriedades físicas e mecânicas de fibras de sisal 11
TABELA 3.1	Programa experimental e nomenclatura das misturas produzidas 28
TABELA 3.2	Equações utilizadas para o cálculo das propriedades físicas 30
TABELA 3.3	Características químicas do cimento Portland utilizado 34
TABELA 3.4	Características físicas do cimento Portland utilizado 34
TABELA 3.5	Composição granulométrica da areia utilizada 35
TABELA 3.6	Caracterização química e física do resíduo de blocos cerâmicos 36
TABELA 3.7	Índice de atividade pozolânica aos 28 dias de cura 37
TABELA 3.8	Teor de hidróxido de cálcio nas pastas após 28 dias de cura 37
TABELA 3.9	Propriedades físicas dos compósitos ao longo de 210 dias de cura 41
TABELA 3.10	Propriedades mecânicas dos compósitos estruturais 48
TABELA 4.1	Misturas desenvolvidas para produção das telhas 60
TABELA 4.2	Variação das propriedades físicas das telhas com o tempo 67
TABELA 4.3	Capacidade de carga distribuída máxima da telha inteira, aos 90 dias 71
TABELA 4.4	Módulo de ruptura à flexão das telhas, MOR 73
TABELA 4.5	Módulo de elasticidade das telhas, MOE 74
TABELA 4.6	Energia específica das telhas, EE 75
TABELA 5.1	Classificação funcional dos concretos leves com agregados leves 84
TABELA 5.2	Misturas desenvolvidas para produção de compósitos leves 87
TABELA 5.3	Aberturas das peneiras utilizadas no moinho, dimensão máxima dos agregados obtidos e respectivas produtividades 94

TABELA 5.4	Propriedades físicas do agregado escolhido do resíduo de EVA	94
TABELA 5.5	Composição granulométrica do agregado de EVA escolhido	95
TABELA 5.6	Variação das propriedades físicas dos compósitos leves com o tempo (dias), em diferentes condições de exposição	96
TABELA 5.7	Resistência à compressão simples dos compósitos leves	99
TABELA 5.8	Variação das propriedades mecânicas dos compósitos leves com o tempo (dias) em duas condições de exposição	102
TABELA 5.9	Temperaturas médias obtidas nos conjuntos e relações entre as condutividades térmicas das placas após 6 horas de ensaio	105

LISTA DE SÍMBOLOS

ABS	Absorção de água
CV	Coefficiente de variação
h	Altura do corpo de prova
$D_{\text{máx}}$	Dimensão máxima dos agregados
L	Amostras mantidas em laboratório
T	Amostras submetidas ao intemperismo natural.
EE	Energia específica
MOR	Módulo de ruptura à flexão
MOE	Módulo de elasticidade
MOE_f	Módulo de elasticidade da fibra
MF	Módulo de finura
M_s	Massa seca em estufa
M_{sat}	Massa saturada com superfície seca
M_i	Massa imersa em água
f_t	Resistência à tração
L	Comprimento de fibra
L	Comprimento do vão inferior entre apoios
m	Inclinação da curva carga-deflexão na região elástica
P	Carga máxima aplicada
b	Largura do corpo-de-prova na região de aplicação da carga
q	Espessura do corpo-de-prova na região de aplicação da carga
$\frac{dQ}{dt}$	Fluxo de calor
k	Condutividade térmica da placa
A_p	Área da placa exposta ao calor
e	Espessura da placa
T_p	Temperatura na superfície da placa
T_I	Temperatura na interface placa-bloco
T_s	Temperatura de superfície inferior
TGN	Temperatura de globo negro
RH	Umidade relativa
γ	Peso específico
ϕ_f	Diâmetro da fibra
ϕ	Diâmetro do corpo de prova
ϵ_{fu}	deformação de ruptura das fibras

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

A principal razão de se utilizar materiais compósitos é a possibilidade de desenvolverem propriedades que os materiais constituintes não possuem isoladamente. O reforço de material de construção com fibras tem sido utilizado desde o início das civilizações. Segundo a Bíblia, no livro de Êxodo, há 3500 a.C. os egípcios já usavam a palha para reforçar tijolos de barro que eram secos ao sol.

A utilização de fibras como reforço depende basicamente das propriedades da matriz. No caso das matrizes frágeis (pasta de cimento, argamassa ou concreto), objeto desta pesquisa, a maior contribuição da fibra acontece após a fissuração, quando elas formam verdadeiras pontes de ligação entre as regiões fissuradas da matriz. Nesse momento, a carga é transferida para as fibras, que passam a governar o comportamento do compósito em função das suas características, tais como módulo de elasticidade, comprimento, orientação, volume, etc.

Quando a fibra possui módulo de elasticidade e resistência mecânica maiores que os da matriz, por exemplo: fibras de aço, carbono ou vidro, a tensão na qual a matriz fissura pode até ser ligeiramente aumentada. Para compósitos reforçados com fibras de baixo módulo de elasticidade, como as fibras naturais, a principal função da fibra é incrementar a tenacidade da matriz pela criação de mecanismos de absorção de energia, relacionados ao efeito de escorregamento e arrancamento das fibras. Ou seja, a deformação de tração na ruptura é aumentada, resultando em um material com maior tenacidade e resistência ao

impacto.

Vários tipos de fibras têm sido utilizados como reforço de matrizes frágeis. Além das fibras manufaturadas, existe a alternativa de se utilizar reforços de origem vegetal. E, apesar dos problemas existentes de sensibilidade à alta alcalinidade da matriz de algumas dessas fibras, bem como a baixa adesão à matriz de cimento e a instabilidade física e química, vários produtos têm sido produzidos com relativo sucesso.

Entretanto, é preciso aprofundar as pesquisas sobre a incorporação das fibras vegetais como reforço de matrizes cimentícias, principalmente no que se refere à durabilidade dos produtos resultantes. Uma das maiores preocupações está relacionada com a redução na tenacidade dos compósitos com o tempo.

A maioria dos experimentos utiliza o cimento Portland e relata que as fibras vegetais tornam-se frágeis dentro da matriz devido ao ataque químico do hidróxido de cálcio (ataque alcalino) e apontam que a solução do problema está relacionada com a proteção superficial das fibras ou com a redução da alcalinidade da matriz, através da carbonatação da matriz ou uso de adições pozolânicas, que melhoram a durabilidade do compósito e minimizam as interações químicas entre as fibras e a matriz.

De uso já consagrado na construção civil, as adições pozolânicas podem contribuir para a durabilidade dos compósitos reforçados com fibras sensíveis à alta alcalinidade da matriz de cimento Portland, através da substituição parcial do cimento por essas pozolanas, principalmente as provenientes de resíduos industriais por causarem grandes transtornos ao meio ambiente e apresentarem um grande volume disponível e um baixo custo.

A construção civil, que é uma grande consumidora de recursos naturais através da extração mineral em torno das cidades, pode absorver grande parte dos resíduos das indústrias, utilizando-os como matéria-prima diretamente na obra ou em produtos pré-fabricados.

Dentre os vários resíduos industriais existentes que apresentam potencial pozolânico, os resíduos de blocos cerâmicos podem ser destacados. E, embora sejam resíduos com um alto valor agregado, uma vez que foram calcinados a mais de 900°C, são tratados como

entulho pelas indústrias cerâmicas, que muitas vezes os depositam indiscriminadamente no meio ambiente.

Outra indústria que gera grande quantidade de resíduos e de um potencial ainda pouco explorado para a construção civil é a de calçados. Essa indústria, ao mesmo tempo em que é impulsionada pelo crescimento do mercado, tem gerado grande quantidade de resíduos, resultado das sobras e retalhos inevitáveis das etapas produtivas. A maior parte destes resíduos não serve para ser reutilizada na própria indústria e seu volume cresce proporcionalmente ao crescimento econômico do setor.

O pequeno número de pesquisas sobre o aproveitamento de EVA (etileno acetato de vinila) na construção civil, e o desconhecimento de sua utilização em matrizes cimentícias com a incorporação de fibras naturais, encorajam o desenvolvimento de novos estudos, como é o caso da presente pesquisa.

1.2 Justificativa

O banimento do cimento-amianto aliado à variedade e abundância das fibras vegetais existentes no Brasil fazem com que essas fibras se tornem bastantes atrativas para serem usadas como reforço de matrizes à base de cimento. Dentre elas, destaca-se a fibra de sisal, visto que o Brasil é o principal produtor mundial e essa produção é fonte de renda e subsistência para mais de um milhão de pessoas, numa das regiões mais carentes desse país.

No caso da utilização das fibras de sisal como reforço de produtos com aplicação na construção civil, outras vantagens podem ser enumeradas:

- a) aumento do cultivo do sisal nos estados do Nordeste do Brasil, fazendo uso de áreas de baixa precipitação e de solos de baixa fertilidade, onde o cultivo de outras culturas é muito difícil, gerando novos empregos e reduzindo o êxodo rural;
- b) melhoria da infra-estrutura das propriedades rurais e de periferia das cidades, usando materiais locais, de baixo custo e de baixo consumo de energia na produção de elementos construtivos.

Os estados do Nordeste brasileiro também se destacam pela crescente produção da indústria de cerâmica vermelha. Com esse aumento da produção, cresce também o volume de resíduos gerados pelas perdas no processo produtivo, especialmente após a queima do produto, sendo esses resíduos lançados no meio ambiente, causando poluição e desperdiçando seu potencial pozolânico. No presente estudo, utilizou-se o material pozolânico proveniente de blocos cerâmicos visando reduzir os custos e a alcalinidade da matriz, através da substituição parcial do cimento Portland, e ainda melhorar a durabilidade dos compósitos reforçados com fibras de sisal.

No estado da Paraíba existem muitas indústrias de calçados e de mantas de borrachas utilizadas em palmilhas e solas dos calçados. Essas indústrias são geradoras de grande quantidade de resíduos sólidos não-biodegradáveis, compostos predominantemente de EVA e de SBR (látex estireno-butadieno), os quais são aproveitados como fonte de calor para alimentar a queima nos fornos rotativos das indústrias cimenteiras. Esta pesquisa utiliza resíduos da indústria de calçados à base de EVA, reciclando-os como agregado leve na produção de compósitos leves com e sem a incorporação de fibras de sisal.

1.3 Objetivo Geral

A presente pesquisa visa um incremento do conhecimento sobre a elaboração de compósitos e a produção de elementos construtivos à base de cimento Portland reforçados com fibras de sisal, utilizando resíduos das indústrias de cerâmica e de calçados, objetivando melhorar as características físico-mecânicas e a durabilidade dos compósitos e produtos.

Pretende-se alertar a comunidade industrial sobre a importância do reaproveitamento dos seus resíduos na construção civil, fazendo uso de algumas de suas propriedades e dando soluções alternativas para o problema ambiental que estes resíduos causam, devido ao grande volume gerado e a sua difícil deterioração. Ressaltando que poderá ser uma nova fonte de receita para os seus geradores que, em geral, desconhecem as potencialidades dos seus próprios resíduos para a construção civil.

1.3.1 Objetivos específicos

Este trabalho tem como objetivos específicos determinar o comportamento físico-mecânico dos compósitos cimentícios e produtos reforçados com fibras de sisal utilizando resíduos das indústrias de cerâmica e de calçados. Para tanto, foram idealizados os seguintes estudos: 1) analisar a influência da adição de fibras de sisal nos compósitos; 2) analisar o resíduo de bloco cerâmico moído como material pozolânico e sua utilização em substituição parcial ao cimento Portland, verificando sua influência nas propriedades dos compósitos; 3) verificar a influência da utilização de prensagem na moldagem dos compósitos estruturais; 4) utilizar o resíduo da indústria de calçados na produção de compósitos leves; 5) avaliar o comportamento térmico dos compósitos; e 6) verificar a durabilidade dos compósitos produzidos.

Também se busca a produção de um elemento de cobertura que apresente baixo custo, baixo consumo de energia, que seja durável e com tecnologia acessível às comunidades carentes. Foi sugerido um modelo de telha trapezoidal de 1,10m de comprimento, no sistema “capa-canal”, visando uma alternativa à telha de cimento-amianto. Pretende-se: 1) realizar ensaios de caracterização física e de desempenho mecânico das telhas; 2) realizar ensaios em amostras sob intemperismo natural para avaliação da durabilidade; e 3) realizar uma análise de comportamento térmico em modelos reduzidos.

1.4 Apresentação da Tese

A presente tese está dividida em 6 capítulos.

Capítulo 1: Introdução - Esse capítulo apresenta uma introdução geral à área de interesse desse trabalho, define os objetivos do programa de pesquisa e faz a apresentação do trabalho.

Capítulo 2: A fibra do sisal e a matriz cimentícia - Esse capítulo descreve a importância da cultura do sisal, a utilização da fibra em argamassa à base de cimento Portland, e a importância da reciclagem de resíduos industriais.

Capítulo 3: Produção de compósitos estruturais - Neste capítulo é apresentada a avaliação da influência da adição de fibras de sisal, do teor de substituição do cimento por material pozolânico obtido através da moagem de resíduos da indústria de blocos cerâmicos, e da utilização de prensagem na produção dos compósitos. São avaliados o módulo de elasticidade, a tensão de ruptura na flexão e a tenacidade do compósito, bem como a sua durabilidade frente ao intemperismo natural.

Capítulo 4: A produção de telhas - Esse capítulo apresenta a proposta de um elemento de cobertura (telha), avaliando as suas propriedades físicas e mecânicas ao longo do tempo, inclusive o comportamento térmico e durabilidade frente ao intemperismo natural. Foi construído um modelo em escala real para avaliação das telhas em situação de uso. Também foram construídos modelos reduzidos para um estudo comparativo do comportamento térmico das telhas com monitoramento eletrônico.

Capítulo 5: Produção de compósitos leves - Esse capítulo é dedicado à produção de compósitos leves visando à aplicação em forros, isolamento térmico, revestimentos acústicos, etc. Utiliza-se como agregado leve um resíduo da indústria de calçados paraibana, aproveitando os potenciais desse resíduo. Também foram acrescentadas fibras de sisal e material pozolânico obtido da moagem de resíduos de blocos cerâmicos. Foram avaliados os comportamentos físico e mecânico em diferentes condições de exposição. Também foi estudado o comportamento térmico em relação a uma argamassa comum.

Capítulo 6: Conclusões - Esse capítulo apresenta as principais conclusões obtidas nesse trabalho e propõe futuras pesquisas e desenvolvimentos que podem conduzir a processos e produtos do interesse da construção civil.

CAPÍTULO 2

A FIBRA DO SISAL E A MATRIZ CIMENTÍCIA

2.1 O Agro-Negócio do Sisal

O sisal (*agave sisalana perrine*) é uma planta originária do México que gera uma das mais importantes fibras vegetais do mundo. A cultura do sisal é perene, muito resistente e bem adaptada às regiões de temperaturas elevadas, baixa precipitação pluviométrica, e solos de baixa fertilidade, como o semi-árido do nordeste brasileiro, cujas condições de clima e solo são pouco favoráveis à exploração de outras culturas que ofereçam resultados econômicos satisfatórios. A cultura é muito importante para a economia nordestina, por demandar quantidade expressiva de mão-de-obra (~5pessoas/ha) e contribuir para a fixação do homem no campo (SANTOS, 2002).

As folhas do sisal fornecem fibras de grande resistência e buchas residuais que são empregadas na produção de barbantes, cordas, cordões e cabos marítimos, nas indústrias alimentícias, automotivas e farmacêuticas, para fins geotêxteis, artesanais, no endurecimento e na colocação de placas de gesso nas construções, na confecção de tapetes, tecidos, carpetes, papéis, mantas para estofados, adubos orgânicos e químicos, cosméticos, cera, álcool industrial, forragem animal e fios agrícolas (baler twines) utilizados para amarrar feno e cereais para o consumo animal, em países de inverno rigoroso, notadamente nos Estados Unidos e na Europa.

Segundo estimativa da FAO (Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação), em 2001 a produção mundial de fibras de sisal alcançou 237,6 mil toneladas, contra 222,6 mil toneladas em 2000, registrando um crescimento de 6,7% no

período. Na década de 90 a produção mundial de fibras de sisal declinou cerca de 30%, havendo atualmente a perspectiva de estabilização da produção na casa de 200 mil toneladas. Em termos de área plantada, dados estatísticos referentes ao ano de 1982 indicavam uma área plantada no Brasil de 340.000ha, enquanto que em 2001 a área cultivada foi de 144.000ha (CONAB, 2002).

O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de fibras e manufaturados de sisal, participando com 53% da produção e com 46% da exportação no ano de 2001. Além do Brasil, os principais países produtores são: China, 16,8%; Tanzânia, 9,3%; Quênia, 8,7%; Venezuela, 4,6% e Madagascar com 4,4%. A produção mundial dessa fibra no período de 1996 a 2001 é apresentada na Tabela 2.1.

TABELA 2.1 – Produção mundial e principais produtores de sisal (em 1.000t)

País	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Brasil	125,0	135,0	135,2	110,0	124,6	126,2
China	49,0	48,0	42,0	36,0	38,0	40,0
Tanzânia	24,5	21,4	23,2	20,6	20,5	22,1
Quênia	28,3	21,1	20,3	21,9	11,5	20,7
Venezuela	14,8	14,0	13,7	14,5	11,5	11,0
Madagascar	13,6	12,4	11,2	11,5	10,5	10,5
Produção mundial	268,3	263,8	256,6	223,3	222,6	237,6

Fonte: (CONAB, 2002)

Uma das razões para o declínio mundial da produção de sisal está relacionada com o aparecimento das fibras sintéticas no mercado. O polipropileno, por exemplo, pode ser utilizado na maioria das aplicações destinadas as fibras de sisal (SILVA, 1996).

Os fatores que explicam a decadência das principais áreas produtoras no Brasil são: o baixo preço de compra ao produtor (R\$0,42/kg para a fibra bruta longa e extra-longa); a baixa produtividade (média de 880kg/ha contra 2.000kg/ha dos países africanos); a ausência de uma política agrícola que garanta assistência técnica, crédito e apoio à comercialização; e o êxodo rural (BARROS et al., 1999; CONAB, 2002). O estado da

Paraíba, que já foi o maior produtor nacional em 1951, atualmente responde por apenas 3,1% da produção nacional; seguido pelo Rio Grande do Norte (1,7%); Ceará (0,2%) e Pernambuco (0,1%). A Bahia é o maior produtor com 94,9% do total produzido no ano de 2001 (CONAB, 2002).

Embora o sisal tenha pouca representatividade no valor total das exportações brasileiras e na renda agrícola do país, a sua cultura tem grande importância sócio-econômica para a região Nordeste. De acordo com LEAL et al. (1997), tal fato pode ser evidenciado pelos seguintes aspectos:

- possibilita a ocupação de uma extensa área de solos pobres da região semi-árida onde vivem algumas das comunidades rurais mais pobres do Brasil;
- gera atividade econômica em regiões marginais para lavouras de subsistência, as quais poderiam tornar-se não-aproveitadas ou sujeitas a erosão e a desertificação devido a movimentação periódica dos solos;
- é um importante agente de fixação do homem na região semi-árida nordestina, representando fonte de renda e emprego para um contingente de aproximadamente um milhão de pessoas. Infelizmente são empregos que geram renda familiar inferior a US\$50/mês e fazem uso de mão-de-obra infantil;
- trata-se de uma cultura ecologicamente correta, visto que inexistente uso de defensivos;
- constitui-se fonte geradora de renda e emprego, durante o período da entressafra das outras culturas;
- é uma fonte geradora de divisas para os estados produtores, uma vez que essa cultura faz parte da pauta de exportação;
- constitui-se atividade de apoio à pecuária nas fazendas do semi-árido, pela utilização da planta na alimentação (mucilagem) e aproveitamento das áreas exploradas com a cultura em consórcio com culturas de pastagem.

Existe, portanto, uma grande necessidade de se aumentar a área plantada e a produtividade dos campos de sisal. Acredita-se que a utilização da fibra na produção de produtos manufaturados de maior valor comercial tais como: carpetes, tecidos, revestimentos para paredes e geotêxteis, polpa e papel, fios de qualidade e na produção de materiais compósitos para uso na construção civil, possa vir a fomentar o agro-negócio do sisal no país.

2.2 Características das Fibras de Sisal

A fibra de sisal é composta de numerosas fibro-células alongadas fusiformes. As fibro-células são unidas umas às outras e são constituídas quimicamente de celulose (76%), hemicelulose (12%), lignina (10%) e pectina. Fisicamente, cada fibro-célula é constituída por três paredes e o lúmen. Cada parede da fibro-célula é formada de várias camadas de fibrilas. As fibrilas são compostas de micro-fibrilas que, por sua vez, são formadas por cadeias moleculares de celulose com espessura de 0,7 μm .

A celulose é um polímero vegetal de cadeias longas. O grau de polimerização da celulose é alto e apresenta boa resistência aos álcalis. A hemicelulose é um polímero de açúcares que apresenta baixo grau de polimerização, sendo solúvel em álcalis. A lignina é uma substância aromática e totalmente amorfa, podendo ser decomposta e lixiviada em ambientes alcalinos (GRAM, 1983; VELPARI et al., 1980). A Figura 2.1 apresenta a seção transversal de uma fibra de sisal, na qual podem ser vistos as fibro-células e seus lúmens.

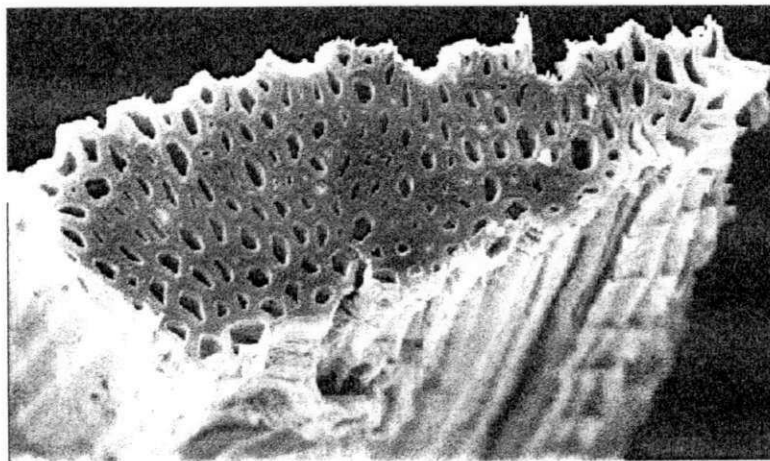


FIGURA 2.1- Seção transversal de uma fibra de sisal (TOLÊDO FILHO, 1999)

Na Tabela 2.2 são apresentados valores para as seguintes propriedades das fibras: diâmetro (ϕ_f), peso específico (γ), absorção de água (ABS), resistência à tração (f_t), módulo de elasticidade (MOE_f) e deformação de ruptura (ϵ_{fu}). Estas propriedades dependem da idade da planta, local do cultivo e condições climáticas, por isso os valores estão dentro de uma larga faixa.

TABELA 2.2 - Propriedades físicas e mecânicas de fibras de sisal

Referência	ϕ_f (mm)	γ (kN/m ³)	ABS (%)	f_t (MPa)	MOE _f (GPa)	ε_{fu} (%)
CEPED (1982)	nd	12,7	240	458	15,2	4,2
Mukherjee et al (1984)	0,1-0,3	14,5	Nd	530-630	17-22	4,3
Agopyan (1991)	0,2-0,3	12-13	123-137	374-378	nd	5-5,5
Tolêdo Filho (1990)	0,08-0,3	7,5-11	190-250	227-1002	11-27	2-4,2

nd - não determinado

Fonte: (TOLEDO FILHO, 1997a)

2.3 Aplicação de Fibras Vegetais no Reforço de Materiais à Base de Cimento Portland

Vários tipos de fibras têm sido utilizados como reforço de matrizes frágeis. E, apesar dos problemas existentes de sensibilidade de algumas dessas fibras à alta alcalinidade da matriz, bem como a baixa adesão à matriz de cimento e a instabilidade física e química, vários produtos têm sido fabricados com relativo sucesso.

Além das fibras manufaturadas (acetato de polivinila (PVA), poliéster, polipropileno, fibras de vidro), existe a alternativa de se utilizar reforços de origem vegetal, incluindo sisal, coco, juta, bambu e celulose, para reforço de matrizes de cimento em elementos de pequena espessura e baixo custo, a serem utilizados em habitações populares nos países em desenvolvimento. Particularmente no Brasil, a variedade e abundância das fibras vegetais existentes tornam atrativas para serem usadas como reforço de matrizes à base de cimento.

Segundo SWAMY(1990), a utilização de fibras vegetais como reforço em compósitos à base de cimento para a construção civil é de grande interesse para os países em desenvolvimento e seria capaz de contribuir para o crescimento de suas infra-estruturas.

Aqui no Brasil, as primeiras pesquisas nesta área foram desenvolvidas no estado da Bahia, em 1980, no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento (CEPED). As pesquisas realizadas pelo CEPED são consideradas, internacionalmente, como uma das mais amplas e consistentes no seu âmbito, contemplando o desenvolvimento de argamassas reforçadas com fibras de coco, piaçava e sisal. Foram realizados vários experimentos relacionados à influência do teor e comprimento das fibras e aos processos de moldagem; e desenvolvidos e avaliados elementos construtivos pré-fabricados, como telhas, calhas, pias de cozinha,

pequenas caixas d'água, moldados através de processos de produção simples e com matrizes de cimento Portland. Com exceção da telha, todos os produtos foram considerados viáveis técnica e economicamente (SAVASTANO JR, 2000).

Na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) foram desenvolvidos vários trabalhos de pesquisa na área de compósitos fibrosos (mestrado e doutorado). No Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), foram investigados compósitos de pasta de cimento e gesso reforçados com jornal desintegrado, pasta de gesso reforçada com sisal, e argamassas de cimentos especiais reforçadas com fibra de coco. Na Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), foram desenvolvidos compósitos à base de cimento com teores elevados (>20% da massa de aglomerante) de resíduos de madeira, de bambu e bagaço de cana-de-açúcar, para uso em construções rurais (BERALDO, 1997). Na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC), a viabilidade da produção de compósitos reforçados com fibra de sisal e coco foi determinada (TOLEDO FILHO, 1997a). Na Universidade Federal de Campina Grande - UFCG (anteriormente Universidade Federal da Paraíba), também têm sido desenvolvidas várias pesquisas utilizando fibras de vegetais e matrizes frágeis (FARIAS FILHO, 1999; PADILHA, 1999).

2.4 Desempenho Mecânico dos Compósitos Cimentícios Fibrosos

A utilização de fibras como reforço depende basicamente das propriedades da matriz. No caso das matrizes frágeis (pasta de cimento, argamassa ou concreto), objeto desta pesquisa, a maior contribuição da fibra acontece após a fissuração, quando elas formam verdadeiras pontes de ligação entre as regiões fissuradas da matriz. Nesse momento, a carga é transferida para as fibras, que passam a governar o comportamento do compósito em função das suas características, tais como módulo de elasticidade, comprimento, orientação, volume, etc.

Quando a fibra possui módulo de elasticidade e resistência mecânica maiores que os da matriz, por exemplo: fibras de aço, carbono ou vidro, a tensão na qual a matriz fatura pode até ser ligeiramente aumentada. Para compósitos reforçados com fibras de baixo módulo de elasticidade, como as fibras vegetais, a principal função da fibra é incrementar a tenacidade da matriz pela criação de mecanismos de absorção de energia, relacionados ao

efeito de escorregamento e arrancamento das fibras, resultando em um material com maior tenacidade e resistência ao impacto. Quando submetidos a esforços de flexão, presentes na maioria das aplicações de engenharia, os materiais compósitos fibrosos podem absorver mais energia e conseqüentemente apresentam maior ductilidade, tenacidade e resistência ao impacto que a matriz de cimento.

A adição de fibras de sisal à argamassa pode reduzir sua resistência à compressão em cerca de 10% a 30% dependendo do tipo, comprimento e fração volumétrica da fibra, bem como do tipo e traço da matriz. Por outro lado, as fibras confinam o material e retardam a propagação da primeira fissura, aumentando a tenacidade pós-carga de pico. O módulo de elasticidade da matriz é ligeiramente reduzido (TOLÊDO FILHO e GHAVAMI, 1996; TOLÊDO FILHO, 1997b).

2.5 Degradação das Fibras Naturais em Meios Alcalinos

As fibras vegetais podem sofrer vários graus de degradação quando expostas a um ambiente alcalino. A intensidade do ataque, determinada pela mudança das características da fibra, depende do tipo de fibra e da solução alcalina.

Nos estudos reportados até o momento, o cimento Portland tem sido o aglomerante mais empregado na produção de matrizes para a construção civil. Inúmeras pesquisas têm avaliado compósitos produzidos pela sua mistura com fibras vegetais, apesar da alta alcalinidade apresentada pelos seus produtos hidratados ($\text{pH} > 13$). O principal responsável pela alta alcalinidade é a *Portlandita* ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), liberada em grande quantidade na hidratação do cimento Portland. Contribui, ainda, a presença de álcalis solúveis como os óxidos de potássio (K_2O) e de sódio (Na_2O).

Segundo GRAM (1983), a causa básica da mudança das características da fibra de sisal nas matrizes cimentícias está associada com a decomposição química da lignina e da hemicelulose pela água alcalina presente nos poros da matriz, quebrando assim as ligações entre as fibro-células; o que levaria a uma perda de eficiência do reforço.

Segundo TOLÊDO FILHO (1997a), a perda da durabilidade, ou seja, a fragilização do compósito, está caracterizada pela mineralização das fibras, devido à migração de produtos da hidratação, principalmente o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), para as paredes das fibro-células e para o lúmen, e conseqüentemente a fibra perde a flexibilidade.

Segundo SAVASTANO JR (2000), além do ataque alcalino existe a incompatibilidade física, ou seja: as fibras vegetais apresentam variações dimensionais maiores que as das matrizes de cimento, em razão de mudanças no teor de umidade. E, durante o envelhecimento de um compósito ocorrem, simultaneamente, fenômenos de degradação da fibra e da ligação fibra-matriz, e estes vão reduzindo a ductilidade do material, paralelamente aos fenômenos de hidratação da matriz. Ainda, segundo esse autor, a principal fonte de degradação de vegetais no ambiente natural, o ataque biológico através de fungos xilófagos, não representa maiores preocupações, porque as matrizes empregadas apresentam pH alcalino capaz de inibir sua ação.

GRAM (1983) avaliou a degradação das fibras imersas em soluções por vários dias, com valores de pH variando de 8 a 13. Os resultados dos ensaios executados após 180 dias de imersão em solução de hidróxido de cálcio de $\text{pH}=12,6$ indicaram que as fibras retiveram apenas cerca de 20% da resistência original. Quando imersas em solução de hidróxido de sódio de $\text{pH}=12,6$ por 180 dias, apresentaram uma redução de cerca de 15% na sua resistência.

SINGH (1985) também observou que o ataque alcalino sofrido pelas fibras vegetais é mais intenso em uma solução de hidróxido de cálcio do que em uma solução de hidróxido de sódio. Ele sugeriu que esse fato pode estar associado com a cristalização da cal nos poros e vazios das fibras.

SHIMIZU e JORILLO (1992) estudaram a decomposição das fibras de coco através da microscopia eletrônica de varredura. Segundo esses autores, as fibras condicionadas em água saturada de cimento tornam-se marrom escuro em razão da reação entre os hidróxidos do cimento e a lignina nas fibras. Os autores sugeriram que isso pode ocorrer em decorrência de uma decomposição dos componentes (provavelmente hidrólise da pectina pelas enzimas). As fibras que permaneceram um ano na argamassa imersa em água

mostraram evidências de depósitos de hidróxido de cálcio na superfície. Os autores sugeriram que esse depósito poderia gradualmente aumentar a respectiva espessura preenchendo o lúmen e os poros da fibra, podendo causar a sua fragilidade.

BERHANE (1987; 1994) analisou a durabilidade de telhas de argamassas reforçadas com fibras de sisal e observou que a vida útil das telhas à base de cimento Portland reforçadas com fibras de sisal é muito curta, especialmente em clima quente e úmido. Ele observou também que os materiais pozolânicos têm efeito protetor às fibras de sisal em ambiente alcalino, como é o caso do compósito à base de cimento Portland.

A partir dos estudos reportados, observa-se que uma das maiores preocupações com relação ao uso de fibras naturais como reforço de sistemas à base de cimento Portland está relacionada com a durabilidade dos compósitos que podem perder resistência e tenacidade com o tempo.

2.6 Métodos Usados para Redução da Degradação das Fibras e dos Compósitos

Existem vários métodos que podem ser usados para redução da degradação das fibras nos compósitos à base de cimento Portland, dentre estes podem ser citados:

- a) impregnação das fibras com agentes repelentes de água e/ou com agentes bloqueadores da reação alcalina;
- b) selagem dos poros da matriz;
- c) modificação da matriz;
- d) combinação dos métodos acima.

Os métodos de impregnação e selagem dos poros da matriz são mais onerosos e podem chegar a inviabilizar o uso das fibras naturais. Já o método de modificação da matriz além de contribuir para a durabilidade do compósito, também pode reduzir o seu custo final. Esta modificação pode ser feita através da: (1) carbonatação acelerada do compósito - TOLÊDO FILHO (1997a); (2) substituição parcial do cimento Portland comum por pozolanas - GRAM (1983); FARIAS FILHO (1999); (3) substituição do cimento Portland comum por cimentos alternativos - SAVASTANO JR (2000). Na presente pesquisa foi

utilizado o método de modificação da matriz através da substituição parcial do cimento Portland por um material pozolânico.

2.6.1 A substituição parcial do cimento Portland por pozolanas

Na intenção de construir obras mais duráveis e resistentes, os gregos utilizavam um tufo vulcânico, encontrado na Ilha de Thera, enquanto os romanos se valiam de outros materiais também de origem piroclástica, encontrados nas vizinhanças da Bacia de Nápoles. Como os materiais de melhor qualidade eram obtidos ao redor do monte "Pozzuoli", nas proximidades do Vesúvio, esses materiais receberam a designação de pozolanas. Quando não dispunham de materiais vulcânicos, os romanos empregavam telhas cerâmicas moídas, que segundo registros históricos da época, produziam efeito similar (ZAMPIERI, 1989).

O termo pozolana pode ser usado para todos os materiais silicosos ou silico-aluminosos que não possuem propriedades aglomerantes e que, quando finamente moídos e na presença de umidade, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio (reação pozolânica) formando compostos com propriedades cimentícias.

A importância do hidróxido de cálcio na reação pozolânica está no seu papel de ativador dessa reação. Na matriz endurecida de cimento Portland, o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) é um dos produtos formados na hidratação dos silicatos de cálcio e, quando está dissolvido na água dos poros, confere elevada alcalinidade ao meio, elevando o pH a valores da ordem de 12 a 13.

A capacidade que as pozolanas têm de reagir com hidróxido de cálcio à temperatura ambiente e em misturas com cal e água, é chamada de atividade pozolânica, a qual depende da percentagem de sílica (SiO_2) e de alumina (Al_2O_3), sendo desejável que elas tenham no mínimo 40% de SiO_2 e até 30% de Al_2O_3 , e percentuais mínimos de óxido de cálcio (CaO) e de magnésio (MgO). Quanto mais reativa for a pozolana maior será o consumo de hidróxido de cálcio, portanto, maior será sua atividade pozolânica. A atividade pozolânica pode ser determinada de várias maneiras, sendo satisfatória a avaliação da resistência mecânica, uma vez que a análise química não é suficiente para tal fim, embora seja útil no controle qualitativo das pozolanas.

As propriedades de uma pozolana variam em função de sua origem, mineralogia e características físicas. A forma, finura, distribuição do diâmetro das partículas, densidade e composição da pozolana, influenciam as propriedades de uma matriz cimentícia no estado fresco e no desenvolvimento da resistência. A pozolana deve apresentar uma instabilidade ou alteração na sua estrutura cristalina. A sílica e a alumina são reativas quando suas ligações estruturais são fracas ou destruídas por calcinação tornando-as amorfas.

A pozolana utilizada na substituição parcial deve apresentar uma área específica igual ou superior à do cimento Portland. Segundo ZAMPIERI (1989), seria desejável uma área específica com valores próximos a $750\text{m}^2/\text{kg}$, para que a atividade pozolânica fosse alta. Entretanto, isto implica em equipamentos mais sofisticados e maior custo de energia.

Entre os materiais naturais que podem ser utilizados incluem-se: as cinzas vulcânicas, terras diatomáceas e as argilas calcinadas. A metacaulinita obtida pela calcinação, entre 650°C e 850°C , de uma argila caulinitica (caulim), quando moída até a finura de $700\text{m}^2/\text{kg}$, resulta num material de grande pozolanicidade (ZAMPIERI, 1989). Alguns subprodutos industriais, quando finamente moídos, têm grande potencialidade, dentre eles: escória de alto forno, microsilica, resíduos cerâmicos e cinza da casca de arroz.

A importância desta substituição para os compósitos fibrosos deriva principalmente de dois aspectos da reação pozolânica:

- 1) a reação consome hidróxido de cálcio, reduzindo a mineralização e o ataque alcalino, contribuindo significativamente para a durabilidade da fibra vegetal e do compósito;
- 2) os produtos da reação são bastante eficientes no preenchimento dos espaços capilares maiores, reduzindo o tamanho dos poros dos cimentos pozolânicos hidratados e melhorando assim a interface fibra-matriz e a impermeabilidade do sistema.

Ainda podem ser citadas duas contribuições na utilização de pozolanas em substituição ao cimento Portland. A primeira é o impacto no custo final do compósito. Através do uso de materiais pozolânicos pode-se prever uma maior economia, pois esses materiais permitem uma redução no consumo final de energia, sendo mais barato que o clínquer de cimento Portland. A outra diz respeito ao benefício ao meio-ambiente, pois o uso de pozolanas reduz significativamente a emissão de gases na atmosfera, e recicla resíduos geralmente

depositados a céu aberto, como nos casos dos resíduos cerâmicos, escória de alto forno, cinza da casca de arroz, e outros.

2.7 O Aproveitamento de Resíduos Industriais nas Matrizes Cimentícias

O resíduo industrial é de responsabilidade do seu gerador e este deve exercer um processo de gestão do resíduo de forma eficaz, garantindo o cumprimento das normas legais e técnicas existentes. Segundo PEDRO (2002), os projetos arquitetônicos das indústrias devem ser elaborados de forma que dêem condições técnicas para que os resíduos sejam tratados e depositados no local onde foram gerados. Como geralmente isto não ocorre, surge a necessidade de depositar os resíduos em locais externos às fábricas e quase sempre distantes da origem. Esta solução faz surgir o arriscado e dispendioso transporte, no qual, o transportador e o destinatário final são co-responsáveis no processo de administração dos rejeitos.

Quando o resíduo passa por algum processo de descaracterização, como no caso da incineração, da reciclagem e do reuso, isto tira a responsabilidade do gerador original perante esse novo produto logo após completado o processo. Neste caso, o adquirente é o novo responsável, salvo os casos em que o resíduo, objeto de reciclagem ou reuso, esteja contaminado de origem, quando a responsabilidade permanece sendo do gerador.

O surgimento de novas leis ambientais, aplicando severas multas, e o aumento da fiscalização pelos órgãos competentes, têm forçosamente aumentado o número dos adeptos do “ecologicamente correto” (GARLET, 1998).

Além da obrigação de cumprir as leis, percebe-se uma maior preocupação com uma gestão ambiental mais eficaz e a implementação de programas de qualidade, que assumem um papel diferenciador no mercado, pois as empresas tidas como “limpas” ou “ecologicamente corretas” são preferidas pelo consumidor. Ou seja, o próprio mercado está enfatizando a idéia da redução, reciclagem e reutilização (3R) de resíduos em contraposição à simples otimização dos sistemas de descarte, que apenas protelam a solução do problema de agressão ambiental.

JOHN (2000) aponta como principal benefício da reciclagem a contribuição à preservação dos recursos naturais, pois ao se utilizar resíduos no processo industrial, evitam-se maiores destruições ao meio ambiente, como os causados pela extração de matéria-prima. Segundo esse autor, a construção civil é responsável por grande parte do consumo dos recursos naturais extraídos.

No Brasil, o consumo anual de agregados naturais destinados à produção de concreto e argamassas é de 220 milhões de toneladas. Em volta das grandes cidades, as jazidas de agregados naturais começam a desaparecer, inclusive graças ao crescente controle ambiental sobre a extração das matérias-primas. Esta realidade tem forçado o setor da construção civil a diminuir o consumo de produtos naturais, diminuir a quantidade de entulho e tratar corretamente seus resíduos (JOHN, 2000).

Entretanto, ÂNGULO et al. (2001) consideram ainda pouco expressiva a reciclagem de resíduos no Brasil para utilização como materiais de construção, quando comparado aos países desenvolvidos. Abrindo duas exceções para os casos das indústrias de cimento e de aço no Brasil.

Portanto, a construção civil tem grande potencial para absorver resíduos das indústrias, justificado pela necessidade de reduzir os custos de produção e pela variedade de matéria-prima dos diferentes produtos aplicados na construção civil, e o que antes era um problema pode tornar-se uma solução: o resíduo de um setor servindo como matéria-prima a ser aplicada em outro.

2.7.1 Resíduos da indústria cerâmica

No estado da Paraíba a produção industrial de cerâmica vermelha está em crescimento. E, em virtude de falhas no processo de produção e manuseio, a quantidade de rejeitos também é crescente e considerável. Estes rejeitos são constituídos de restos de blocos e telhas quebrados durante e após a queima, quando transportados ou manuseados dentro da própria indústria, ou de peças defeituosas impossibilitadas de serem comercializadas. Na cidade de Santa Rita-PB, por exemplo, a geração de resíduos na produção de blocos

cerâmicos de quatro das principais indústrias consultadas gira em torno de 120t/mês, sendo estimada em 2%, segundo os responsáveis pela produção.

Em geral, os resíduos cerâmicos são considerados como entulho e lançados a céu aberto, causando danos ao meio ambiente, ou utilizados como aterro, desperdiçando o grande potencial pozolânico desse resíduo (Figura 2.2). Entretanto, esses resíduos apresentam grande quantidade de sílica e alumina na forma não cristalina, possibilitando o seu aproveitamento como material pozolânico, dependendo das suas características físico-químicas e do grau de moagem empregado. No presente estudo foram utilizados resíduos de blocos cerâmicos calcinados, provenientes de uma indústria cerâmica do estado da Paraíba, sendo finamente moídos em laboratório.



FIGURA 2.2 – Resíduos de blocos cerâmicos lançados no meio-ambiente (Santa Rita-PB)

2.7.2 Resíduos da indústria de calçados

A indústria de calçados é caracterizada pela constante busca de novos materiais para fabricação de seus produtos. Dentre esses novos materiais destaca-se o copolímero EVA (etileno acetato de vinila), cuja obtenção ocorreu pela primeira vez em 1938, e só na década de 70 foi utilizado na produção de sandálias de praia. Atualmente, o EVA é uma das mais importantes matérias-primas na indústria de calçados, sendo aplicado na produção de chapas, reticuladas e expandidas, usadas para confecção de palmilhas, solados,

entressolas e enchimento, os quais são componentes utilizados na fabricação dos mais diversos tipos de calçados, tais como: tênis, sandálias, sapatos, etc.

Os resíduos de EVA são gerados durante os processos de fabricação das placas de borracha expandidas e dos calçados. Esses resíduos são em forma de aparas, resultantes do corte das peças, e em forma de pó. Os resíduos em pó surgem durante o acabamento das peças e são os mais facilmente aproveitados pelas indústrias, podendo servir como cargas de volta ao processo de fabricação das placas (GARLET, 1998). Já para os demais tipos de resíduos, o processo de reciclagem é lento e existe a limitação quanto à quantidade de resíduo que se pode incorporar ao processo, sem comprometer a qualidade do produto. Portanto, o volume de resíduo reaproveitado na própria indústria é bem menor que o volume por ela gerado, não mais que 40% (BEZERRA, 2002).

O crescente volume desses resíduos tem-se tornado um grande problema para as indústrias na hora de dar-lhes um destino final. A deposição em aterros sanitários de resíduos sintéticos representa sérias implicações, devido à baixa velocidade de degradação e a possibilidade de provocar severas contaminações ao meio ambiente. A incineração também não é recomendada devido à geração de gases tóxicos. A estocagem em galpões é possível (Figura 2.3), porém o grande volume de resíduo produzido exige uma grande capacidade de armazenamento, onerando os custos fixos da indústria.



FIGURA 2.3 – Resíduos de EVA estocados em galpão (BEZERRA, 2002)

Em uma grande indústria de sandálias instalada no estado da Paraíba, por exemplo, a produção média estimada de resíduo EVA é de 200t/mês. Considerando o alto volume gerado em virtude da sua baixa massa unitária ($\sim 1000\text{m}^3/\text{mês}$) e que o mesmo não é biodegradável, encontrar um local para se armazenar tal resíduo sem causar danos ao meio ambiente torna-se um desafio (BEZERRA, 2002).

Segundo COLLEPARDI (1999), as indústrias cimenteiras aproveitam o potencial energético deste e de outros resíduos, também ricos em enxofre, para alimentar seus fornos rotativos na fabricação do clínquer. Isto tem aumentado o teor de sulfatos na produção do clínquer dos cimentos Portland. A deterioração dos concretos estruturais tem crescido nos últimos tempos e uma das causas é a formação retardada de produtos expansivos (etringita secundária) no concreto endurecido, que está diretamente relacionada a esse aumento do teor de sulfatos nos aglomerantes e na microestrutura dos concretos de cimento Portland.

O aproveitamento de resíduos de EVA no setor da construção civil tem despertado grande interesse. Os compósitos leves obtidos a partir de agregados de EVA podem servir nas seguintes aplicações: enchimento para lajes rebaixadas, isolamento acústico entre pavimentos, isolamento térmico nas lajes de forro, elementos pré-fabricados, etc. Isto evidencia a grande potencialidade para uso desse resíduo em diversos componentes e sistemas na construção civil, sem função estrutural. Segundo GARLET (1998), em ensaio de combustibilidade de agregados de EVA, não houve propagação da chama e, nos ensaios de suscetibilidade ao ataque por fungos, as amostras de agregado de EVA foram resistentes à colonização por fungos, não sendo necessário tratamento fungicida para a sua utilização.

As questões ambientais levantadas e os poucos trabalhos sobre reciclagem de resíduos da indústria de calçados na construção civil, estimulam o surgimento de novos estudos que avaliem as possibilidades técnicas de produzir elementos construtivos com aproveitamento desses resíduos. Esta pesquisa utiliza resíduos de EVA da indústria de calçados, reciclando-os como agregado leve na confecção de compósitos leves com e sem fibras de sisal, bem como a sua utilização em conjunto com o resíduo moído de blocos cerâmicos substituindo parcialmente o cimento Portland.

CAPÍTULO 3

PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS ESTRUTURAIS COM RESÍDUO CERÂMICO E FIBRAS DE SISAL

3.1 Generalidades

O presente capítulo apresenta o desenvolvimento de compósitos fibrosos estruturais com matriz de cimento Portland, para serem utilizados na construção civil na produção de chapas planas, telhas, painéis divisórios e outros elementos construtivos.

Pretende-se desenvolver compósitos fibrosos que tenham bom desempenho mecânico e boa durabilidade, que apresentem baixo consumo energético e baixo custo. Os objetivos deste capítulo são: 1) analisar a influência da adição de fibras de sisal ao compósito; 2) verificar o efeito do resíduo moído de blocos cerâmicos como material pozolânico em substituição parcial do cimento Portland nas propriedades dos compósitos; 3) verificar a influência da utilização de prensagem na moldagem dos compósitos; e 4) estudar o efeito dos tratamentos propostos na durabilidade dos compósitos.

Os seguintes estudos foram desenvolvidos: (i) o resíduo moído de blocos cerâmicos como material pozolânico: caracterização físico-química e atividade pozolânica; (ii) composição da matriz e teor de hidróxido de cálcio livre; (iii) definição das misturas e técnicas de moldagem; e (iv) análise da durabilidade dos compósitos sob diferentes condições de exposição, através das análises físico-mecânicas.

3.2 Materiais Utilizados

3.2.1 Fibras de sisal

Utilizou-se a fibra de sisal produzida no município de Pocinhos, PB. No preparo dos compósitos usou-se um teor de fibras igual a 2% em relação ao volume do compósito, cerca de 3,6% da massa do aglomerante presente na mistura. As fibras de sisal foram cortadas através de uma guilhotina manual em comprimentos variando entre 25-30mm, seguindo recomendações de TOLÊDO FILHO (1997a). As propriedades físicas e mecânicas de fibras de sisal produzidas no município de Pocinhos-PB estão apresentadas na Tabela 2.2 do Capítulo 2.

3.2.2 Aglomerante

Para produção dos compósitos, utilizou-se cimento Portland tipo CII-Z-32, por ser o aglomerante disponível no mercado à época do início do experimento, em função da crise de energia elétrica. Este cimento já contém 12,5% de material pozolânico incorporado na sua composição, segundo dados do fabricante, que também forneceu a sua análise físico-química. O cimento foi adquirido acondicionado em sacos de papel do tipo “Kraft” de 50kg. Para evitar a hidratação prematura, o cimento foi acondicionado em sacos plásticos, sendo lacrados e armazenados em estantes de madeira.

3.2.3 Agregado miúdo

Foi utilizada uma areia originária do leito do rio Paraíba. A granulometria da areia foi determinada segundo a NBR 7217/87 e classificada de acordo com a norma NBR 7211/83, que classifica os agregados para uso em concreto. A massa unitária em estado solto foi determinada de acordo com a NBR 7251/82.

Antes do ensaio de granulometria, objetivando conseguir uma maior compactidade da matriz e visando a produção de compósitos de pequena espessura (<2,0cm) com um bom acabamento superficial, a areia escolhida foi passada na peneira de 2mm de abertura para retirada de pedregulhos, impurezas e da sua fração grossa.

3.2.4 Resíduo cerâmico

Foram utilizados resíduos provenientes da Cerâmica Caiongo Ltda., localizada no município de Santa Rita, PB. Esses resíduos foram gerados na produção de blocos cerâmicos, provenientes de peças defeituosas, quebradas ou fora dos padrões comerciais (coloração, riscos, textura, etc.). Os resíduos foram coletados e trazidos ao laboratório, sendo esmiuçados em um moinho de bola até que 100% do material moído passasse na peneira ABNT nº100 (abertura de malha, #0,15mm), Figuras 3.1 e 3.2.



FIGURA 3.1 – Resíduos de blocos cerâmicos antes da moagem



FIGURA 3.2 – Resíduos de blocos cerâmicos após moagem

O material que passou na peneira ABNT nº200 (#0,075mm) foi escolhido e uma amostra foi enviada para o Laboratório da Companhia Paraibana de Cimento Portland – CIMEPAR, na cidade de João Pessoa, PB, que realizou a sua análise físico-química.

3.2.4.1 Determinação da atividade pozolânica do resíduo cerâmico

A atividade pozolânica do resíduo cerâmico foi determinada conforme a NBR 5752/92, a partir da relação entre a resistência à compressão simples, aos 28 dias, de uma argamassa produzida no traço 1:3, em massa, de cimento Portland comum (sem adições) e areia normal, com 35% de substituição do cimento pelo material em análise e a resistência à compressão simples de uma argamassa produzida sem substituição do cimento, chamada de referência. O percentual encontrado é chamado de Índice de Atividade Pozolânica. Segundo a NBR 12653/92, esse índice deve ser maior ou igual a 75% para que o material seja considerado pozolânico. Para sua determinação, foram moldados seis corpos-de-prova para cada mistura (cilindros com 5cm de diâmetro e 10cm de altura).

3.3 Desenvolvimento dos Compósitos Estruturais

3.3.1 Desenvolvimento de uma matriz de baixa alcalinidade

Buscou-se o desenvolvimento de uma matriz de baixa alcalinidade, substituindo-se parcialmente o cimento Portland, tipo CII-Z-32, pelo resíduo moído de blocos cerâmicos. Os percentuais de substituição adotados foram: 0% (referência), 20%, 30%, e 40%, em peso. Para se determinar o teor do hidróxido de cálcio presente nas matrizes, foram realizadas análises térmicas diferencial (ATD) e gravimétrica (ATG) de pastas das misturas adotadas, após 28 dias de cura em água, evitando a carbonatação das misturas, o que influenciaria os resultados.

Foram preparados pequenos cilindros de 4cm de diâmetro e 4cm de altura que, após a cura, foram pulverizados num cadinho de porcelana até que 100% do material passasse na peneira ABNT nº200 (#0,074mm), finura adequada para realização do ensaio. Após a trituração, as amostras foram acondicionadas em recipientes apropriados, sendo lacrados e conduzidos ao Laboratório de Engenharia de Materiais da UFCG, para realização das

análises térmicas. Foi utilizado um aparelho da marca BP Engenharia, tipo RB3000, operando a uma taxa de aquecimento de 10,0°C/min até a temperatura máxima de 900°C.

3.3.2 Planejamento experimental

Foram estudados os efeitos das variáveis: tensão de prensagem, teor de substituição e teor de fibra, sobre o comportamento dos compósitos estruturais. Optou-se pelo planejamento fatorial de experimentos que possibilita uma abordagem eficiente e estruturada para estudar como as propriedades de um material são influenciadas por um grande número de variáveis.

Através do planejamento fatorial é possível determinar se os principais fatores (variáveis) que afetam as propriedades em estudo foram levados em consideração; qual dos fatores tem efeito significativo nessas propriedades e se existe interação entre os fatores. Deve-se estabelecer para cada variável um número de níveis a ser investigado. O propósito não é testar os extremos de um processo, mas testar uma área racional de interesse prático no espaço dos fatores. Caso uma variável seja significativa e os resultados obtidos mostrem que é aconselhável uma avaliação em outros níveis, então novos experimentos podem ser realizados para explorá-los.

Nesta pesquisa foi usado um planejamento de três fatores. Os fatores estudados foram: tensão de prensagem na moldagem (X1); teor de substituição (em massa) do cimento Portland por resíduo moído de blocos cerâmicos (X2), e teor de fibra (X3). Um desenho fatorial é mostrado na Figura 3.3 onde os níveis selecionados para cada fator são apresentados nos eixos da figura. A Tabela 3.1 resume todas as misturas produzidas.

Todas as misturas para desenvolvimento dos compósitos estruturais foram elaboradas no traço 1:1,5 (aglomerante:areia) em peso e fator água/cimento 0,45. Esse tem sido o traço mais utilizado nas recentes pesquisas em compósitos cimentícios com fibras naturais, conforme bibliografia citada no Capítulo 2.

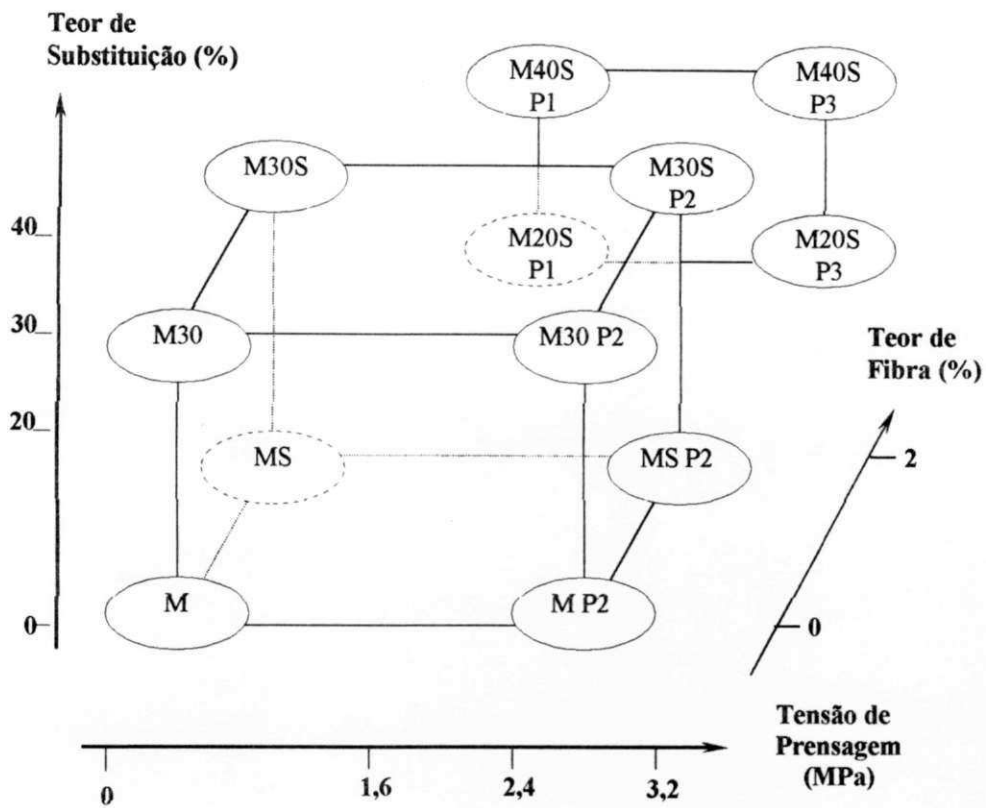


FIGURA 3.3 - Desenho mostrando os níveis estabelecidos para as variáveis nos compósitos de cimento Portland

TABELA 3.1 – Programa experimental e nomenclatura das misturas produzidas

Mistura	Tensão de prensagem (MPa)	Teor de substituição do cimento (%)	Teor de fibra de sisal (%)
M	0	0	0
MS	0	0	2
M30	0	30	0
M30S	0	30	2
M P2	2,4	0	0
MS P2	2,4	0	2
M30 P2	2,4	30	0
M30S P2	2,4	30	2
M20S P1	1,6	20	2
M20S P3	3,2	20	2
M40S P1	1,6	40	2
M40S P3	3,2	40	2

As misturas foram preparadas manualmente, na seguinte ordem de colocação dos componentes no recipiente de preparo:

1. colocou-se toda areia;
2. adicionou-se o “aglomerante” e as fibras, misturando a massa uniformemente;
3. adicionou-se a água, misturando-os até obter homogeneidade da mistura.

Foram produzidas duas placas para cada mistura, com dimensões 250mm x 250mm e espessura de 14mm. A massa era lançada no molde metálico e vibrada por trinta segundos em mesa vibratória, sendo prensada ou não, conforme a mistura (Figura 3.4). Após a moldagem, as placas só vibradas eram cobertas com plástico e deixadas em repouso durante 24h, para então serem tiradas das formas. As placas a serem prensadas eram levadas à prensa ainda no molde, e após submetida a prensagem, eram imediatamente desmoldadas e cobertas com plástico, sendo colocadas em repouso durante 24h. Em seguida, todas as placas eram colocadas em ambiente de laboratório para cura ao ar até o dia dos ensaios.



FIGURA 3.4 – Prensa e molde metálico usados para produção dos compósitos estruturais

3.4. Caracterização dos Compósitos Estruturais

3.4.1 Caracterização física

As propriedades físicas avaliadas conforme recomendação da NBR 9778/87 foram: massa específica, absorção de água e porosidade. Elas auxiliaram na avaliação da influência das variáveis envolvidas.

As amostras foram retiradas dos corpos-de-prova ensaiados à flexão de acordo com cada mistura. As amostras foram pesadas em uma balança digital com sensibilidade de 0,01g e com um dispositivo hidrostático. Foram obtidas as massas seca, imersa e saturada com superfície seca. As propriedades físicas foram determinadas através de relações entre as massas obtidas, conforme as equações apresentadas na Tabela 3.2.

TABELA 3.2 - Equações utilizadas para o cálculo das propriedades físicas

Propriedade	Unidade	Equação
Massa específica	kg/dm ³	$M_s / (M_{sat} - M_i)$
Absorção	(%)	$\{(M_{sat} - M_s) / M_s\} * 100$
Porosidade	(%)	$\{(M_{sat} - M_s) / (M_{sat} - M_i)\} * 100$

Onde: M_s = Massa seca em estufa a 105°C durante 24h;

M_{sat} = Massa saturada com superfície seca, após 24h de imersão em água;

M_i = Massa imersa em água, após 24h de imersão.

3.4.2 Caracterização mecânica

Para caracterização mecânica dos compósitos foram realizados ensaios de flexão em três pontos, com vão inferior a 100mm, utilizando-se corpos-de-prova prismáticos de 120x40x14(mm) recortados das placas moldadas, com três repetições por série. A Figura 3.5 apresenta o desenho esquemático do ensaio de flexão.

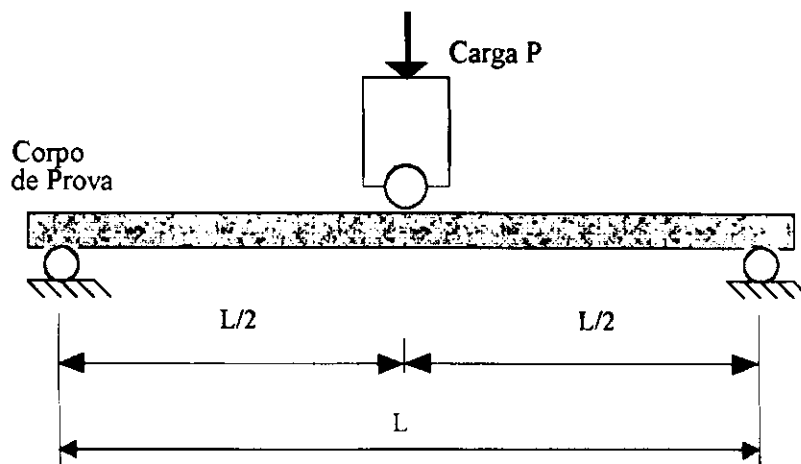


FIGURA 3.5 - Esquema do ensaio de flexão em três pontos

As propriedades mecânicas determinadas foram: módulo de ruptura à flexão (MOR), módulo de elasticidade (MOE) e a tenacidade à flexão. Para determinação do MOR e do MOE foram utilizadas as seguintes fórmulas:

$$MOR = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3.1)$$

$$MOE = \frac{mL^3}{4bd^3} \quad (3.2)$$

onde:

P – carga máxima aplicada;

L – comprimento do vão inferior entre apoios;

b e d – largura e espessura do corpo-de-prova na região de aplicação da carga;

m – inclinação da curva carga-deflexão na região elástica.

A largura e espessura de cada corpo de prova foram medidas em três pontos com um paquímetro digital, com sensibilidade de 0,01mm. A média aritmética dessas três medidas foi utilizada na determinação das dimensões de cada corpo-de-prova.

Para determinação da tenacidade à flexão foi seguida a recomendação de SWAMY (1990). Segundo esse autor, a tenacidade à flexão pode ser definida como a área sob a curva carga-deflexão no ensaio de flexão, calculada até quando a carga aplicada for reduzida a 25% da carga máxima atingida; esta área representaria a energia absorvida na flexão. Entretanto,

nesta pesquisa, em virtude de pequenas variações existentes nas dimensões dos corpos de prova, a energia absorvida na flexão até o momento da redução da carga foi dividida pela área da seção transversal do corpo de prova. Ao resultado obtido chamou-se de energia específica (EE). Esse mesmo critério também foi adotado por SAVASTANO Jr. (2000) e SILVA (2002).

O equipamento utilizado para o ensaio de flexão em três pontos foi uma máquina universal de ensaios da marca LLOYD Instruments, modelo LR10K, com os acessórios para ensaio de três pontos, com velocidade de carregamento igual a 0,5mm/min. O monitoramento do ensaio foi realizado pelo programa computacional Nexygen, versão 2.0/98 (Figuras 3.6 e 3.7). A célula de carga empregada foi de 10kN.

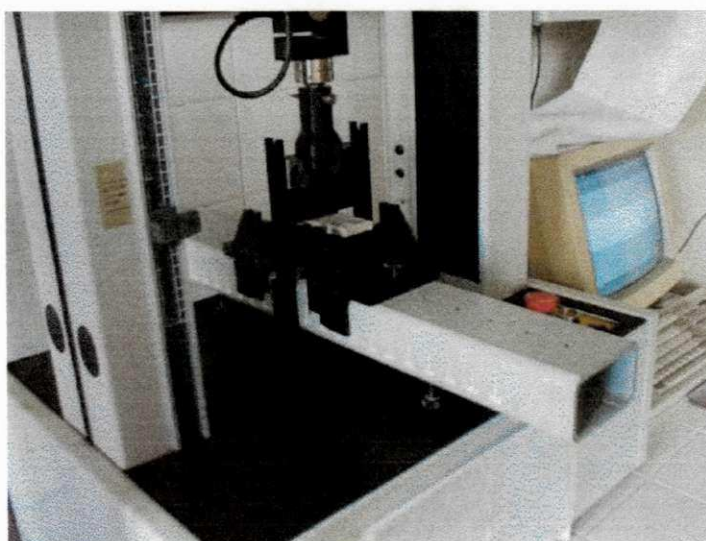


FIGURA 3.6 – Máquina utilizada para o ensaio de flexão em três pontos



FIGURA 3.7 – Detalhe dos apoios e do corpo-de-prova antes do ensaio de flexão

3.5 Estudo da Durabilidade dos Compósitos

No estudo da durabilidade, foram determinadas as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos descritas no item anterior. A avaliação dessas propriedades foi feita após 30, 90 e 210 dias de cura. Após 30 dias de cura em laboratório, foram ensaiados três corpos-de-prova retirados (cortados) das placas produzidas para cada mistura. Em seguida, as placas foram expostas a duas situações de exposição: metade continuou mantida em ambiente interno de laboratório e a outra metade foi submetida ao intemperismo natural até a data dos ensaios de 90 e 210 dias, respectivamente.

3.5.1 Envelhecimento sob intemperismo natural

As placas destinadas ao envelhecimento sob intemperismo natural foram colocadas sobre bancadas de exposição a céu aberto, com uma inclinação de 45° em relação à horizontal, com a face inclinada voltada para o Sul, em virtude da direção predominante dos ventos e das chuvas do local ser Sudeste, favorecendo os mecanismos de degradação natural. A Figura 3.8 mostra uma das bancadas utilizadas para a exposição das placas ao intemperismo natural durante 6 meses.



FIGURA 3.8 – Placas expostas ao intemperismo natural para estudos de durabilidade

3.6 Resultados e Discussão

3.6.1 Cimento Portland

As caracterizações químicas e físicas do cimento Portland CII-Z-32 utilizado para produção dos compósitos estão apresentadas nas Tabelas 3.3 e 3.4.

TABELA 3.3 – Características químicas do cimento Portland utilizado

Características	Unid	Resultado	Especificação
CaO (Óxido de Cálcio)	%	55,3	ne
SiO ₂ (Dióxido de Silício)	%	21,2	ne
Al ₂ O ₃ (Óxido de Alumínio)	%	7,0	ne
MgO (Óxido de Magnésio)	%	4,7	≤ 6,5
Fe ₂ O ₃ (Óxido de Ferro)	%	2,2	ne
SO ₃ (Anidrido Sulfúrico)	%	2,3	≤ 4,0
Resíduo insolúvel	%	8,0	≤ 16,0
Perda ao fogo	%	6,0	≤ 6,5

ne – não especificado

TABELA 3.4 – Características físicas do cimento Portland utilizado

Características	Unid	Resultado	Especificação
Finura Malha n° 200	%	3,80	≤ 12,0
Massa Específica	g/cm ³	2,94	ne
Massa Unitária	g/cm ³	1,17	ne
Área Específica (Blaine)	cm ² /g	3845	≥ 2600
Início de Pega	h:min	2:39	≥ 1:00
Fim de Pega	h:min	5:10	≤ 10:00
Resistência à Compressão Simples (RCS) aos 28 dias	MPa	35,3	≥ 32

ne – não especificado

3.6.2 Areia

O resultado do ensaio da composição granulométrica da areia está apresentado na Tabela 3.5 e a curva granulométrica na Figura 3.9, apresentando módulo de finura (MF) igual a 1,63 e dimensão máxima de 0,6mm. A sua massa unitária em estado solto foi igual a 1435kg/m³. Verifica-se que este agregado enquadra-se nos limites da Zona 1 da NBR 7211/83, sendo classificada como areia muito fina. Esta granulometria irá ajudar na compacidade da matriz, diminuindo a porosidade e melhorando a interface fibra-matriz. SAVASTANO JR. (2000) utilizou uma areia com MF=2,12 e dimensão máxima de 2,4mm.

TABELA 3.5 – Composição granulométrica da areia utilizada

Abertura da peneira (mm)	% Retida	% Retida acumulada	% que passa da amostra total
2,0	0	0	100,00
1,2	5,40	5,40	94,60
0,6	7,84	13,24	86,76
0,3	33,83	47,07	52,93
0,15	49,80	96,87	3,13
Resto	3,13	100,00	0,00

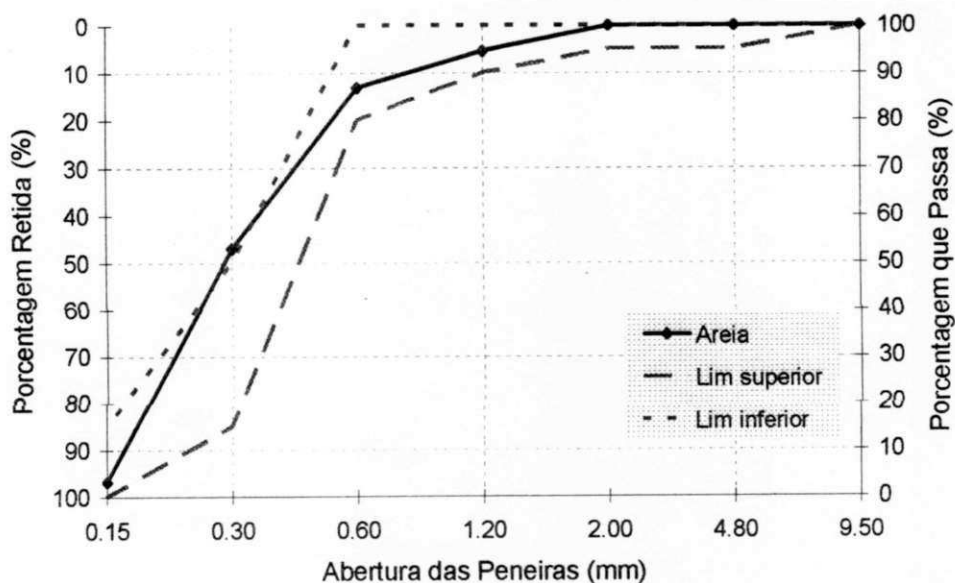


FIGURA 3.9 – Curva granulométrica da areia utilizada

3.6.3 Resíduo moído de blocos cerâmicos

Os resultados da análise físico-química do resíduo de blocos cerâmicos estão apresentados na Tabela 3.6.

TABELA 3.6 – Caracterização química e física do resíduo de blocos cerâmicos

Características	Unidade	Resultado
SiO ₂ (Dióxido de Silício)	%	63,54
Al ₂ O ₃ (Óxido de Alumínio)	%	17,54
Fe ₂ O ₃ (Óxido de Ferro)	%	8,45
CaO (Óxido de Cálcio)	%	2,69
MgO (Óxido de Magnésio)	%	1,86
K ₂ O (Óxido de Potássio)	%	0,60
Na ₂ O (Óxido de Sódio)	%	0,07
Perda ao Fogo	%	2,36
Massa Específica	g/cm ³	2,65
Área Específica (Blaine)	cm ² /g	4060

Os óxidos de silício e alumínio totalizam cerca de 81% dos constituintes do resíduo de bloco moído, segundo a ASTM C618/01 essa soma não pode ser inferior a 70% para que um material seja considerado uma pozolana. Esses são os óxidos que reagem com o hidróxido de cálcio formando os silicatos. O teor de óxido de ferro, de cerca de 8,45%, fez com que as argamassas produzidas com resíduo moído de bloco cerâmico tivessem um tom avermelhado.

3.6.3.1 A atividade pozolânica

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 3.7, pode-se verificar que o resíduo moído de blocos cerâmicos utilizado apresenta o índice de atividade pozolânica com o cimento Portland comum maior que 75%, conforme requerido pela norma NBR 12653.

TABELA 3.7 – Índice de atividade pozolânica aos 28 dias de cura

Traço 1:3	Teor da substituição (%)	RCS – CV (MPa) – (%)	Índice de Atividade Pozolânica (%)
Referência	0	24,4 – 0,71	100
Cim + 35% RMBC	35	21,0 – 1,32	86,0

RMBC – resíduo moído de bloco; RCS – resistência à compressão simples; CV – coeficiente de variação.

3.6.3.2 Teor de hidróxido de cálcio

Aos 28 dias, o teor de hidróxido de cálcio presente nas pastas com diferentes teores de substituição do cimento por material pozolânico foi calculado a partir dos termogramas fornecidos pelas análises termodiferenciais e termogravimétricas (Figura 3.10), e são apresentados na Tabela 3.8.

TABELA 3.8 - Teor de hidróxido de cálcio nas pastas após 28 dias de cura

Teor de substituição (% massa do cimento)	Teor de hidróxido de cálcio (% massa)	Redução em relação à matriz sem substituição (%)
0	5,73	0
20	2,49	56,5
30	2,25	60,7
40	1,93	66,3

A perda de massa do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) diminuiu à medida que se aumentou a porcentagem de substituição do cimento. Esta perda de hidróxido de cálcio é proporcionalmente maior que o percentual de clínquer retirado do cimento, confirmando a eficiência no consumo do hidróxido de cálcio nas misturas com substituição. O resultado mais satisfatório foi para o teor de substituição de 40%. Embora alguns estudos (ORIOLE e PERA, 1994) sugiram que a presença de 30% a 40% de pozolana seja suficiente para consumir todo o hidróxido de cálcio do cimento. É preciso considerar que, além da quantidade, algumas propriedades da pozolana, tais como a composição química, finura e grau de amorfização influenciam significativamente na reação pozolânica, e percentuais mais altos podem ser exigidos para o consumo de todo o hidróxido de cálcio, mas a queda da resistência será um limitante.

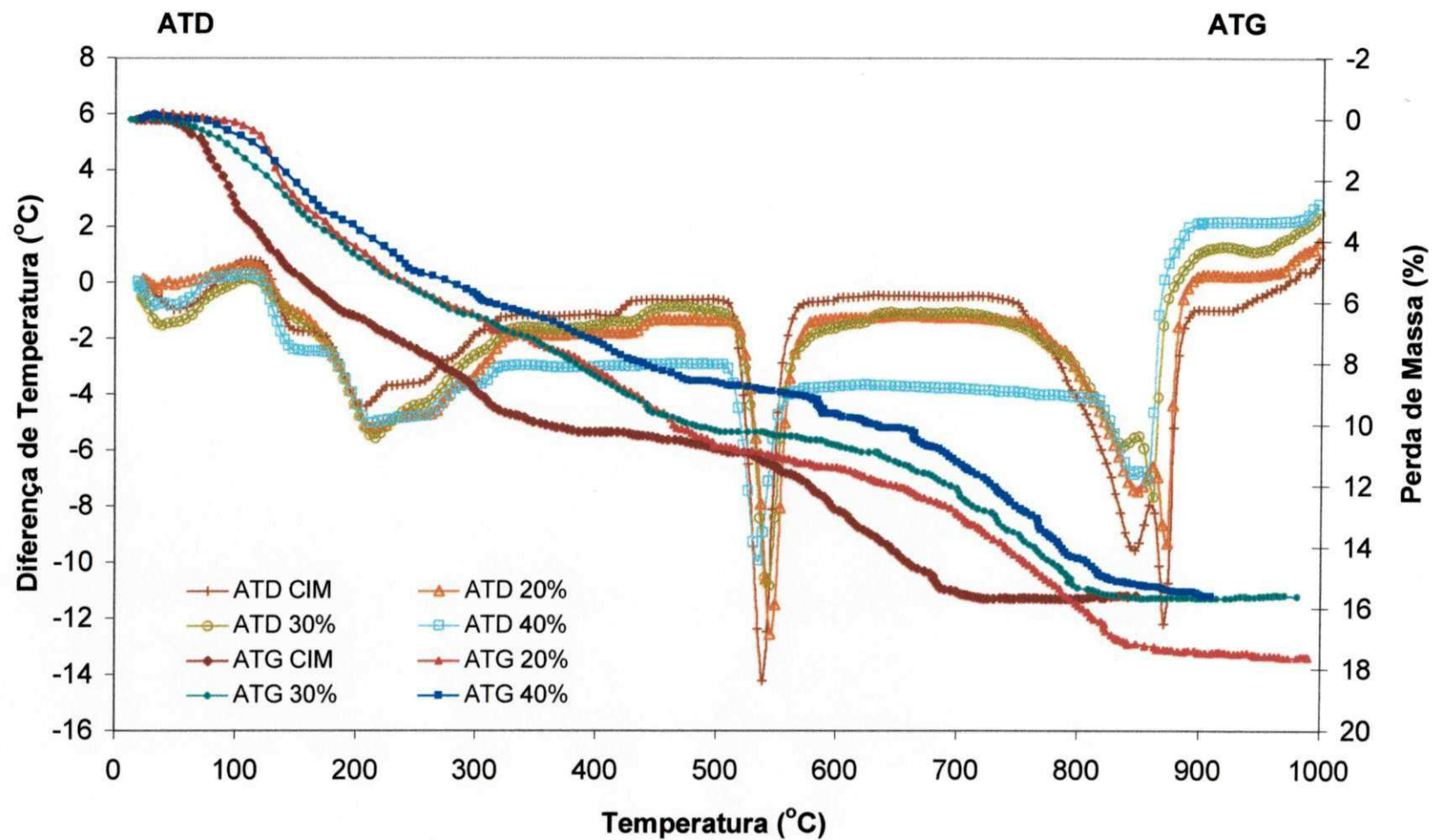


FIGURA 3.10 – Análises térmicas (ATD e ATG) das pastas de cimento CII-Z-32 e de diferentes teores de substituição parcial do cimento por resíduo cerâmico, após 28 dias de cura submersa

3.6.4 Propriedades físicas dos compósitos estruturais

A Tabela 3.9 e as Figuras 3.11 a 3.13 apresentam os resultados da caracterização física obtidos após 30 dias de cura em ambiente de laboratório (L) e após 90 e 210 dias de cura em duas condições distintas de exposição: após 90 e 210 dias de cura em ambiente de laboratório (L) e após 30 dias de cura em laboratório e 60 e 180 dias sob intemperismo natural (T).

Aos 30 dias, percebe-se a influência das variáveis nas propriedades físicas das matrizes. A inclusão das fibras na matriz causa a diminuição da massa específica em 5% e o aumento na absorção em 14% e na porosidade em 10%. Isto ocorre devido à baixa densidade, alta absorção e maior porosidade da fibra de sisal, além da incorporação de ar aprisionado entre as fibras durante a homogeneização das misturas. A substituição parcial do cimento pelo resíduo cerâmico reduziu a massa específica em cerca de 6% e aumentou a absorção em 22% e a porosidade em 15%, em média. Deve-se notar que, o resíduo moído de bloco cerâmico utilizado tem uma densidade mais baixa que o cimento e as reações de hidratação e pozolânica ainda não se completaram. A utilização da tensão de prensagem na moldagem retirou parte do ar incorporado, dando uma maior compactação à matriz, aumentando a massa específica em 5% e reduzindo a absorção em 8% e a porosidade em 5%.

Os resultados obtidos estão em acordo com resultados obtidos por outros trabalhos. SAVASTANO (2000) obteve absorção de 11% aos 28 dias para compósitos fibrosos à base de escória ativada por cal com 2% de fibras de sisal e polpa de eucalipto. Já SILVA (2002) obteve aos 28 dias, massa específica de $1,65\text{kg/dm}^3$, absorção de 16% e porosidade de 28% para um compósito com 2% de polpa de eucalipto com uma matriz de 40% de cimento Portland e 60% de escória de alto forno.

Aos 90 e 210 dias, os resultados obtidos para as diferentes misturas apresentam diferença significativa para os níveis de significância adotados na análise de variância. Percebe-se um aumento médio de 4% e 6% da massa específica e uma redução média de 8% e 13% da absorção e de 5% e 7% da porosidade para os diferentes tipos de mistura, aos 90 e 210 dias respectivamente, em relação aos resultados de 30 dias. A reação de hidratação da matriz e

a reação pozolânica ocorrida através do resíduo cerâmico contribuíram para a maior densificação das amostras expostas ao intemperismo.

Com a utilização do material pozolânico proveniente dos resíduos de blocos cerâmicos esperava-se a redução da porosidade, o que não ocorreu. Contudo, MEHTA E MONTEIRO (1994) afirmam que a presença de pozolanas na pasta de cimento pode promover a redução do tamanho e do volume de vazios e que a porosidade da matriz depende da relação água/cimento, do tipo de cimento, do grau de hidratação, e ainda das características dos poros, suas dimensões (macroporos, capilares e microporos), conectividade entre eles, bem como a quantidade existente. Além disso, SATO e AGOPYAN (2000) verificaram que a substituição de 70% do cimento por escória de alto forno contribuiu para a redução da quantidade de poros maiores e para o aumento do número de poros com menores dimensões. Portanto, existe a possibilidade do material pozolânico utilizado ter promovido o refinamento dos poros e mesmo assim ter aumentado a porosidade do compósito. A comprovação desta hipótese, no entanto, foge ao escopo desta pesquisa.

Os resultados obtidos para as diferentes condições de exposição também apresentam diferença significativa na análise de variância. As amostras expostas ao intemperismo natural apresentam um aumento médio de 3% na massa específica e uma redução média de 10% na absorção e 7% na porosidade, em relação às amostras mantidas em laboratório. Portanto, as matrizes não apresentaram sinais de degradação no período analisado.

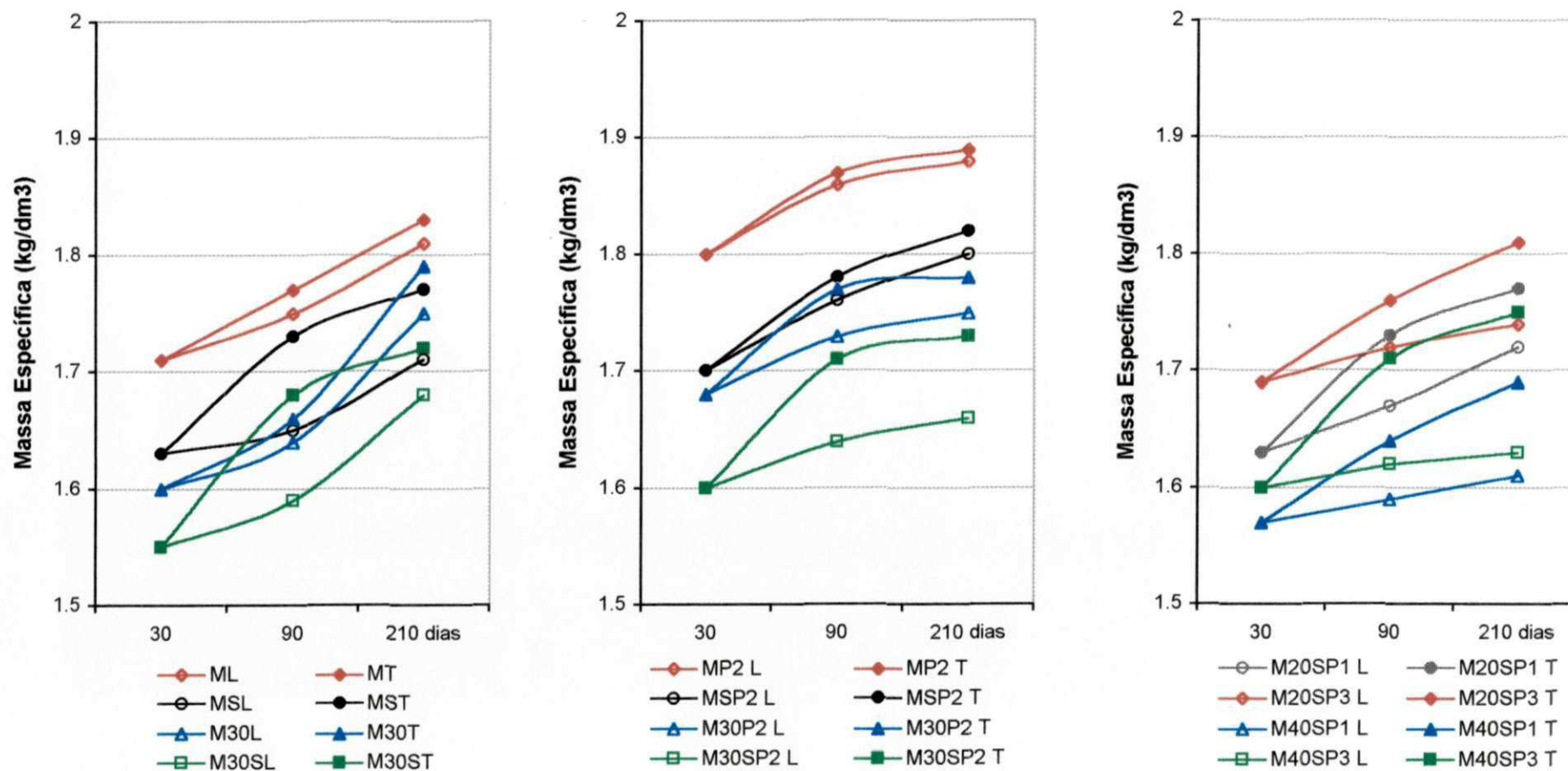
A aplicação da tensão de prensagem na moldagem conseguiu reduzir os aumentos de absorção e de porosidade causados pela adição das fibras e pela substituição parcial do cimento por resíduos de blocos cerâmicos, mantendo essas propriedades próximas aos da matriz referência (M). O ideal parece estar entre as misturas M30S P2 e M20S P3, com 2% de fibra de sisal, 20 e 30% de resíduo de blocos moídos e 2,4 e 3,2MPa de tensão de prensagem na moldagem.

TABELA 3.9 – Propriedades físicas dos compósitos ao longo de 210 dias de cura

Mistura	Massa Específica (kg/dm ³)					Absorção (%)					Porosidade (%)				
	30d		90d		210d	30d		90d		210d	30d		90d		210d
	L	L	T	L	T	L	L	T	L	T	L	L	T	L	T
M	1,71	1,75	1,77	1,81	1,83	11,0	10,5	10,3	8,9	8,5	19,0	18,5	18,1	18,2	17,8
MS	1,63	1,65	1,73	1,71	1,77	12,5	12,4	9,2	11,1	10,0	20,5	20,7	16,8	20,2	18,8
M30	1,60	1,64	1,66	1,75	1,79	13,7	13,5	12,3	12,7	11,8	21,8	22,1	21,0	21,5	19,7
M30S	1,55	1,59	1,68	1,68	1,72	14,8	14,5	12,6	13,2	11,4	23,5	23,1	21,1	22,8	20,9
M P2	1,80	1,86	1,87	1,88	1,89	9,8	9,3	8,3	8,8	8,1	17,8	17,3	15,5	16,9	15,3
MS P2	1,70	1,76	1,78	1,80	1,82	11,6	11,0	10,2	10,7	9,9	19,7	19,4	18,2	19,2	17,7
M30 P2	1,69	1,73	1,77	1,75	1,78	12,1	11,8	10,2	11,6	11,1	20,1	20,3	18,9	19,9	18,8
M30S P2	1,60	1,64	1,71	1,66	1,73	14,2	13,9	11,4	13,2	11,2	23,0	22,7	19,5	22,5	18,7
M20S P1	1,63	1,67	1,73	1,72	1,77	13,3	13,0	11,2	11,0	10,3	22,3	22,1	19,3	19,7	18,7
M20S P3	1,69	1,72	1,76	1,74	1,81	12,7	11,2	10,8	10,9	9,9	20,1	19,9	18,3	19,5	17,9
M40S P1	1,57	1,59	1,64	1,61	1,69	14,3	14,1	13,6	13,8	13,3	23,2	22,9	22,2	22,3	21,8
M40S P3	1,60	1,62	1,71	1,63	1,75	14,1	13,9	13,1	13,7	12,0	22,8	22,5	20,9	21,2	19,5

Legenda: d - dias, L - amostras mantidas em laboratório, T - amostras submetidas ao intemperismo natural.

M - matriz 1:1,5; 20, 30 e 40 - % de substituição; S - 2% de fibra de sisal; P1, P2 e P3 - tensão de prensagem (1,2; 2,4 e 3,6MPa, respectivamente).



Legenda: *L* – amostras mantidas em laboratório, *T* – amostras submetidas ao intemperismo natural.
 M - matriz 1:1,5; 20, 30 e 40 - % de substituição; S - 2% de fibra de sisal; P1, P2 e P3 - tensão de prensagem (1,2; 2,4 e 3,6MPa, respectivamente).

FIGURA 3.11 – Variação da massa específica dos compósitos ao longo de 210 dias de cura em diferentes condições de exposição

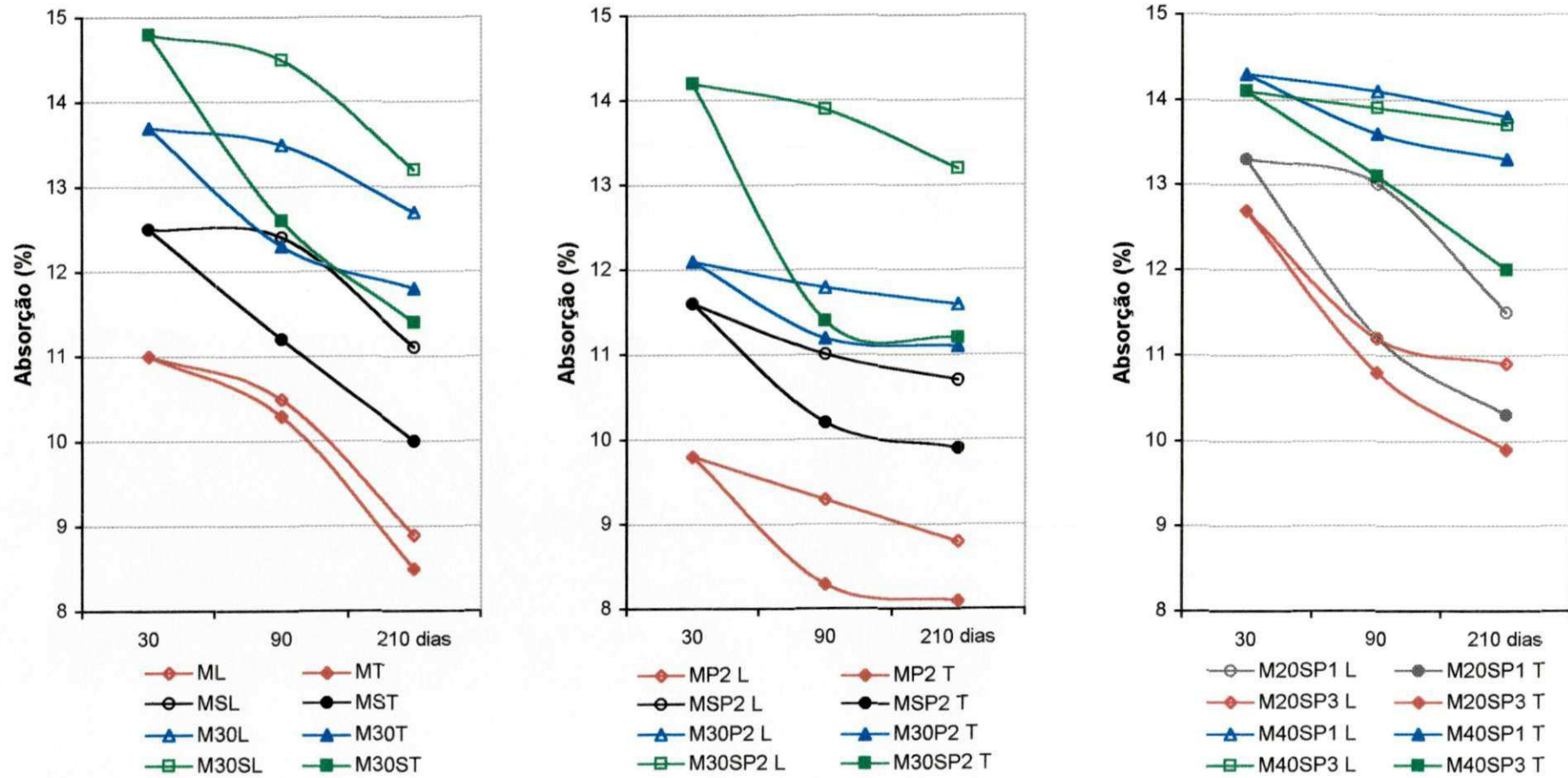
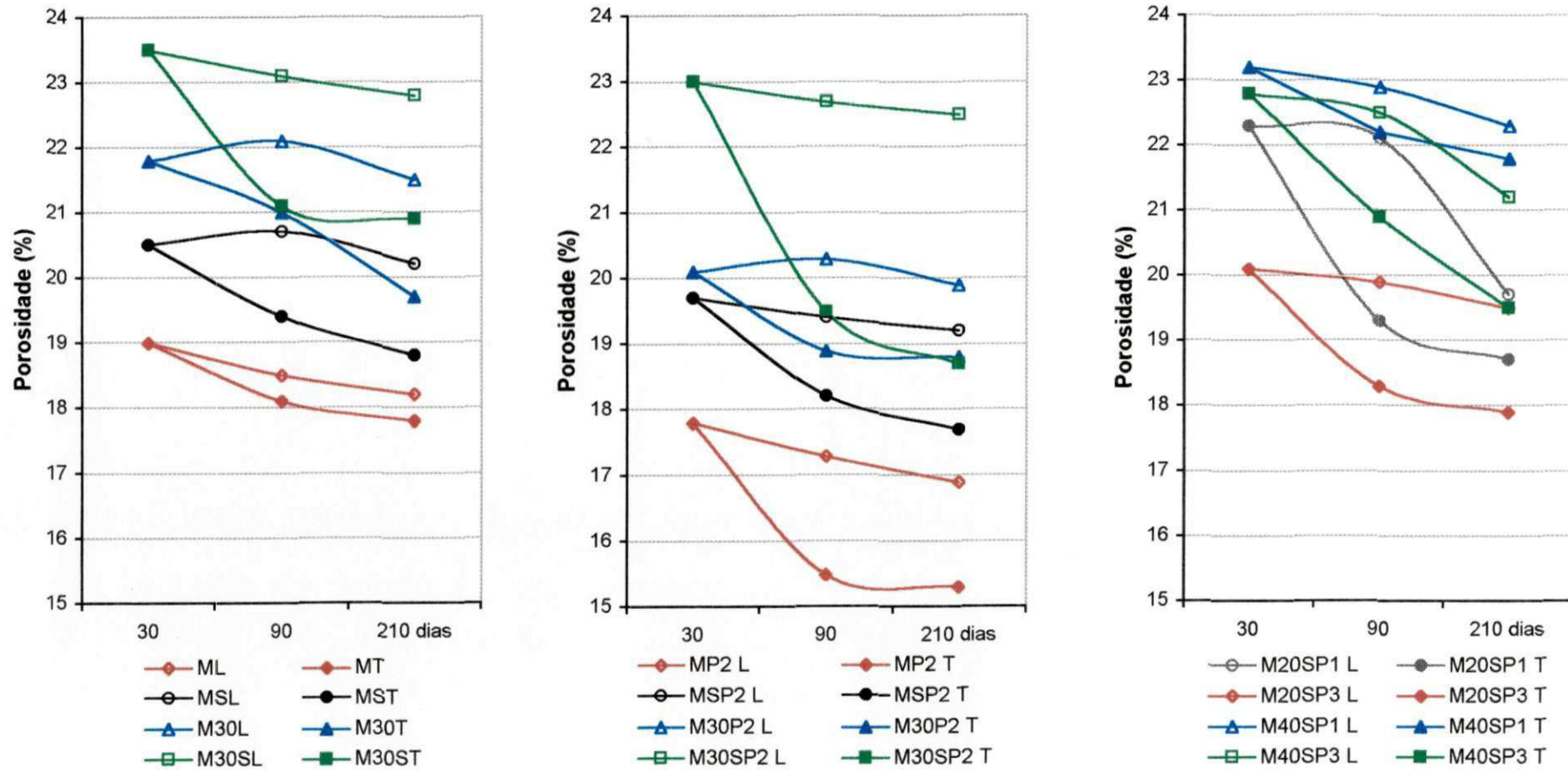


FIGURA 3.12 – Variação da absorção dos compósitos ao longo de 210 dias de cura em diferentes condições de exposição



Legenda: *L* – amostras mantidas em laboratório, *T* – amostras submetidas ao intemperismo natural.
 M - matriz 1:1,5; 20, 30 e 40 - % de substituição; S - 2% de fibra de sisal; P1, P2 e P3 - tensão de prensagem (1,2; 2,4 e 3,6MPa, respectivamente).

FIGURA 3.13 – Variação da porosidade dos compósitos ao longo de 210 dias de cura em diferentes condições de exposição

3.6.5 Propriedades mecânicas dos compósitos estruturais

A Figura 3.14 mostra as curvas características da força x deflexão das diversas misturas. Na primeira fase do ensaio, após acomodações do dispositivo de carregamento, observa-se uma zona aproximadamente elástica, até que a primeira fissura da matriz seja atingida. Após fissuração da matriz, mesmo com significativa redução da força suportada, as misturas reforçadas com fibras de sisal mostraram capacidade suplementar de absorção de energia, em lugar do colapso instantâneo observado para as demais matrizes sem reforço.

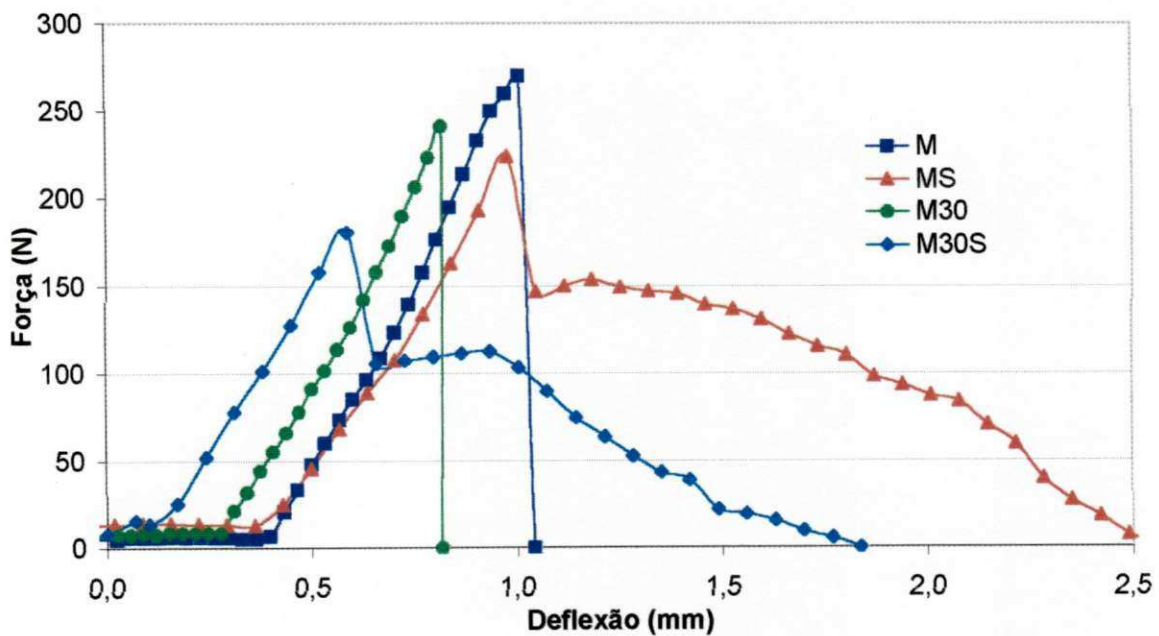


FIGURA 3.14 – Curvas características da força x deflexão para os compósitos

Os resultados da caracterização mecânica dos corpos-de-prova recortados das placas sob as diferentes condições de exposição e em diferentes idades estão apresentados na Tabela 3.10 e nas Figuras 3.15 a 3.17. As Figuras 3.18, 3.19 e 3.20 mostram a influência das variáveis: fibra de sisal, resíduo de bloco e prensagem, nas propriedades mecânicas dos compósitos.

Aos 30 dias, percebe-se a influência de cada uma das variáveis nas propriedades mecânicas estudadas. A presença das fibras reduziu o módulo de ruptura (MOR) e o módulo de elasticidade (MOE) em 18% e 28%, respectivamente; e aumentou a capacidade de absorver energia pós-fissura, aumentando em 59% a energia específica (EE, energia absorvida dividida pela seção transversal da amostra), apresentando a vantagem da ausência de uma ruptura brusca, como no caso das misturas sem fibras. A substituição do cimento pelo resíduo cerâmico moído, reduziu o MOR em 52%, o MOE em 16% e a EE em 28%. A aplicação de tensão de prensagem promoveu um aumento de 16% no MOR, de 33% no MOE e de 22% na EE.

Os resultados obtidos estão em acordo com resultados obtidos por outros trabalhos. TOLEDO FILHO (1997) obteve MOR de 4,0MPa para um compósito com 2% de fibra de sisal. SAVASTANO (2000) obteve MOR de 3,0MPa para compósitos fibrosos à base de escória ativada por cal com 2% de fibras de sisal e polpa de eucalipto. SILVA (2002) obteve MOE de 6,5GPa para um compósito com 2% de polpa de eucalipto com uma matriz de 40% de cimento Portland e 60% de escória de alto forno. AGOPYAN (1999) obteve 0,5kJ/m² de EE para compósitos à base de cimento Portland com 3% de fibras de sisal.

O desempenho mecânico aos 90 dias diferenciou positivamente algumas misturas empregadas, no tocante à energia específica. As misturas com fibras de sisal apresentaram um aumento médio da EE de 63% para as misturas mantidas em laboratório e 45% para as submetidas ao intemperismo. A aplicação de prensagem na moldagem garantiu uma melhora da capacidade de absorção de energia, aumentando-a, em média, 27% para as misturas mantidas em laboratório e 18% para as submetidas ao intemperismo. Já a substituição do cimento pelo resíduo cerâmico moído reduziu significativamente a energia específica (EE). Em média, essa redução foi de 13% para as misturas mantidas em laboratório e 18% para as submetidas ao intemperismo natural.

A utilização da tensão de prensagem na moldagem retirou parte do ar incorporado, promovendo uma maior compacidade da matriz e melhorando a interface fibra-matriz, garantindo um aumento tanto do módulo de ruptura como da energia absorvida após a fissura da matriz.

Aos 210 dias, houve uma diferença significativa no MOR e no MOE entre as condições de exposição, sendo os resultados das amostras submetidas ao intemperismo, em média, 62% e 34% maiores que das mantidas em laboratório, respectivamente. Em relação aos resultados obtidos aos 90 dias, houve um aumento médio do MOR em 34% para as amostras mantidas em laboratório e em 38% para as submetidas ao intemperismo. Houve também um aumento médio do módulo de elasticidade de 13% em relação aos 90 dias, para as amostras submetidas ao intemperismo.

Fazendo-se uma comparação entre as misturas aos 210 dias, nota-se que as fibras diminuíram o módulo de ruptura (MOR) em cerca de 25%, o resíduo do bloco o reduziu em 33%, e a tensão de prensagem o aumentou em 14%, para ambas as condições de exposição. Entre as condições de exposição, houve um aumento médio de 67% no módulo de elasticidade e de 53% na EE das amostras expostas em relação às abrigadas.

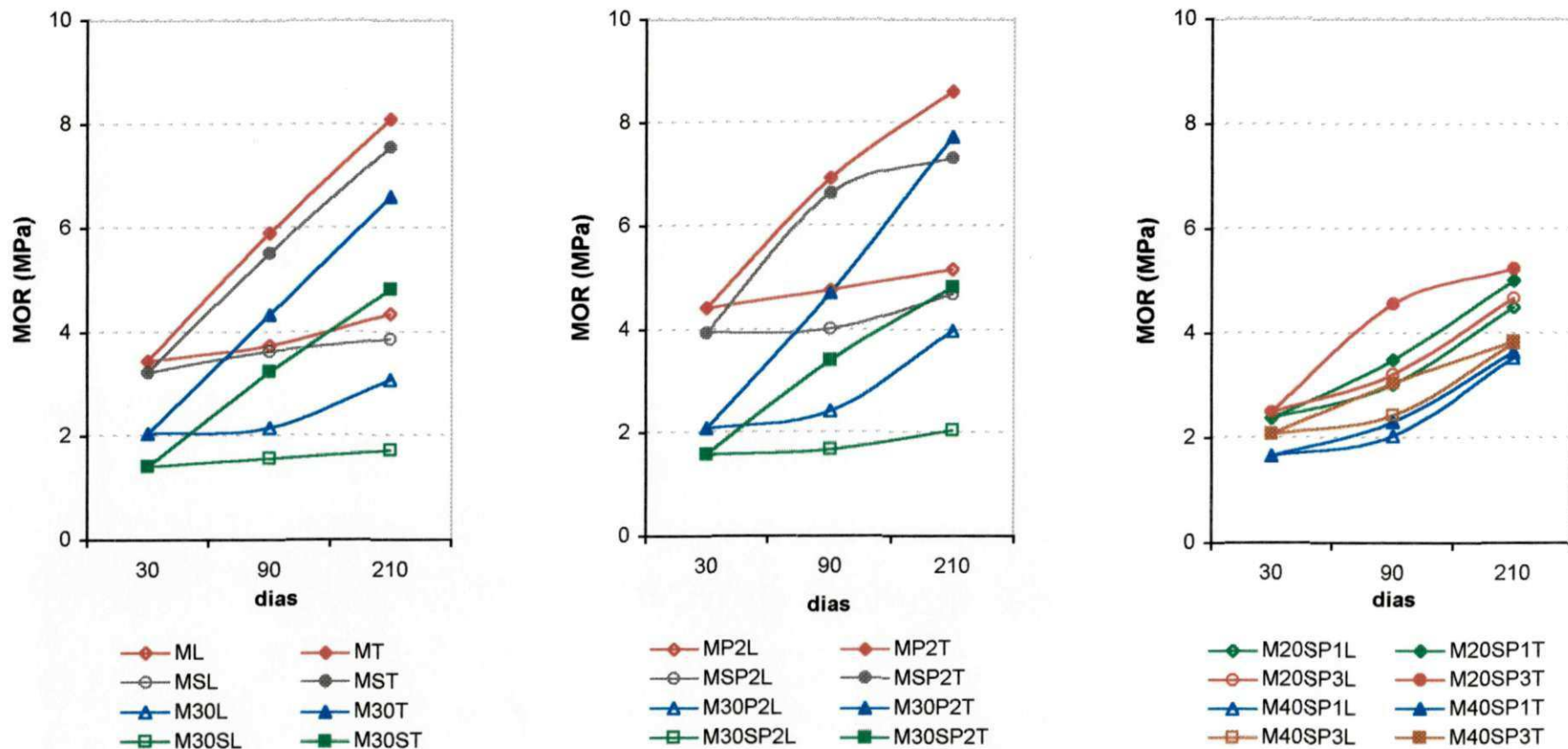
Os processos de hidratação e carbonatação da matriz e a reação pozolânica do resíduo cerâmico ocorreram com maior intensidade nas amostras expostas ao intemperismo, contribuindo para o aumento da massa específica e a diminuição da absorção e da porosidade dessas amostras, além de melhorar as suas propriedades mecânicas. Estes fatos sugerem deficiências no processo de cura utilizado e que o ensaio de envelhecimento natural durante 6 meses serviu como continuação do processo de cura da matriz. Apesar da matriz não apresentar sinais de deterioração, o compósito apresentou redução da capacidade de absorver energia após fissuração da matriz, evidenciando a degradação tanto das fibras como da interface fibra-matriz durante o período analisado.

TABELA 3.10 – Propriedades mecânicas dos compósitos estruturais

Mistura	MOR (MPa)					MOE (GPa)					EE (kJ/m ²)				
	30d	90d		210d		30d	90d		210d		30d	90d		210d	
	L	L	T	L	T	L	L	T	L	T	L	L	T	L	T
M	3,46	3,76	5,92	4,36	8,10	1,93	1,65	2,03	1,48	2,36	0,14	0,15	0,24	0,16	0,32
MS	3,23	3,63	5,52	3,87	7,56	1,34	1,24	1,71	0,97	1,66	0,22	0,25	0,32	0,19	0,25
M30	2,05	2,16	4,35	3,09	6,61	1,54	1,34	1,92	1,27	2,64	0,10	0,13	0,17	0,15	0,21
M30S	1,42	1,57	3,25	1,72	4,82	1,13	1,22	1,68	1,07	1,40	0,16	0,20	0,27	0,12	0,17
M P2	4,43	4,79	6,95	5,18	8,62	2,63	2,31	2,6	2,24	2,71	0,16	0,18	0,26	0,19	0,34
MS P2	3,94	4,02	6,64	4,69	7,32	1,68	1,43	1,53	1,61	1,64	0,29	0,31	0,37	0,25	0,28
M30 P2	2,10	2,44	4,73	3,98	7,74	2,01	1,74	1,92	2,17	1,96	0,13	0,17	0,22	0,20	0,26
M30S P2	1,59	1,69	3,42	2,05	4,83	1,6	1,39	1,6	1,48	1,9	0,18	0,27	0,32	0,22	0,24
M20S P1	2,39	3,04	3,51	4,52	5,03	1,48	1,37	1,46	1,34	1,51	0,14	0,15	0,25	0,13	0,19
M20S P3	2,52	3,24	4,58	4,70	5,26	1,5	1,49	1,75	1,43	2,22	0,18	0,23	0,30	0,26	0,21
M40S P1	1,68	2,05	2,32	3,56	3,67	1,45	1,48	1,82	1,84	2,15	0,15	0,16	0,23	0,15	0,17
M40S P3	2,09	2,45	3,06	3,83	3,86	1,53	1,58	1,87	1,57	2,53	0,17	0,19	0,24	0,23	0,15

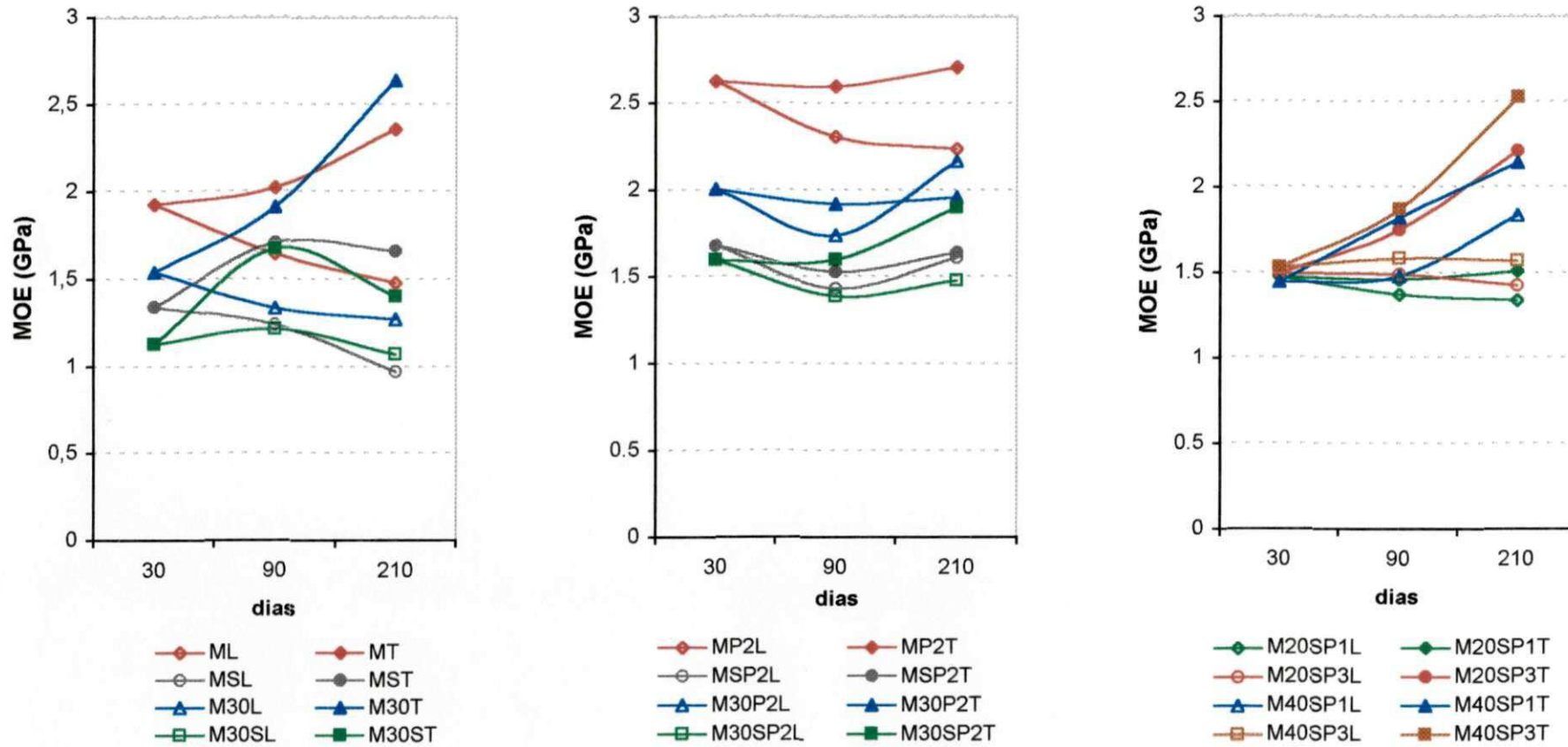
Legenda: d - dias, L - amostras mantidas em laboratório, T - amostras submetidas ao intemperismo natural.

M - matriz 1:1,5; 20, 30 e 40 - % de substituição; S - 2% de fibra de sisal; P1, P2 e P3 - tensão de prensagem (1,2; 2,4 e 3,6MPa, respectivamente).



Legenda: *L* – amostras mantidas em laboratório, *T* – amostras submetidas ao intemperismo natural.
 M - matriz 1:1,5; 20, 30 e 40 - % de substituição; S - 2% de fibra de sisal; P1, P2 e P3 - tensão de prensagem (1,2; 2,4 e 3,6MPa, respectivamente).

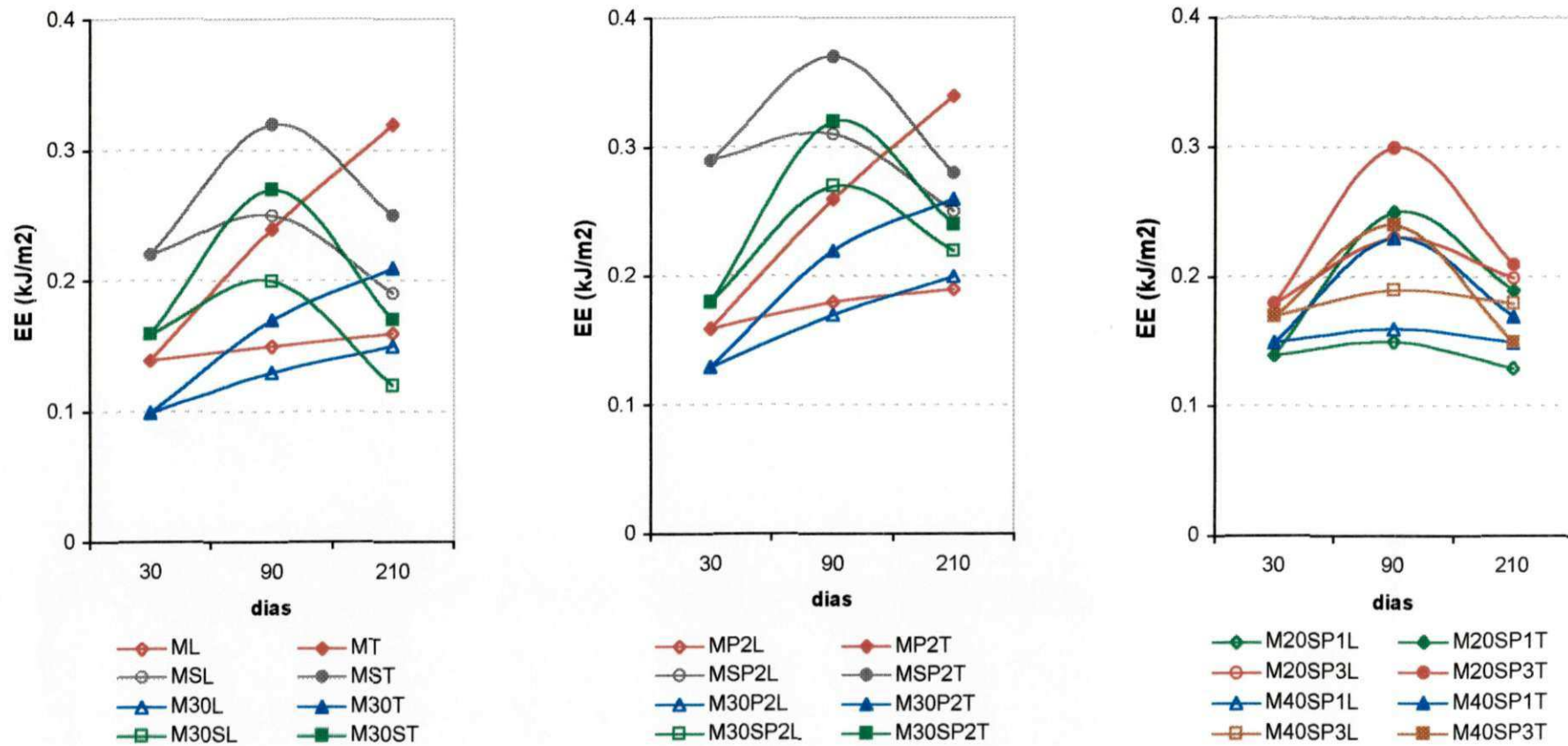
FIGURA 3.15 – Variação do módulo de ruptura (MOR) dos compósitos em diferentes condições de exposição



Legenda: *L* – amostras mantidas em laboratório, *T* – amostras submetidas ao intemperismo natural.
 M - matriz 1:1,5; 20, 30 e 40 - % de substituição; S - 2% de fibra de sisal; P1, P2 e P3 - tensão de prensagem (1,2; 2,4 e 3,6MPa, respectivamente).

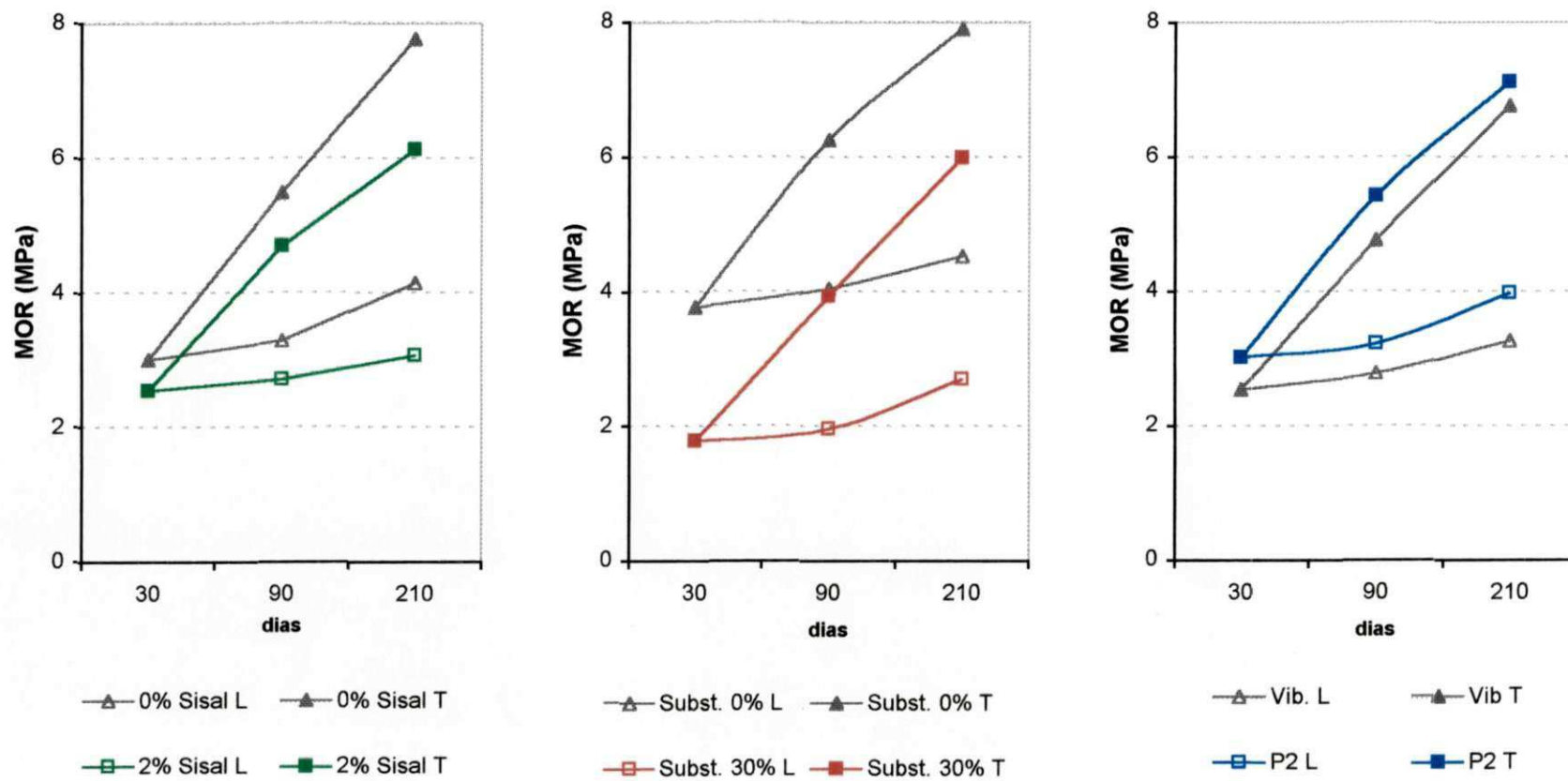
FIGURA 3.16 – Variação do módulo de elasticidade (MOE) dos compósitos em diferentes condições de exposição

UFCG/BIBLIOTECA



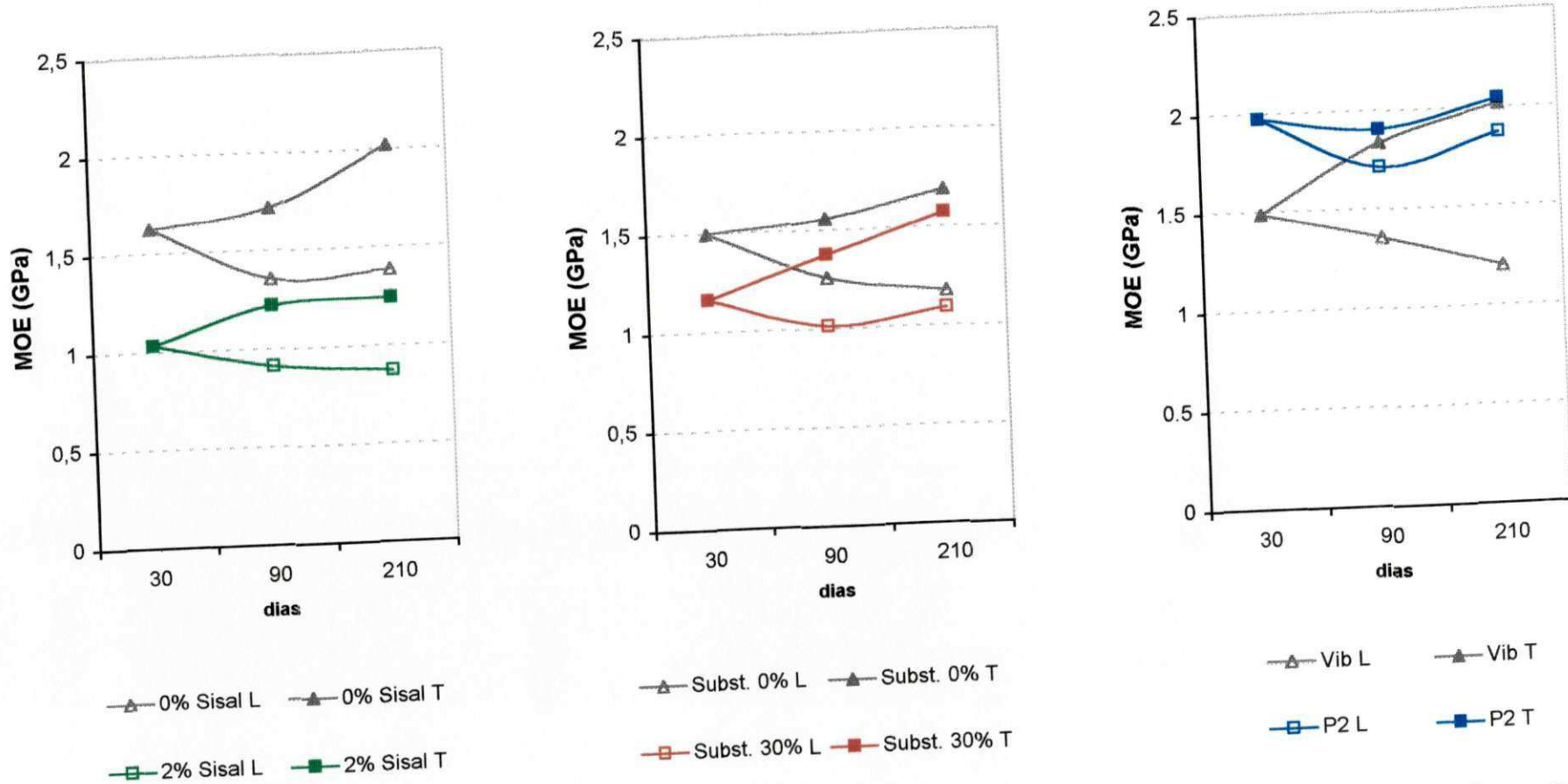
Legenda: *L* – amostras mantidas em laboratório, *T* – amostras submetidas ao intemperismo natural.
 M - matriz 1:1,5; 20, 30 e 40 - % de substituição; S - 2% de fibra de sisal; P1, P2 e P3 - tensão de prensagem (1,2; 2,4 e 3,6MPa, respectivamente).

FIGURA 3.17 – Variação da Energia Específica (EE) dos compósitos em diferentes condições de exposição



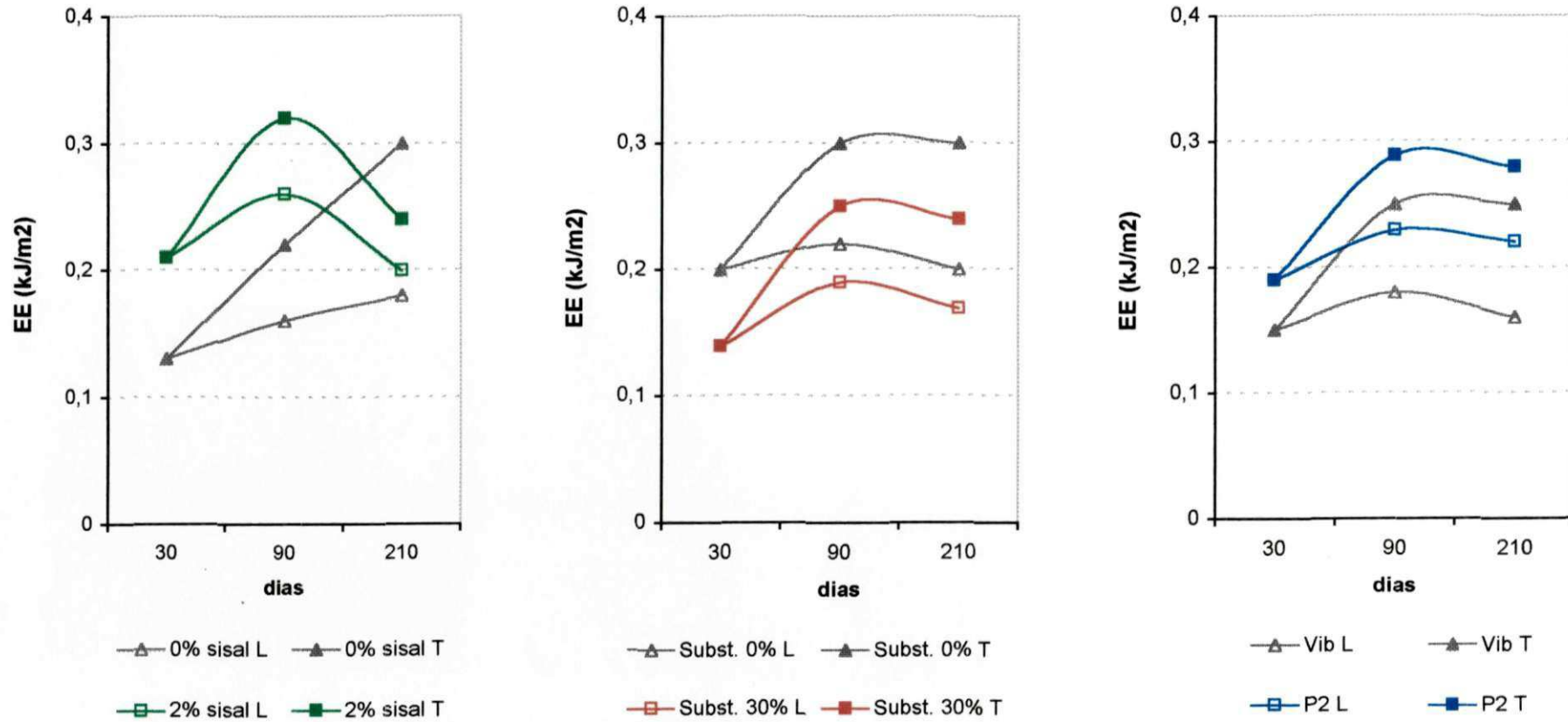
Legenda: L – amostras mantidas em laboratório, T – amostras submetidas ao intemperismo natural.

FIGURA 3.18 – Influência da fibra de sisal, do resíduo de bloco e da prensagem no módulo de ruptura (MOR) dos compósitos



Legenda: *L* – amostras mantidas em laboratório, *T* – amostras submetidas ao intemperismo natural.

FIGURA 3.19 – Influência da fibra de sisal, do resíduo de bloco e da prensagem no módulo de elasticidade (MOE) dos compósitos



Legenda: *L* – amostras mantidas em laboratório, *T* – amostras submetidas ao intemperismo natural.

FIGURA 3.20 – Influência da fibra de sisal, do resíduo de bloco e da prensagem na Energia Específica (EE) dos compósitos

A Figura 3.21 ilustra as curvas força x deflexão da mistura M30S aos 30, 90 e 210 dias de idade. Na primeira fase do ensaio, após acomodações do dispositivo de carregamento, observa-se zona aproximadamente elástica, até que a primeira fissura da matriz seja atingida. Após fissuração da matriz, mesmo com significativa redução da força suportada, as misturas reforçadas com fibras de sisal, mostraram capacidade suplementar de absorção de energia, em lugar do colapso instantâneo observado para as demais matrizes sem reforço. Entretanto, aos 210 dias, houve redução da capacidade de absorção de energia após o pico da carga máxima aplicada nas misturas com fibras, principalmente nas expostas ao intemperismo natural, indicando a degradação tanto das fibras como da interface.

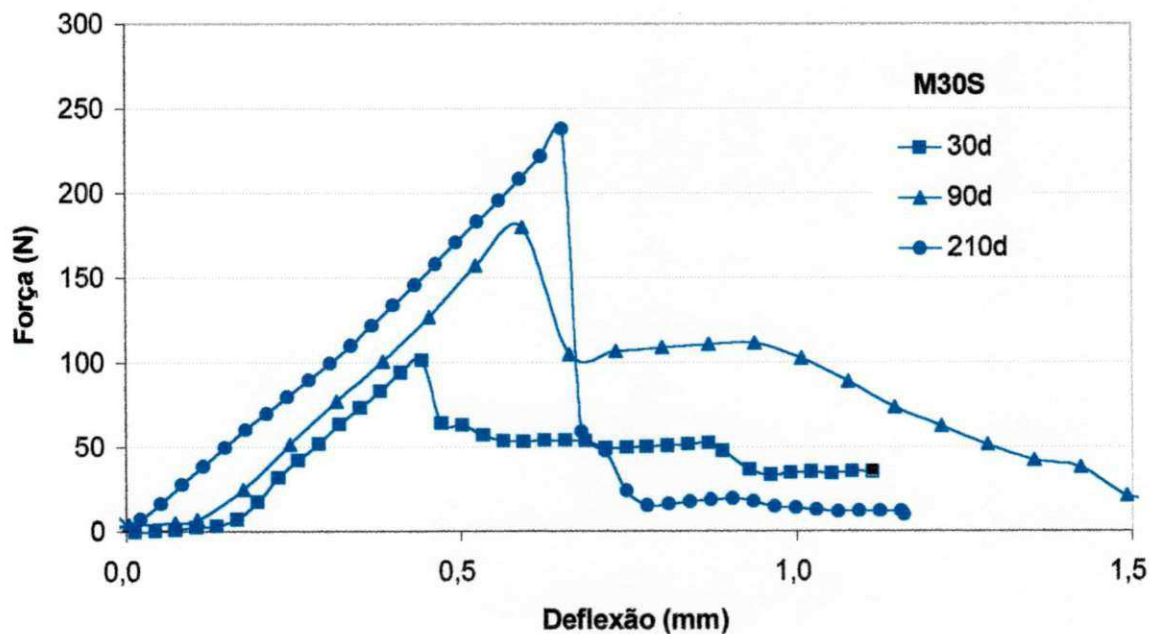


FIGURA 3.21 - Curvas força x deflexão para a mistura M30S submetida ao intemperismo

3.7 Conclusões Parciais

Os resultados obtidos às primeiras idades demonstram que a produção de compósitos estruturais com a utilização de fibras de sisal, de resíduo moído de blocos cerâmicos e de prensagem na moldagem é tecnicamente viável.

A presença das fibras curtas de sisal nas matrizes aumentou a absorção e a porosidade do compósito, e reduziu a massa específica e os módulos de ruptura e de elasticidade. A capacidade de absorver energia pós-fissura, atribuída às fibras foi significativamente aumentada nas primeiras idades. Após cerca de 7 meses, essa capacidade foi bastante reduzida, tendendo a um comportamento semelhante ao das matrizes sem fibras. Esse fato indica tanto a degradação das fibras como da interface fibra-matriz.

O resíduo moído de blocos cerâmicos apresentou as características exigidas aos materiais pozolânicos. A substituição parcial do cimento Portland pelo resíduo moído de blocos cerâmicos reduziu os teores de hidróxido de cálcio livre nas matrizes. Essa redução obtida em relação à matriz sem substituição, embora significativa (até 66%), não garantiu a manutenção da contribuição das fibras à tenacidade do compósito durante o período ensaiado.

A utilização do resíduo moído de blocos cerâmicos reduziu a massa específica e aumentou a absorção e a porosidade do compósito. A tenacidade e os módulos de ruptura e de elasticidade dos compósitos com resíduos também foram reduzidos. As principais vantagens no aproveitamento do resíduo estão na redução do impacto ambiental; redução da alcalinidade da matriz; e na diminuição do custo final do compósito.

A tensão de prensagem aplicada na moldagem dos compósitos resultou em uma melhora das suas propriedades físico-mecânicas. Reduziu os aumentos de absorção e de porosidade causados pela adição das fibras e pela substituição parcial do cimento por resíduo de blocos cerâmicos, mantendo essas propriedades próximas aos da matriz referência (M). A tensão de prensagem aumentou o módulo de ruptura à flexão e a tenacidade dos compósitos.

Considerando as propriedades físicas e mecânicas antes da degradação tanto das fibras como da interface fibra-matriz, a mistura ideal parece estar entre as misturas M20S P3 e M30S P2, com 2% de fibra de sisal, com 20 a 30% de resíduo moído de blocos cerâmicos e 2,4 a 3,2 MPa de tensão de prensagem na moldagem. Caso não se aplique a tensão de prensagem, a mistura indica será a MS, que apresentou maior tenacidade que as demais.

CAPÍTULO 4

PRODUÇÃO DE TELHAS COM MATRIZES REFORÇADAS COM FIBRA DE SISAL

4.1 Generalidades

Várias experiências são relatadas sobre a produção de componentes construtivos utilizando matrizes à base de cimento reforçado com fibras naturais. Aqui no Brasil, o CEPED (Centro de Pesquisa e Desenvolvimento), da Bahia, foi o pioneiro em produzir telhas, painéis de vedação vertical, caixas d'água e pias de cozinha. Destes, o produto de maior repercussão foi a telha tipo capa-canal em matriz de cimento Portland (1:3), com 1,80m de comprimento, 41cm de largura e 1,5cm de espessura, reforçada com 2% em volume de fibras de coco de 4cm (CEPED, 1985).

Existe também a experiência do IPT-SP (1989), onde se produziram painéis para paredes estruturais utilizando um cimento alternativo de escória de alto-forno reforçados com 2% em volume de fibras de coco, os quais foram aplicados em um protótipo construído em um conjunto popular na cidade de São Paulo.

SAVASTANO (2000) relata a produção de telhas tipo “romana”, com cerca de 50cm de comprimento, confeccionadas em matriz de cimento Portland e cimento alternativo de escória de alto-forno, reforçadas com diferentes tipos de resíduos de fibras naturais e submetidas a diferentes condições de envelhecimento.

Este capítulo relata a produção de elementos de cobertura com materiais compósitos reforçados com fibras de sisal utilizando tecnologia apropriada para construções populares, destinados a usuários que os produziram para o seu próprio consumo, buscando uma alternativa ao uso do cimento-amianto. Os objetivos são: 1) caracterização física e de desempenho mecânico das telhas; 2) avaliação da durabilidade das telhas; e 3) análise do comportamento térmico.

Foi sugerido um modelo de telha trapezoidal, no sistema “capa-canal”, com 1,10m de comprimento, largura média de 24cm e 8mm de espessura, visando minimizar o custo do madeiramento de cobertura, dispensando o uso de caibros e ripas. Também se busca a produção de um elemento de cobertura que apresente baixo custo, baixo consumo de energia, que seja durável e com tecnologia acessível às comunidades carentes.

Foram realizados ensaios de caracterização física, de desempenho mecânico das telhas e ensaios para avaliação da durabilidade, optando-se pelo ensaio de envelhecimento natural em situação de uso em um modelo em escala real. Também foi realizada uma análise de comportamento térmico em modelos reduzidos.

4.2 Produção das Telhas

Utilizou-se cimento Portland tipo CII-Z-32, areia, fibras de sisal e resíduo moído de blocos cerâmicos, cujas características estão descritas no Capítulo 3.

As telhas foram produzidas no traço 1:1,5 (aglomerante:areia), em massa, sendo elaboradas três misturas. A primeira mistura, sem fibras e sem substituição parcial do cimento, serve como matriz de referência. Na segunda mistura também não houve substituição do cimento, porém foi inserido 2% de fibra de sisal, em volume. Já na terceira mistura houve 30% de substituição do cimento Portland pelo material pozolânico proveniente do resíduo moído de blocos cerâmicos e foi utilizado 2% de fibra de sisal, em volume. A Tabela 4.1 mostra um resumo das misturas produzidas.

TABELA 4.1 - Misturas desenvolvidas para produção das telhas

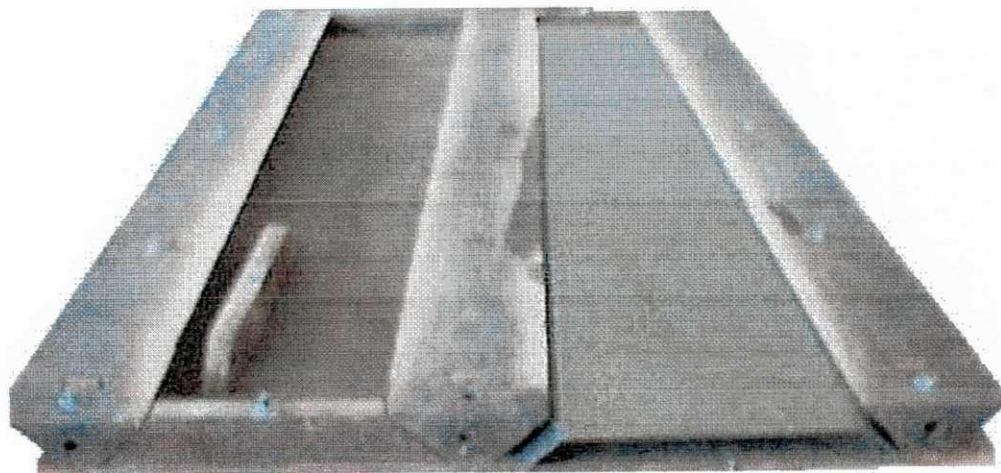
Mistura	Traço (massa)	Aglomerante		Agregado (areia)	Fibra (%)	Fator a/agl
		Cimento	RMBC			
M	1:1,5	1	0	1,5	0	0,45
MS		0,7	0,3	1,5	2	
M30S		0,7	0,3	1,5	2	

RMBC – resíduo moído de bloco cerâmico; a/agl – água/aglomerante.

Foram seguidos os seguintes critérios:

- teor de fibra de sisal: 2%, em volume, o equivalente a 3,6% da massa do cimento;
- comprimento das fibras de sisal: 2,5 – 3,0cm;
- mistura, moldagem e vibração: manuais;
- cura imersa durante 3 dias e ao ar até a data dos ensaios.

Foi idealizada uma forma simples, produzida em chapa de madeira compensada de 10mm (lastro) e em chapa metálica dobrada em forma de trapézio, formando um ângulo de 45° com a horizontal. As laterais, em madeira maciça, são aparafusadas ao lastro, dando rigidez ao conjunto. As chapas metálicas são colocadas no lastro por deslizamento, através das aberturas nos frontais da forma (Figura 4.1) e fixadas às laterais com espaçadores de madeira (bitolas). A espessura da telha é de 8mm. O peso do conjunto vazio é cerca de 21kg, e quando cheio, em torno de 36kg, podendo ser manuseado por uma só pessoa e mais facilmente por duas.

**FIGURA 4.1** – Molde em madeira e chapa metálica para confecção das telhas

Este modelo de telha minimiza o custo do madeiramento de cobertura, dispensando o uso de caibros, ripas, pregos e diminuindo a mão-de-obra. Permite um vão livre de 1,0m e requer apenas as terças de apoio nos extremos do vão. Foi utilizada uma tecnologia de produção que pode ser facilmente absorvida na construção popular, onde os usuários podem produzir para o seu próprio consumo.

Foram confeccionadas duas formas para realização do experimento, o que permitiu a produção simultânea de quatro telhas. A mistura era lançada sobre a chapa metálica e socada com uma espátula nas laterais entre a madeira e a chapa metálica. Após ser preenchida, a forma era vibrada através de golpes de martelo de borracha por cerca de um minuto, até a retirada das bolhas de ar existentes. O esquema apresentado na Figura 4.2 mostra alguns detalhes e medidas das formas utilizadas.

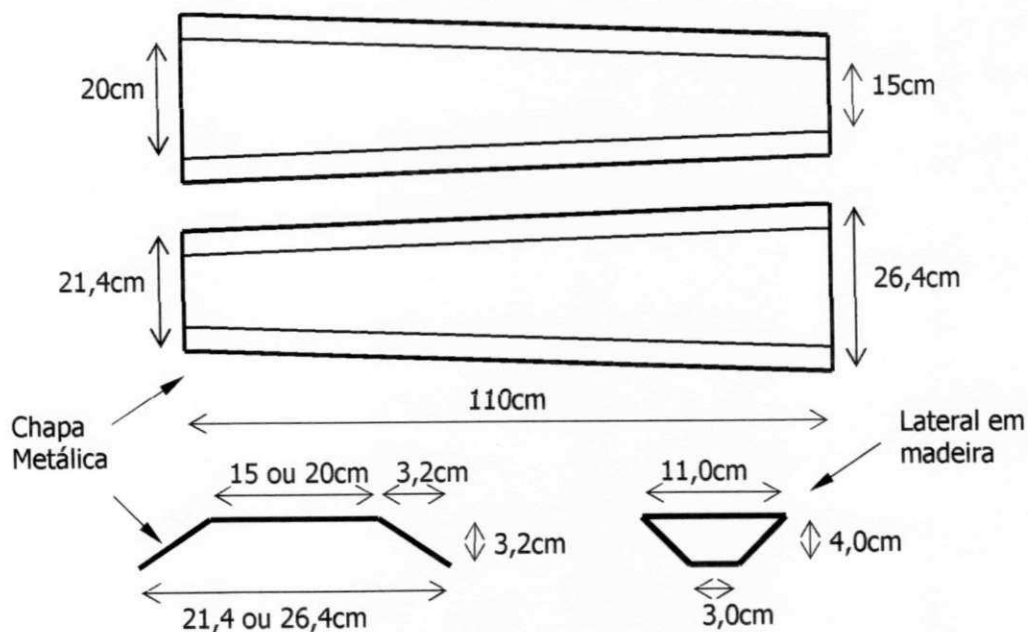


FIGURA 4.2 – Esquema da forma para moldagens das telhas (sem escala)

Uma relação água/cimento igual a 0,45 foi necessária para garantir a homogeneidade dos compósitos durante a mistura, em decorrência do emprego das fibras e de sua absorção de água.

Após 24 horas de repouso, as telhas eram retiradas das formas e imersas em água por 72 horas. Após esse período, foram curadas ao ar em ambiente de laboratório até o dia dos ensaios. Após 30 dias de cura ao ar, as telhas foram separadas em dois lotes. Sendo um lote colocado numa estrutura de cobertura de um modelo em escala real, construído para o ensaio de envelhecimento natural em condições de uso sob as intempéries, e o lote restante abrigado em ambiente de laboratório.

4.3 Envelhecimento Natural sob Condições de Uso

As telhas foram submetidas ao envelhecimento natural em um modelo em escala real (2,8m x 3,0m), simulando um cômodo de uma construção popular, na cidade de Campina Grande-PB (latitude 7° 08' S). A estrutura de cobertura foi executada em madeira serrada (7,5cm x 12cm), com uma inclinação de 10° em relação à horizontal, eixo longitudinal na orientação leste-oeste, face inclinada voltada para o Sul, em virtude da direção predominante dos ventos e das chuvas do local ser Sudeste, o que favorece os mecanismos de degradação natural (Figura 4.3).



FIGURA 4.3 – Telhas submetidas ao envelhecimento natural sob condições de uso no modelo em escala real

Para o modelo construído (área=8,4m²), foram necessárias 45 telhas, deixando-se um pequeno beiral para cada lado, resultando em 5,3 telhas por metro quadrado; cada telha pesando em torno 5kg, totalizando 26,5kg/m².

As telhas foram expostas às intempéries durante 21 meses, de outubro de 2001 a junho de 2003. Durante o referido período, as médias das principais características climáticas foram:

- temperatura máxima = 27,5°C; mínima = 19,2°C;
- umidade relativa = 82%; e
- precipitação mensal = 67mm.

4.4 Caracterização Física das Telhas

A caracterização física das telhas foi feita através da massa específica, porosidade e absorção das telhas, conforme metodologia citada no Capítulo 3. A determinação dessas três propriedades serviu para auxiliar na avaliação da influência da adição das fibras e da substituição do cimento por resíduo moído, bem como obter indicativos de como o envelhecimento natural atua nas telhas ao longo do tempo.

Além das propriedades citadas, também foi determinada a permeabilidade das telhas. O ensaio de permeabilidade das telhas foi executado segundo a recomendação da norma NBR 13858-2/87, para telhas de concreto, aos 28 dias. Esta metodologia também foi usada por SAVASTANO (2000) para telhas reforçadas por fibras. As telhas foram submetidas a uma coluna de água de 25cm de altura em um tubo de 4cm de diâmetro durante 24h (Figura 4.4).

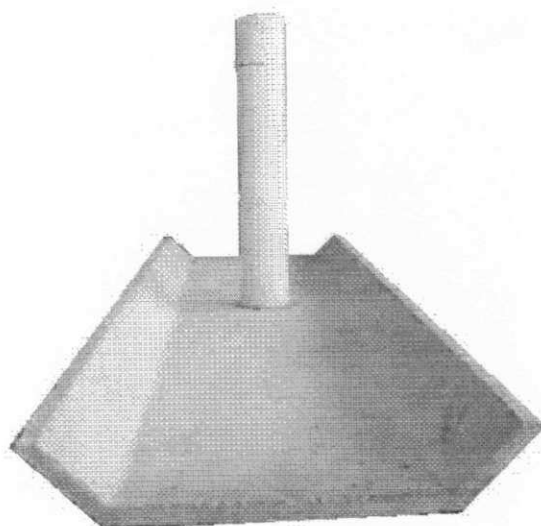


FIGURA 4.4 – Detalhe do ensaio de permeabilidade

4.5 Caracterização Mecânica das Telhas

Para caracterização mecânica das telhas foram realizados ensaios de flexão em três pontos, com um vão inferior de 100mm, utilizando-se corpos-de-prova prismáticos de 120x40x8 (mm), recortados das telhas, com três repetições por série (Figura 4.5).

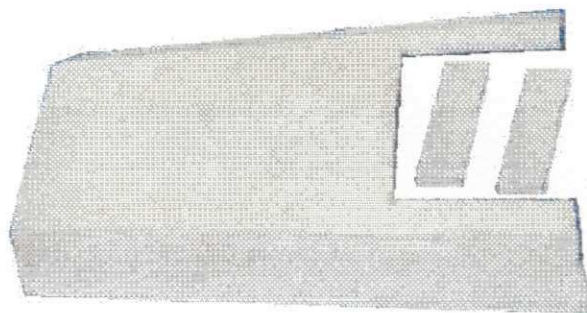


FIGURA 4.5 – Telha recortada para extração de corpos de prova

As propriedades mecânicas determinadas nas amostras recortadas das telhas foram: módulo de ruptura na flexão (MOR), módulo de elasticidade (MOE) e energia específica (EE), conforme metodologia já apresentada no Capítulo 3.

Aos 90 dias de cura em ambiente de laboratório, foi realizado um ensaio de capacidade de carga da telha inteira, através de um carregamento uniformemente distribuído (Figura 4.6). A telha foi colocada sobre dois apoios (vão livre = 1,0m) e sobre ela foi colocado um acessório de madeira (caixa sem fundo), dentro do qual foi colocada areia, que serviu como carga. Relógios comparadores foram instalados para acompanhar as deformações ocorridas conforme o carregamento a cada 5kg.

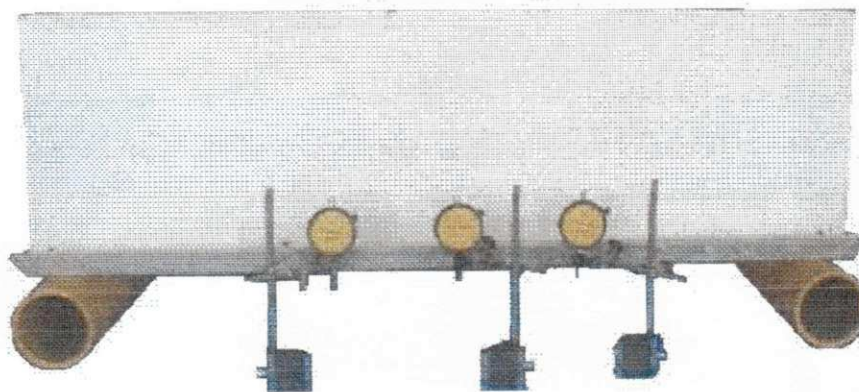


FIGURA 4.6 – Ensaio da capacidade de carga da telha inteira

4.6 Avaliação do Comportamento Térmico das Telhas

Visando determinar o comportamento térmico das telhas de cada tipo de mistura, foram construídos modelos reduzidos de telhados com 1,10m de comprimento por 1,0m de largura, a uma altura mínima do chão igual a 70cm e uma inclinação de 10% em relação à horizontal. Os modelos ficaram com face inclinada voltada para o Sul, a fim de receber a maior incidência solar possível nos meses estudados (fevereiro e março, hemisfério sul).

A estrutura de sustentação foi executada em vergalhão de construção de 10mm de diâmetro, dobrado e cravado sobre piso coberto com grama. Para efeito comparativo, além das três formulações de telhas já apresentadas, utilizou-se mais um modelo com telha ondulada de cimento-amianto de 5,0mm de espessura.

Cada modelo foi instrumentado com 2 termopares de cobre-constantan. Um colado na face interna das telhas para coletar a temperatura dessa superfície, e outro, instalado a 15cm abaixo da telha, no centro do modelo, para obtenção da temperatura de globo negro (diâmetro=5cm). Dessa forma, o globo negro sofre a influência do calor radiante transmitido pelas telhas, mas não recebe a incidência direta do sol (Figura 4.7).

Um datalogger da marca Campbell Scientific, modelo 21X, registrou as temperaturas dos modelos. Os dados de radiação global, precipitação, umidade relativa, temperatura do ar e velocidade do vento, foram coletados de uma estação meteorológica a poucos metros do local do experimento.



(a)



(b)

FIGURA 4.7 – Detalhes dos modelos usados no ensaio do comportamento térmico

4.7 Resultados e Discussão

4.7.1 Propriedades físicas das telhas

Aos 30 dias, a inclusão das fibras na matriz, juntamente com a substituição parcial do cimento pelo resíduo cerâmico, interferem nas propriedades físicas das telhas, reduzindo a massa específica em cerca de 5% e aumentando a absorção em 17% e a porosidade em 11%, em média. Isto ocorre porque, além do resíduo de bloco cerâmico e da fibra de sisal terem massas específicas menores, existe uma maior incorporação de ar durante a moldagem dessas misturas. A absorção após 24h de imersão foi inferior a 14% em todas as misturas, o que é aceitável pela NBR-13858-2/87.

Aos 120 e 270 dias, os resultados obtidos para as diferentes misturas apresentam diferença significativa para os níveis de significância adotados na análise de variância. Em virtude da hidratação do cimento, percebe-se um aumento médio de 6,4% da massa específica e uma redução média de 13% da absorção e de 9% da porosidade para os diferentes tipos de mistura, em relação aos resultados de 30 dias. Já para as diferentes condições de exposição, os resultados obtidos para as propriedades físicas apresentam-se estatisticamente iguais, com exceção da massa específica aos 270 dias.

Os resultados obtidos estão em acordo com resultados obtidos por outros trabalhos. SAVASTANO (2000) obteve absorção de 13% aos 28 dias e de 12,3% após 16 meses de envelhecimento natural para telhas à base de escória ativada por cal com 2% de fibras de sisal e polpa de eucalipto; já para massa específica esse autor obteve, aos 28 dias, 1,88 kg/dm³.

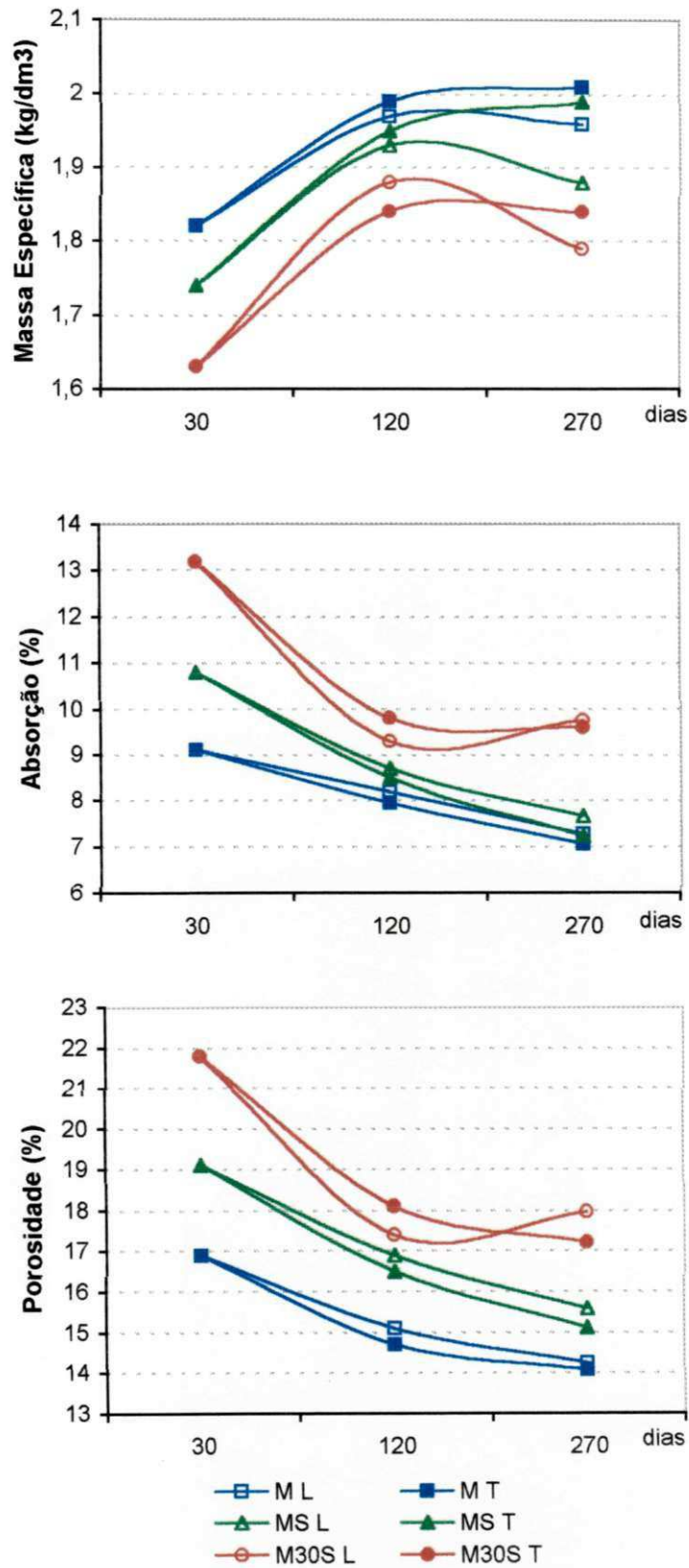
Na Tabela 4.2 são apresentados os resultados obtidos ao longo de 270 dias de ensaio. A variação das propriedades físicas para cada mistura no período estudado pode ser visualizada nos gráficos da Figura 4.8.

TABELA 4.2 – Variação das propriedades físicas das telhas com o tempo (dia)

Mistura	Massa Específica (kg/dm ³)					Absorção (%)					Porosidade (%)				
	30d	120d		270d		30d	120d		270d		30d	120d		270d	
	L	L	T	L	T	L	L	T	L	T	L	L	T	L	T
M	1,80	1,97	1,99	1,96	2,01	9,1	8,2	7,9	7,3	7,1	16,9	15,1	14,7	14,2	14,1
MS	1,74	1,93	1,95	1,88	1,99	10,8	8,7	8,5	7,7	7,2	19,1	16,9	16,5	15,6	15,1
M30S	1,63	1,88	1,84	1,79	1,84	13,2	9,3	9,8	9,8	9,6	21,8	17,4	18,1	18,0	17,2

Legenda: d - dias, *L* - amostras mantidas em laboratório, *T* - amostras submetidas ao intemperismo natural.

M - matriz 1:1,5; 30 - % de substituição; S - 2% de fibra de sisal.



M - matriz 1:1,5; 30 - % de substituição; S - 2% de fibra de sisal.
 L - amostras mantidas em laboratório, T - amostras submetidas ao intemperismo natural.

FIGURA 4.8 – Variação das propriedades físicas das telhas ao longo do tempo

4.7.2 Ensaio de permeabilidade

Os resultados da permeabilidade foram satisfatórios para todas as misturas. As amostras apresentaram apenas manchas, sem a formação de gotas na face inferior da telha após 24h, atendendo às condições da norma NBR 13858-2/87. Na Figura 4.9 pode ser vista a face inferior de algumas telhas.

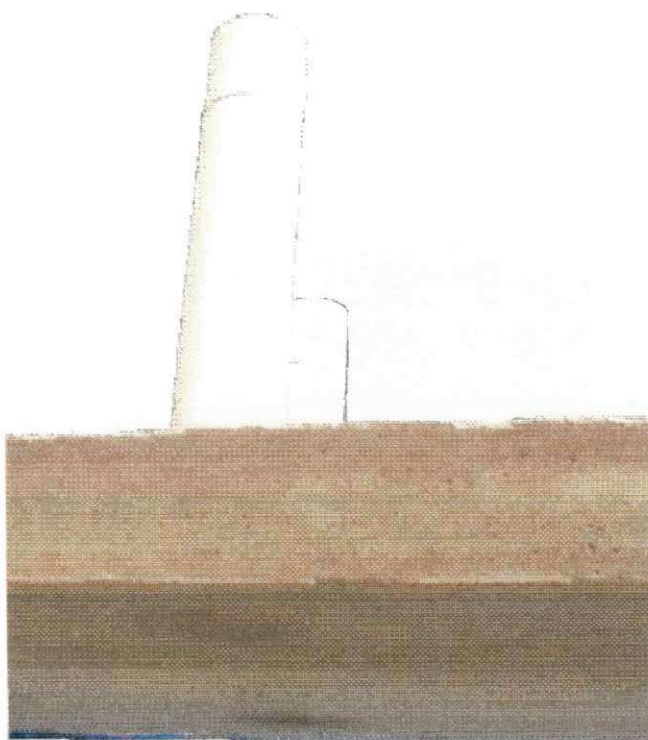


FIGURA 4.9 – Face inferior de telhas submetidas ao ensaio de permeabilidade

4.7.3 Propriedades mecânicas das telhas

4.7.3.1 – Capacidade de carga da telha inteira

Os resultados do ensaio de capacidade de carga da telha inteira aos 90 dias de cura em ambiente de laboratório, através de um carregamento uniformemente distribuído, estão apresentados na Tabela 4.3.

TABELA 4.3 – Capacidade de carga distribuída máxima da telha inteira, aos 90 dias

Mistura	Carga máx. p/ telha (kg) – CV (%)	Deflexão máxima (mm)
M	175 - (6,5)	2,70
MS	157 - (11,2)	3,35
M30S	145 - (9,7)	3,56

CV – coeficiente de variação

As telhas com fibras apresentam uma deflexão máxima média cerca de 28% maior que a telha sem fibras e suportam uma carga distribuída final média 16% menor. A carga distribuída suportada por cada telha individualmente seria o equivalente a uma carga distribuída acima de 800kg/m².

4.7.3.2 – Propriedades mecânicas em corpos-de-prova recortados das telhas.

Os resultados da caracterização mecânica dos corpos-de-prova recortados das telhas sob as diferentes condições de exposição e em diferentes idades estão apresentados nas Tabelas 4.4 a 4.6 e as Figuras 4.10 a 4.12 mostram a evolução das propriedades mecânicas das telhas.

Aos 30 dias, comparando-se a mistura de referência M e as misturas MS e M30S, percebe-se que estas reduziram o módulo de ruptura (MOR) e o módulo de elasticidade (MOE) das telhas em 22% e 42%, respectivamente. Estas misturas apresentaram uma maior capacidade de absorver energia após a fissura da matriz, aumentando a energia específica (EE) em 50% (MS) e 6% (M30S), respectivamente.

Aos 90 dias, o desempenho mecânico das telhas com fibras as diferenciou positivamente em relação à energia específica. As telhas com fibras de sisal apresentaram um aumento médio da EE de 33% para as misturas mantidas em laboratório e 25% para as submetidas ao intemperismo, quando comparadas com a telha sem fibras nas mesmas condições de exposição.

Aos 270 dias, ocorre uma certa estabilização do módulo de ruptura em todas as misturas estudadas, ficando sempre acima de 6,0MPa durante o restante do experimento. Já o MOE foi aumentado com o passar do tempo, tornando as amostras mais frágeis, conseqüentemente havendo uma diminuição da energia absorvida após fissuração. A partir dessa data, percebe-se que as misturas com fibras não conseguiram manter o incremento da tenacidade nas telhas submetidas ao intemperismo natural. A partir desta data os sinais de degradação das fibras e da interface fibra-matriz se tornam evidentes, refletidos através da perda de parte da capacidade de absorver energia após a fissuração da matriz.

Ao final do período analisado, 660 dias, somente as telhas da mistura M30S mantidas em laboratório apresentaram uma pequena absorção de energia após a fissuração da matriz, não influenciando no cálculo da tenacidade, de acordo com os critérios adotados. Dois fatores podem ter contribuído para isto: a presença do material pozolânico proveniente do resíduo moído de bloco cerâmico, o que reduziu o ataque alcalino às fibras; e uma menor variação dimensional das fibras no interior da matriz, como conseqüência de uma menor variação da umidade do ambiente, para essa condição de exposição.

Os resultados obtidos estão em acordo com resultados obtidos por outros trabalhos. SAVASTANO (2000) reportou os resultados alcançados para telhas à base de escória ativada por cal com 2% de fibras de sisal e polpa de eucalipto, obtendo de energia específica (EE) 0,49kJ/m² aos 28 dias e 0,14kJ/m² aos 16 meses de envelhecimento natural; e para o módulo de ruptura (MOR), obteve 5,3MPa após 18 meses de cura em laboratório e 2,5MPa após 16 meses de envelhecimento sob intemperismo natural.

TABELA 4.4 – Módulo de ruptura à flexão das telhas, (MOR)

Mistura	MOR (MPa)														
	30d	90d		180d		270d		360d		480d		570d		660d	
	L	L	T	L	T	L	T	L	T	L	T	L	T	L	T
M	3,6	3,9	6,1	4,2	7,8	6,8	8,6	7,0	9,3	7,3	8,9	7,6	9,2	7,9	9,0
MS	2,8	3,2	5,3	3,8	6,8	6,3	8,5	6,6	9,1	6,8	8,7	7,5	8,6	7,6	8,7
M30S	2,1	2,3	3,4	2,6	4,1	5,8	8,1	6,2	8,5	6,2	8,1	6,6	7,3	6,8	7,2

Legenda: d - dias, L - amostras mantidas em laboratório, T - amostras submetidas ao intemperismo natural.
M - matriz 1:1,5; 20, 30 e 40 - % de substituição; S - 2% de fibra de sisal; P1, P2 e P3 - tensão de prensagem (1,2; 2,4 e 3,6MPa, respectivamente).

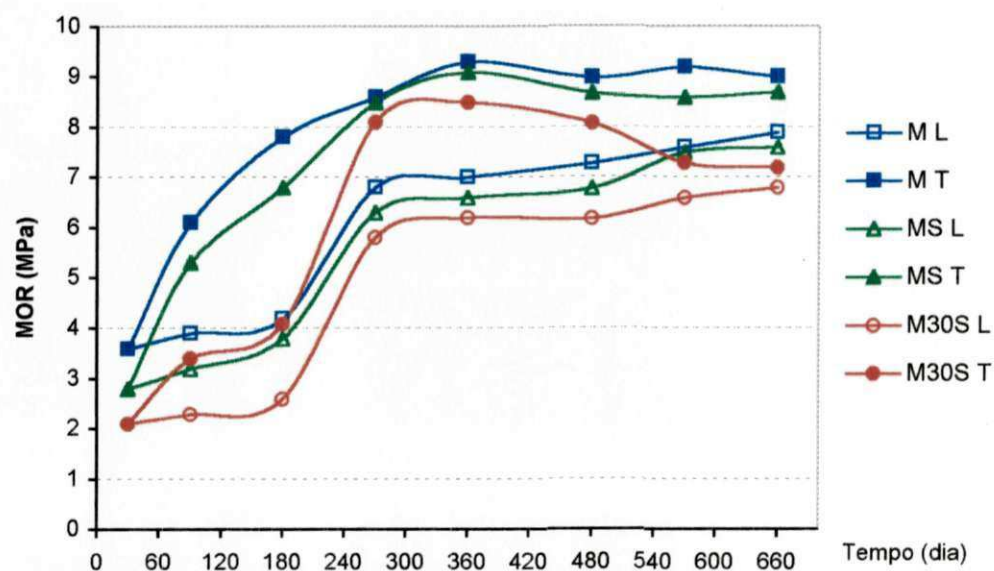


FIGURA 4.10 – Variação do módulo de ruptura (MOR) das telhas

TABELA 4.5 – Módulo de elasticidade das telhas, MOE

Mistura	MOE (GPa)														
	30d	90d		180d		270d		360d		480d		570d		660d	
	L	L	T	L	T	L	T	L	T	L	T	L	T	L	T
M	1,7	3,0	3,7	2,4	3,8	2,7	4,6	3,3	4,3	5,2	6,1	5,1	5,9	5,3	5,7
MS	1,5	2,8	3,0	3,0	3,6	3,2	3,9	3,4	3,8	3,5	4,4	3,8	4,5	4,1	5,1
M30S	1,3	1,7	2,1	1,2	1,9	1,8	2,6	2,7	3,2	4,1	4,7	4,7	5,7	4,6	5,4

Legenda: d - dias, L – amostras mantidas em laboratório, T – amostras submetidas ao intemperismo natural.
 M - matriz 1:1,5; 20, 30 e 40 - % de substituição; S - 2% de fibra de sisal; P1, P2 e P3 - tensão de prensagem (1,2; 2,4 e 3,6MPa, respectivamente).

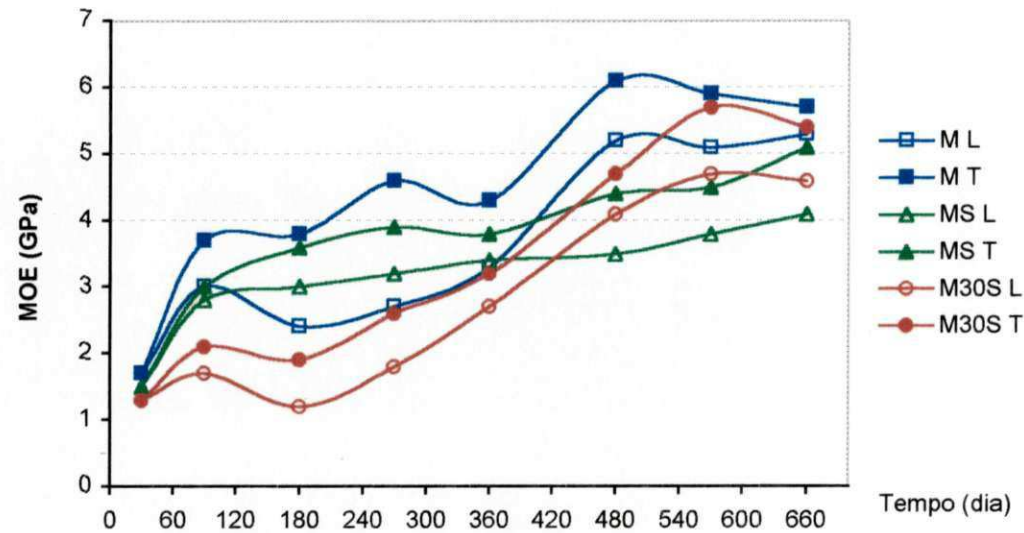


FIGURA 4.11 – Variação do módulo de elasticidade (MOE) das telhas

TABELA 4.6 – Energia específica das telhas (EE)

Mistura	Energia Específica (kJ/m ²)															
	30d		90d		180d		270d		360d		480d		570d		660d	
	L	T	L	T	L	T	L	T	L	T	L	T	L	T		
M	0,16	0,22	0,18	0,27	0,20	0,24	0,19	0,22	0,17	0,23	0,18	0,21	0,15	0,14		
MS	0,24	0,29	0,26	0,25	0,21	0,19	0,12	0,18	0,11	0,16	0,12	0,11	0,11	0,10		
M30S	0,17	0,26	0,22	0,23	0,20	0,21	0,14	0,20	0,12	0,18	0,08	0,15	0,06	0,13		

Legenda: d - dias, L - amostras mantidas em laboratório, T - amostras submetidas ao intemperismo natural.
 M - matriz 1:1,5; 20, 30 e 40 - % de substituição; S - 2% de fibra de sisal; P1, P2 e P3 - tensão de prensagem (1,2; 2,4 e 3,6MPa, respectivamente).

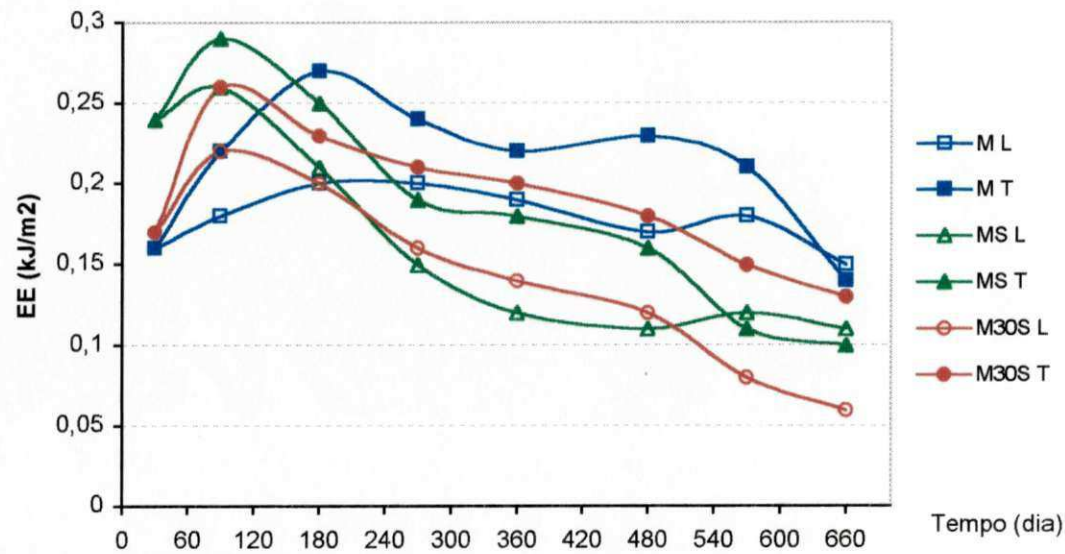


FIGURA 4.12 – Variação da Energia Específica (EE) das telhas

As telhas submetidas ao intemperismo natural apresentaram valores de módulo de ruptura superiores aos das telhas abrigadas em laboratório. Além disso, ocorreram aumento da massa específica e diminuição da absorção e da porosidade, demonstrando que os processos de hidratação e carbonatação foram mais intensos para essa condição de exposição. Esta carbonatação favorece as fibras contra o ataque alcalino, visto que ela reduz o pH da matriz e foi mais intensa na mistura com substituição parcial do cimento.

Para comprovação dessa carbonatação, foi feita uma avaliação qualitativa usando uma solução de 2% de fenolftaleína em etanol anidro borrifada sobre as superfícies fraturadas das telhas e dos corpos de prova. Na Figura 4.13 podem ser vistas telhas das misturas MS e M30S submetidas ao intemperismo natural aos 570 dias. A superfície de fratura da telha da mistura M30S está totalmente carbonatada, enquanto a da mistura MS ainda está alcalina.

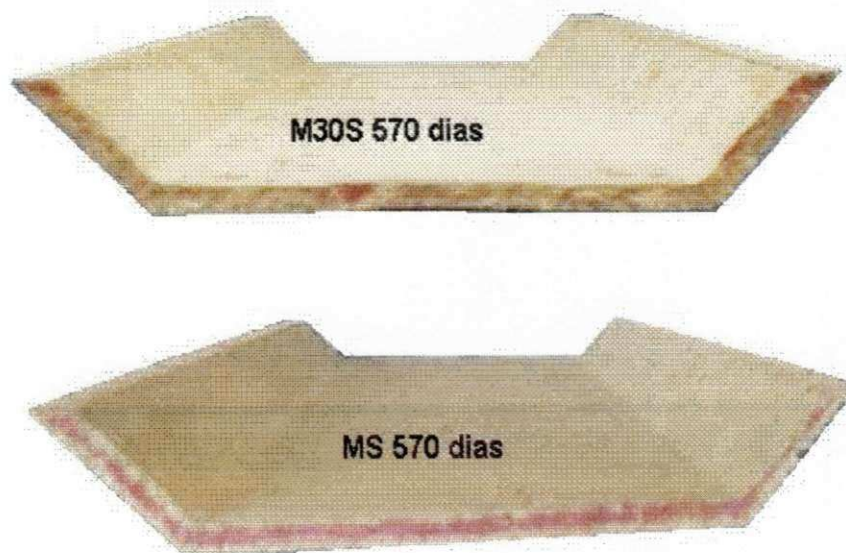


FIGURA 4.13 – Superfície de fratura de telhas submetidas ao intemperismo natural após 570 dias de envelhecimento

Na Figura 4.14 podem ser vistos corpos de prova de flexão recortados das telhas das misturas MS e M30S submetidas ao intemperismo natural em diferentes idades. A superfície de fratura da mistura M30S aos 120 dias ainda apresenta alcalinidade no centro da amostra e aos 270 dias já está totalmente carbonatada, enquanto os corpos de prova da mistura MS permanecem alcalinos ao longo do tempo do ensaio.



FIGURA 4.14 – Superfície de fratura de corpos de prova retirados de telhas submetidas ao intemperismo natural em diferentes idades

Apesar de apresentar-se quase que totalmente carbonatada aos 120 dias, a matriz com a substituição de cimento Portland por resíduo moído de bloco cerâmico não conseguiu evitar a perda de tenacidade do compósito com o tempo, provavelmente em virtude de danos causados à interface fibra-matriz pelas intempéries e pela variação dimensional das fibras. JOHN et al. (1997) alertam que variações nas dimensões das fibras em função de mudanças no seu teor de umidade podem gerar danos generalizados na interface fibra-matriz, e assim contribuir para a queda do comportamento mecânico no longo prazo.

4.7.4 Análise do comportamento térmico das telhas

As temperaturas dos modelos foram coletadas durante os meses de fevereiro e março de 2003 e, de acordo com os dados climáticos registrados pela estação meteorológica próxima ao local, foi escolhido para análise o dia 01/03/2003, que apresentou a maior média de radiação global de todos os dias observados, ocorrida entre 11:00h e 13:00h. Neste dia, o pico da radiação global ocorreu às 12:10h, apresentando os seguintes valores para este horário:

- radiação global : 1175W/m²;
- velocidade do vento : 2,5m/s;
- temperatura do ar : 29,5°C;
- umidade relativa : 52,8%;
- precipitação : 0,0 mm.

A Figura 4.15 apresenta as temperaturas na superfície inferior das telhas e a radiação global. As temperaturas da superfície das telhas acompanharam as oscilações da radiação global e também receberam a influência da temperatura do ar. As telhas atingiram a temperatura máxima simultaneamente às 12:20h. A maior temperatura de superfície, $45,5^{\circ}\text{C}$, foi atingida pelas telhas com 30% de material pozolânico. Uma justificativa seria a sua coloração mais escura em função do teor de óxido de ferro existente no resíduo cerâmico, causando um maior acúmulo de calor.

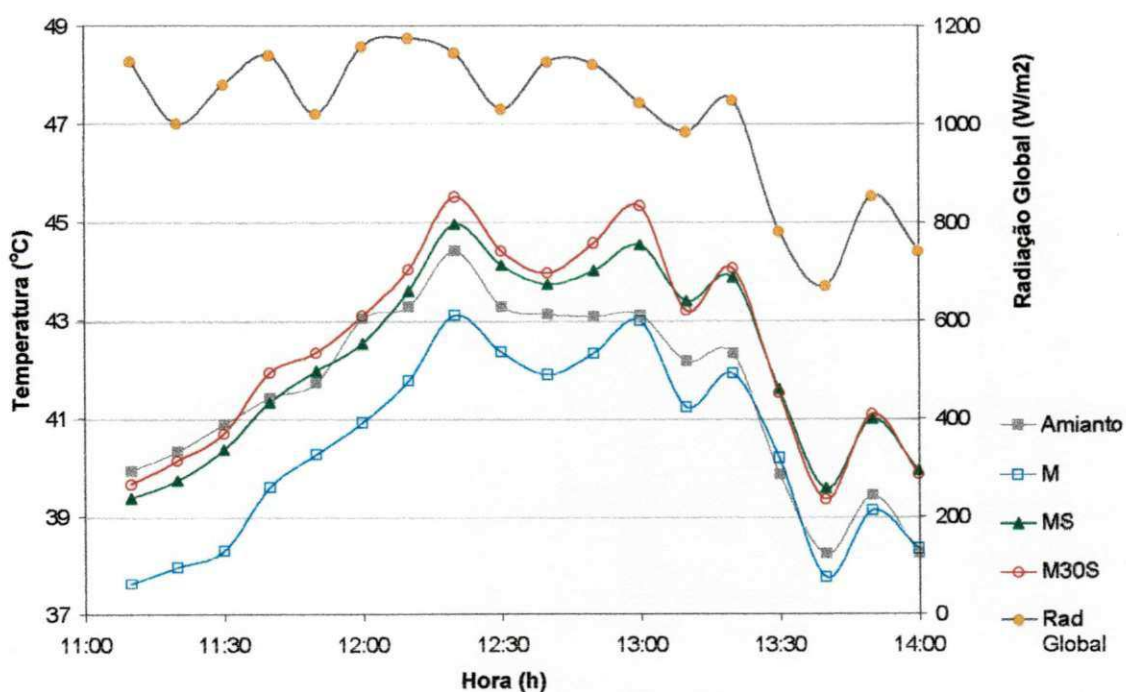


FIGURA 4.15 – Influência da radiação global na temperatura de superfície inferior dos diversos tipos de telhas

As temperaturas de globo negro (TGN) e as variações da radiação global são apresentadas na Figura 4.16. As temperaturas de globo negro foram aumentando em função do calor acumulado que foi recebido através da radiação emitida pelas telhas. As maiores temperaturas de globo negro ocorreram às 13h. A maior delas foi $37,9^{\circ}\text{C}$ para telhas de amianto, seguida pela matriz com fibra ($\text{TGN}_{\text{MS}} = 37,5^{\circ}\text{C}$), pela matriz sem fibras ($\text{TGN}_{\text{M}} = 37,3^{\circ}\text{C}$) e pela matriz com substituição e fibras ($\text{TGN}_{\text{M30S}} = 36,9^{\circ}\text{C}$).

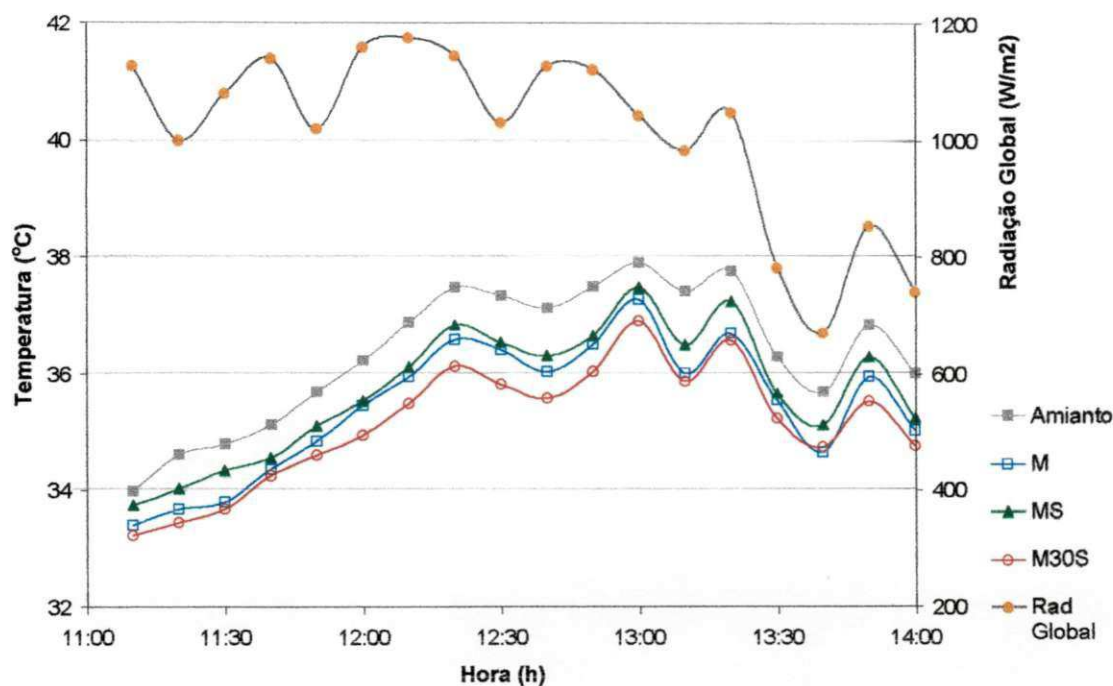


FIGURA 4.16 – Influência dos diversos tipos de telhas na temperatura de globo negro

As telhas com 30% de substituição do cimento emitiram menos calor radiante que as demais no período analisado. Isto ficou evidenciado pelas menores temperaturas de globo negro, apesar de apresentarem as maiores temperaturas de superfície no mesmo período. Essa mistura foi a que apresentou a menor massa específica bem como a maior porosidade entre as misturas analisadas. Estes fatos aliados à introdução de 2% de fibra de sisal foram os responsáveis pelo melhor comportamento térmico dessa mistura.

4.8 Conclusões Parciais

Este capítulo apresenta uma alternativa para o problema de cobertura de casas populares, utilizando matérias-primas locais disponíveis, baixa tecnologia de produção e custos compatíveis com a realidade do público alvo.

O modelo de telha proposto tem um processo de produção muito simples, não requer investimentos elevados e nem mão-de-obra especializada para sua operação; dispensa a utilização de caibros e ripas na cobertura; apresenta uma ótima estanqueidade, através de um bom encaixe; permite o ajuste às dimensões dos cômodos; e tem um aspecto visual bastante agradável.

Os resultados obtidos para as principais propriedades físicas atenderam aos requisitos das normas. O ensaio de permeabilidade não detectou geração de gotas na superfície inferior da telha após 24h sob ação de 250mm de coluna d'água; e a absorção de água não chegou a 13% em massa após imersão por 24h.

Quanto ao desempenho mecânico, a principal vantagem das telhas reforçadas com fibras foi o aumento da energia absorvida após a fissuração nas primeiras idades, em relação ao padrão sem fibras, o que é importante para se evitar ruptura frágil das telhas durante transporte e instalação, por causa dos esforços dinâmicos envolvidos.

As telhas reforçadas com fibras mostraram uma boa capacidade de carga distribuída e um módulo de ruptura na flexão médio acima de 6,0MPa. Porém, apresentaram uma redução da capacidade de absorção de energia após o pico de carga aplicada com o passar do tempo, em virtude da degradação das fibras e de sua interface com a matriz.

Embora a tenacidade seja reduzida com o passar do tempo, as telhas colocadas no modelo de um cômodo em escala real para envelhecimento em situação de uso permanecem até o momento (mais de 800 dias) com uma boa aparência e sem apresentar alteração estrutural ou perda de impermeabilidade que comprometa a sua utilização.

As telhas com fibras de sisal apresentaram melhor comportamento térmico que a telha comercial mais utilizada nas construções populares no país, a telha de cimento-amianto. O modelo reduzido das telhas com fibras e substituição parcial do cimento pelo resíduo de bloco cerâmico foi o de melhor desempenho térmico, apresentando as menores temperaturas de globo negro.

Estudos futuros serão necessários visando melhorar a tenacidade e durabilidade das telhas reforçadas com fibras de sisal em idades avançadas, podendo incluir tratamento prévio das fibras, adensamento mais eficiente e impermeabilização da matriz, porém com o compromisso de manter um baixo custo de produção.

CAPÍTULO 5

COMPÓSITOS LEVES UTILIZANDO RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DE CALÇADOS E FIBRAS DE SISAL

5.1 Generalidades

A maioria dos estudos na área de materiais compósitos à base de cimento com reforço de fibras naturais utiliza agregados de densidade normal. Aqui foi reaproveitado um resíduo da indústria de calçados para obtenção de um agregado leve, a ser utilizado no desenvolvimento de um compósito leve reforçado com fibra de sisal destinado à construção civil.

Devido à disponibilidade desse resíduo e do seu baixo custo, espera-se que sua utilização ajude a preservar o meio-ambiente, reduza o custo final dos produtos e melhore o conforto térmico das habitações. A meta é desenvolver materiais compósitos leves e resistentes para serem utilizados na produção de elementos pré-fabricados para construção civil, tais como painéis divisórios, forros, revestimentos, etc, com e sem reforço de fibras de sisal.

Este capítulo relata o estudo da durabilidade com caracterização física e mecânica; e o estudo do comportamento térmico dos compósitos leves. Para tanto, foram determinadas propriedades físicas e mecânicas dos compósitos expostos em ambiente de laboratório e sob intemperismo natural. Também foi realizado um estudo de comportamento térmico comparando os compósitos leves produzidos com uma argamassa normal.

5.2 Materiais Compósitos Leves à Base de Cimento

5.2.1 Concreto leve

Segundo PETRUCCI (1973), o concreto para ser considerado leve deve ter um valor máximo de massa específica de 2000kg/m^3 . Para SOUZA SANTOS (1992), não existe uma definição geral para concreto leve, o termo pode ser aplicado a qualquer concreto que tenha uma massa específica inferior à 2400kg/m^3 . Já NEVILLE (1997) afirma que o concreto é chamado leve quando apresenta massa unitária variando entre 300 e 1800kg/m^3 e resistência à compressão simples entre 0,3 e 70MPa.

Em virtude de possuir massa específica significativamente inferior às dos convencionais, os concretos leves proporcionam às edificações algumas vantagens, como por exemplo:

1. alívio de carga na estrutura e fundação;
2. redução no consumo de forma e ferragem;
3. aumento da produtividade;
4. maior isolamento térmico e acústico.

Contudo, na maioria das vezes, existem algumas limitações no uso de concretos leves, como por exemplo:

1. maior consumo de cimento;
2. maior absorção de água;
3. menor resistência que os concretos convencionais e;
4. difícil controle da relação água/cimento da mistura.

Segundo PETRUCCI (1973), para se obter o concreto leve é necessário a redução do seu peso através da formação de vazios por um desses três processos:

1. concretos com agregados leves – os agregados utilizados têm estrutura 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 desse concreto varia de 950 a 2000kg/m^3 . A resistência varia no mesmo sentido da massa específica, acontecendo o inverso com o isolamento térmico;

2. concretos sem finos – obtidos pela confecção de concretos sem agregado miúdo. Moderadamente leves, de boa qualidade como isolante térmico e baixa resistência mecânica. A massa específica varia de 700 a 1800kg/m³,
3. concretos porosos, celulares ou aerados – obtidos pela formação de gases ou espumas estáveis, aprisionadas no interior da massa. São especialmente leves, com massa específica compreendida entre 300 e 1200kg/m³, de ótimo comportamento como isolante térmico, mas de baixa resistência mecânica.

5.2.2 Concretos com agregados leves

Os agregados leves podem ser classificados como naturais ou obtidos por processo industrial. Os agregados leves naturais são na sua maioria de origem vulcânica, como por exemplo: as pedras pomes. Esses agregados são encontrados em poucos locais do mundo e por isso não são muito utilizados (NEVILLE, 1997).

Os agregados obtidos por processo industrial passam por uma expansão térmica, através de fornos rotativos, nos quais as partículas são expostas a temperaturas que podem chegar até 1200°C, provocando uma rápida expansão dos gases que se encontram dentro da massa do agregado, formando uma estrutura porosa que se mantém após o resfriamento, reduzindo assim sua massa específica aparente. Podem ser provenientes de matéria-prima natural beneficiada (argila, vermiculita, ardósia, folhelho, perlita, etc) ou de subprodutos industrializados (cinza volante, escória de alto forno, resíduos de minas de carvão, etc). Pode-se obter a granulometria desejada através de britagem do agregado, tanto antes da calcinação quanto após o resfriamento. Em geral, esse agregado possui massa unitária entre 300 a 650kg/m³ (NEVILLE, 1997).

Segundo SPRATT (1960) apud GARLET (1998), a massa unitária do concreto com agregados leves é função da granulometria do agregado, do teor de umidade, do traço e do grau de compactação do concreto. E, em função do valor da sua massa unitária, têm-se as seguintes aplicações desse tipo de concreto:

1. de 300 a 800kg/m³: utilizado para fins de isolamento térmico;
2. de 800 a 1350kg/m³: utilizado para fins de vedação;
3. acima de 1350kg/m³: utilizado para fins estruturais.

Na Tabela 5.1 é apresentada uma classificação funcional dos concretos com agregados leves segundo a Réunion Internationale de Laboratoire d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions (RILEM, 1978).

TABELA 5.1 - Classificação funcional dos concretos leves com agregados leves

Classe	I	II	III
Utilização do concreto	Estrutural	Vedação	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

Outras características também podem ser ressaltadas. A trabalhabilidade do concreto com agregado leve é prejudicada pela absorção de parte da água de amassamento pelo agregado. É recomendado molhar ou saturar o agregado leve antes do momento da mistura. A água absorvida pelo grão antes da mistura não interfere na resistência do concreto, pois não provocará vazios e contribuirá para a aderência entre o agregado e a argamassa, proporcionando a hidratação do cimento anidro remanescente. Esse fenômeno ocorre exatamente na interface agregado-pasta, o que resulta no fortalecimento da região. Esta água absorvida pelo agregado não deve ser computada na determinação da relação água/cimento (NEVILLE, 1997).

A permeabilidade dos concretos com agregados leves não é afetada pela sua alta porosidade, pois, em geral, os poros não estão interligados. Já a carbonatação é favorecida devido os poros facilitarem a propagação do CO_2 (NEVILLE, 1997).

5.2.3 Concreto sem finos

Neste tipo de concreto o agregado miúdo não faz parte da composição. É constituído somente por aglomerante, agregado graúdo e água. Geralmente, apresenta resistência à

compressão entre 1,5 e 14MPa, dependendo da massa unitária, e esta é função do teor de cimento e da granulometria e densidade do agregado.

Em virtude da baixa coesão da mistura, deve-se esperar o tempo necessário para que o material torne-se firme o suficiente para ser retirado da forma. A cura é importante, devido à pequena espessura da pasta de cimento. A resistência à tração na flexão dos concretos sem finos é cerca de 30% da resistência à compressão, portanto maior que a do concreto convencional, que em geral é 15% (NEVILLE, 1997).

5.3 Materiais Utilizados

5.3.1 Cimento, fibra vegetal e resíduo cerâmico

Utilizou-se cimento Portland tipo CII-Z-32, 2% de fibra de sisal (em volume) e o material pozolânico produzido a partir do resíduo moído de blocos cerâmicos, cujas caracterizações estão relatadas no Capítulo 3. Na intenção de obter compósitos leves, não se utilizou areia como agregado miúdo, em seu lugar foi utilizado um agregado leve obtido de resíduos da indústria de calçados.

5.3.2 Agregados leves de resíduos da indústria de calçados

Durante a fabricação de calçados em EVA (etileno acetato de vinila) surgem as sobras do processo de corte dos elementos e as peças refugadas pelo controle de produção. Esses retalhos e refugos de placas e solas de EVA (Figura 5.1) foram usados nesta pesquisa para produção de um agregado leve. Os resíduos foram coletados em uma indústria de calçados na cidade de Campina Grande-PB e triturados em um moinho de facas rotativas (Figura 5.2). Agregados leves de diferentes dimensões foram obtidos através de peneiras de diferentes aberturas (Figura 5.3), colocadas à saída do moinho e aparados em sua gaveta frontal. De acordo com a aplicação selecionou-se a abertura da peneira mais adequada.

O agregado de EVA escolhido foi submetido a ensaios de caracterização física; foram eles: 1) massa unitária no estado solto (NBR 7251); 2) absorção de água (NBR 7973); e composição granulométrica (NBR 7217).



FIGURA 5.1 – Resíduos de placas e solas de EVA



FIGURA 5.2 – Moinho triturador de facas rotativas

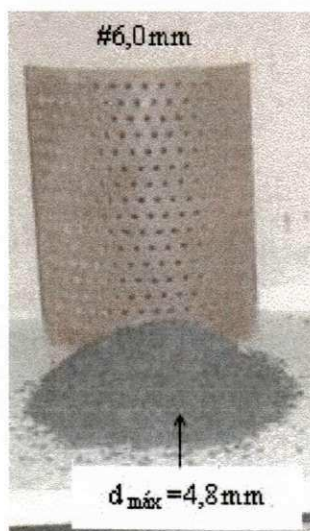


FIGURA 5.3 – Abertura da peneira e dimensão máxima do agregado obtido

5.4 Preparação dos Compósitos Leves

Foram elaboradas três misturas no traço 1:3 (aglomerante:agregado leve) em volume. Na primeira mistura foi utilizado 100% de cimento Portland CPII-Z-32, aqui chamada de **CB**. Na segunda mistura, chamada de **CB30**, houve a substituição de parte do cimento Portland por material pozolânico obtido do resíduo moído de blocos cerâmicos, ficando o “aglomerante” da mistura constituído de 70% de cimento e 30% de resíduo moído de blocos cerâmicos. A terceira mistura, chamada de **CB30S**, similar a segunda e acrescida de 2% de fibra de sisal (2,5-3,0cm) em relação volume do compósito (Tabela 5.2).

TABELA 5.2 - Misturas desenvolvidas para produção de compósitos leves

Mistura	Traço (volume)	Aglomerante		Agregado de EVA	Fibra (%)	Fator a/agl
		Cimento	RMBC			
CB	1:3	1	0	3	0	0,5
CB30		0,7	0,3	3	0	
CB30S		0,7	0,3	3	2	

RMBC – resíduo moído de bloco cerâmico; a/agl – água/aglomerante.

As misturas foram preparadas manualmente, na seguinte ordem de colocação dos componentes no recipiente de preparo:

1. colocou-se todo o agregado de EVA (pré-umedecido);
2. adicionou-se o “aglomerante” e a fibra (3ª mistura), misturando a massa uniformemente;
3. adicionou-se a água, misturando até obter homogeneidade da mistura.

O tempo de pré-umedecimento do agregado foi fixado em 10 minutos de completa imersão em água, o suficiente para garantir cerca de 35% de absorção. A quantidade de água absorvida foi determinada através de pesagem antes e depois da pré-molhagem.

No ato da mistura o agregado leve estudado se deforma e libera parte da água pré-absorvida para a massa, dificultando o cálculo da água a ser colocada na mistura. Portanto, para garantir um maior controle sobre a quantidade de água utilizada, a relação água/aglomerante foi fixada em 0,5 para todo o processo, o suficiente para permitir a

homogeneidade da massa e moldagem das placas nas três misturas. Assim sendo, o fator água/aglomerante final foi determinado pelo somatório entre a água pré-absorvida e a água acrescentada à mistura, contrariando o recomendado por NEVILLE (1997).

5.5 Estudo da Durabilidade dos Compósitos Leves

O estudo da durabilidade dos compósitos leves seguiu a mesma metodologia dos compósitos estruturais (Capítulo 3). Foram determinadas as propriedades físicas dos compósitos aos 30 e 90 dias. As propriedades mecânicas foram determinadas após 30, 90 e 210 dias.

5.5.1 Caracterização física dos compósitos leves

Foram determinadas as propriedades físicas: massa específica, absorção de água e porosidade dos compósitos leves segundo a NBR 9778/87 (ver Item 3.4.1 do Capítulo 3).

5.5.2 Caracterização mecânica dos compósitos leves

5.5.2.1 Resistência à compressão simples

Os compósitos leves foram caracterizados tanto à compressão simples quanto à flexão em três pontos. Para realização dos ensaios de resistência à compressão simples foram moldados quinze corpos-de-prova cilíndricos (diâmetro (\varnothing)=5cm) e altura (h=10cm)) para cada mistura. Após 24 horas foram desmoldados e curados ao ar até serem ensaiados.

5.5.2.2 Resistência à flexão

Foram produzidas quatro placas para cada mistura, com dimensões 250x250(mm) e espessura de 14mm. A massa foi lançada, espalhada e nivelada no molde metálico (Figura 5.4), sendo em seguida vibrada por trinta segundos em mesa vibratória. Após a vibração, as placas foram cobertas com um plástico e deixadas em repouso durante 24h, para então serem retiradas das formas. Para evitar uma perda rápida e excessiva de umidade, em virtude da pequena espessura e da área de superfície exposta, as placas produzidas foram

acondicionadas em um saco plástico durante três dias, sendo em seguida colocadas ao ar para cura em ambiente de laboratório por 30 dias.

Para a realização dos ensaios de flexão em três pontos (Figura 5.5), foram recortados três corpos-de-prova prismáticos de $120 \times 40 \times 14 \text{ mm}^3$ das placas produzidas para cada tipo de mistura. Foram determinados: módulo de ruptura (MOR), módulo de elasticidade (MOE) e energia específica (EE) das amostras, conforme metodologia descrita no Item 3.5.3, diferenciando-se apenas no tocante ao critério usado para o cálculo da tenacidade. Aqui, em virtude das grandes deformações alcançadas, não pode ser usado o critério da redução da carga aplicada a 25% da carga máxima atingida e sim um limite de deformação no meio do vão igual a 6,0mm.



FIGURA 5.4 – Molde metálico usado para confecção dos compósitos leves

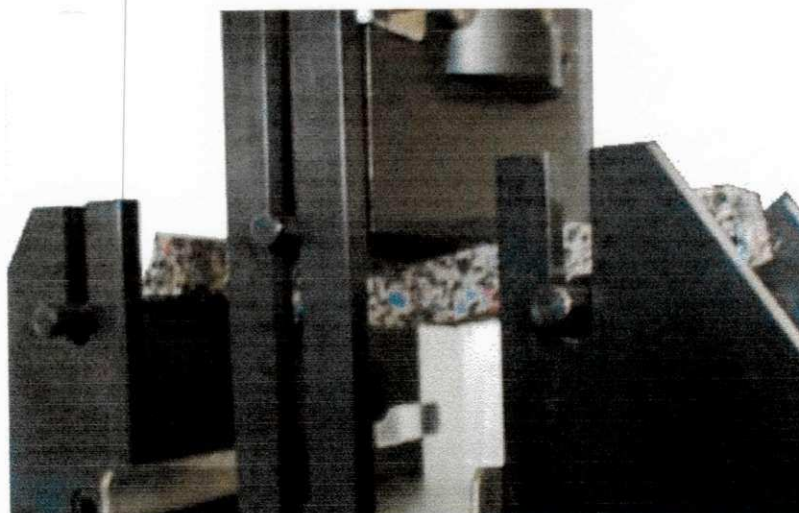


FIGURA 5.5 – Ensaio de flexão em três pontos do compósito leve

5.5.3 Envelhecimento sob intemperismo natural

Esse ensaio foi realizado como já descrito no Capítulo 3. Metade das placas produzidas foi submetida às intempéries (T) sobre bancadas de exposição após 30 dias de cura ao ar em ambiente de laboratório. Esse ensaio auxilia na avaliação da influência do agregado leve, da substituição do cimento por resíduo de bloco moído e da adição das fibras nas propriedades físicas e mecânicas dos compósitos leves. A outra metade restante das placas continuou em ambiente de laboratório aguardando os ensaios de 90 e 210 dias após a moldagem.

5.6 Avaliação do Comportamento Térmico dos Compósitos Leves

Visando determinar o comportamento térmico dos compósitos leves produzidos, foi realizado um ensaio comparativo entre as misturas. As placas produzidas foram fixadas a blocos cerâmicos através de argamassa, simulando um revestimento de uma parede, conforme esquema mostrado na Figura 5.6.

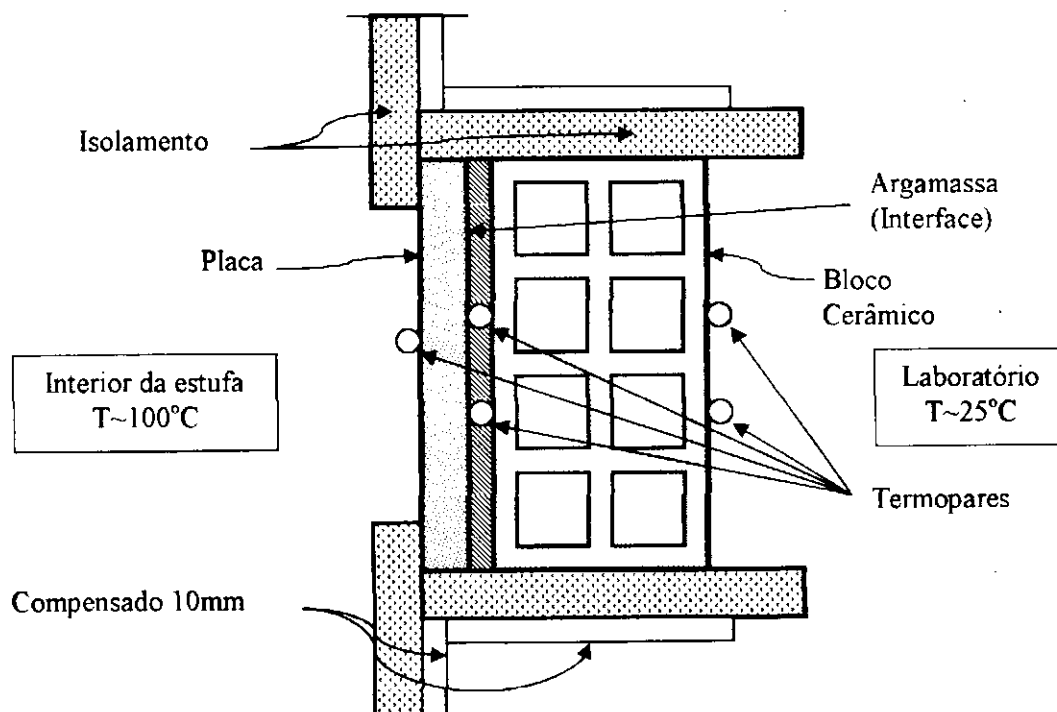


FIGURA 5.6 – Esquema do ensaio de comportamento térmico dos compósitos leves

O conjunto foi instalado em uma estufa usada como fonte de calor para a realização do ensaio e programada para permanecer em 100°C de temperatura interna. Cada conjunto foi instrumentado com cinco termopares de cobre-constantan para registrarem as temperaturas alcançadas, sendo um colado na superfície da placa, dentro da estufa, dois instalados na interface entre a placa e o bloco cerâmico e os dois restantes fixados na superfície do bloco cerâmico, exposta ao ambiente do laboratório, o qual apresentou uma temperatura média do ar de 25°C. Um datalogger da marca Campbell Scientific, modelo 10X, foi utilizado para registrar, a cada 30 minutos, a média das temperaturas obtidas a cada 2 minutos para cada termopar durante 24 horas, Figura 5.7.



FIGURA 5.7 – Equipamentos utilizados no ensaio de comportamento térmico dos compósitos leves

Os gradientes de temperatura obtidos para cada mistura são comparados aos de uma placa produzida em argamassa comum no traço 1:6 (cimento:areia), simulando um revestimento (reboco), colada em um bloco cerâmico através de argamassa, semelhantemente às demais placas.

Entretanto, os ensaios realizados não permitem a obtenção da condutividade térmica dos compósitos leves produzidos, porém, uma relação entre as condutividades da placa de argamassa comum e de cada placa de compósito leve pode ser estabelecida. Para tanto, considere-se um conjunto submetido a um fluxo de calor constante (Figura 5.8).

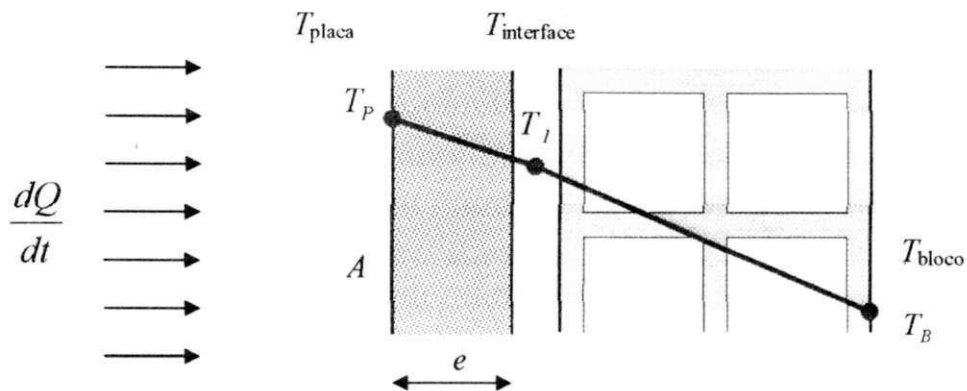


FIGURA 5.8 – Fluxo de calor através da placa e do bloco

O fluxo de calor através de cada placa estudada pode ser escrito da seguinte forma:

$$\frac{dQ}{dt} = k \cdot \frac{A}{e} \cdot (T_p - T_i) \quad (5.1)$$

Onde:

$\frac{dQ}{dt}$ - fluxo de calor;

k - condutividade térmica da placa;

A - área da placa exposta ao calor;

e - espessura da placa;

T_p - temperatura na superfície da placa;

T_i - temperatura na interface placa-bloco.

Admitindo-se que as áreas de exposição ao calor e as espessuras das placas são as mesmas para todas as amostras, e que após seis horas esse fluxo se estabiliza, a seguinte expressão pode ser escrita:

$$k_1(T_{p1} - T_{i1}) = k_2(T_{p2} - T_{i2}) = k_3(T_{p3} - T_{i3}) = k_4(T_{p4} - T_{i4}) \quad (5.2)$$

Onde os índices 1, 2, 3, e 4 representam a argamassa (1:6), e as misturas CB, CB30 e CB30S, respectivamente. Dessa expressão pode-se obter as condutividades térmicas dos

compósitos leves (k_2 , k_3 e k_4) em função da condutividade térmica da placa de argamassa comum (k_1), ou seja:

$$k_2 = k_1 \cdot \frac{T_{P1} - T_{I1}}{T_{P2} - T_{I2}}; \quad (5.3)$$

$$k_3 = k_1 \cdot \frac{T_{P1} - T_{I1}}{T_{P3} - T_{I3}}; \quad (5.4)$$

$$k_4 = k_1 \cdot \frac{T_{P1} - T_{I1}}{T_{P4} - T_{I4}} \quad (5.5)$$

5.7 Resultados e Discussão

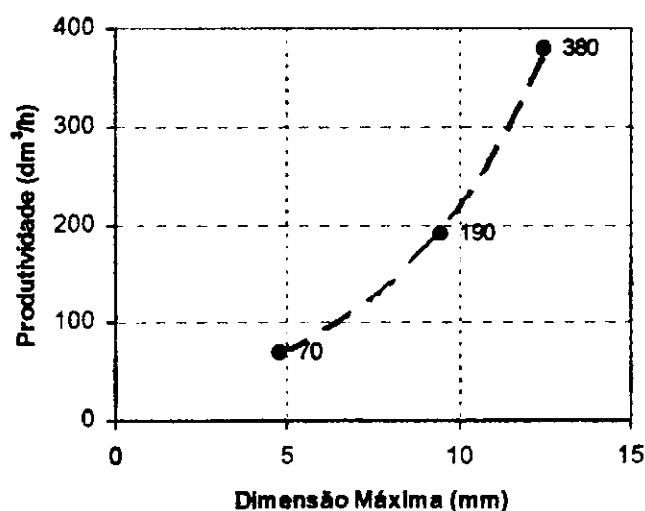
5.7.1 Agregados leves reciclados

Na Tabela 5.3 pode ser vista a produtividade obtida na trituração dos resíduos de EVA da indústria de calçados trazidos ao laboratório. Percebe-se a rápida queda da produtividade para obter agregados com menores dimensões (Figura 5.9), provocando o aumento do tempo de trituração para se conseguir uma mesma quantidade de agregado, aumentando muito o custo de obtenção.

Objetivando produzir compósitos leves reforçados com fibras de sisal, utilizando resíduos de EVA como agregado leve e visando a utilização desse compósito na confecção de elementos de construção civil pré-fabricados de pequena espessura (<20mm), tais como: placas de forros, telhas, revestimentos térmicos e acústicos, chapas divisórias, etc; escolheu-se a peneira de abertura igual a 6,0mm, que fornece um agregado com dimensão máxima ($D_{máx}$) de 4,8mm, mais adequada à espessura dos compósitos.

TABELA 5.3 – Aberturas das peneiras utilizadas no moinho, dimensão máxima dos agregados obtidos e respectivas produtividades (BEZERRA, 2002)

Malha da Peneira (mm)	$D_{m\acute{a}x}$ do Agregado (mm)	Produção de Agregado	
		(dm^3/h)	(kg/h)
15,0	12,5	380	45
9,5	9,5	190	25
6,0	4,8	70	10

 $(D_{m\acute{a}x})$ - dimensão máxima**FIGURA 5.9** – Produtividade em função da $D_{m\acute{a}x}$ do agregado de EVA

As propriedades físicas do agregado de EVA escolhido estão apresentadas na Tabela 5.4, e a sua curva de absorção na Figura 5.10.

TABELA 5.4 – Propriedades físicas do agregado escolhido do resíduo de EVA

Propriedade	Unidade	Valor
Massa unitária	kg/dm^3	0,134
Absorção de água após 1 h	%	87,0
Absorção de água após 24 h	%	137,4

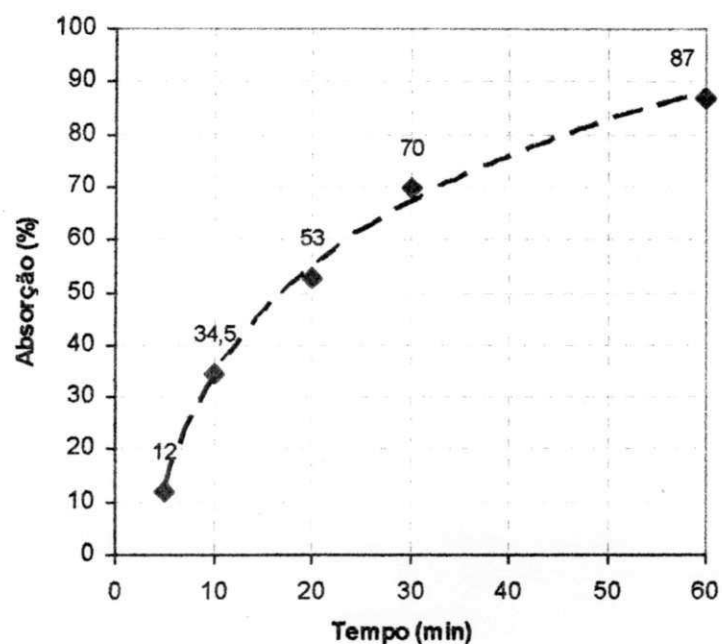


FIGURA 5.10 – Curva de absorção de água do agregado de EVA utilizado

A composição granulométrica do agregado de EVA escolhido está apresentada na Tabela 5.5, e a sua curva granulométrica na Figura 5.11.

TABELA 5.5 – Composição granulométrica do agregado de EVA escolhido

Abertura da peneira (mm)	% Retida	% Retida acumulada	% que passa da amostra total
9,5	0,00	0,00	100,00
4,8	0,98	0,98	99,02
2,0	78,24	79,22	20,78
1,2	15,95	95,17	4,83
0,6	3,03	98,20	1,80
0,3	0,81	99,01	0,99
0,15	0,36	99,37	0,63
Resto	0,63	100,00	0,00

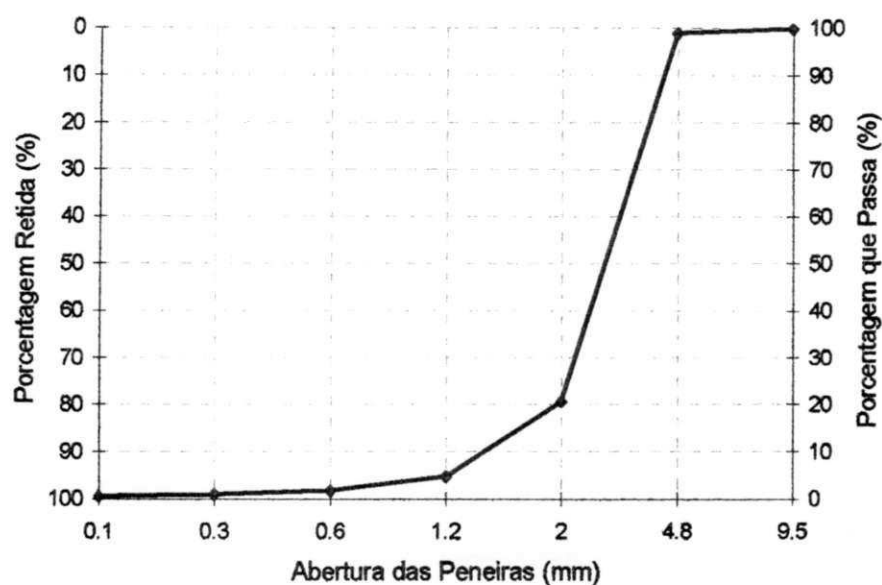


FIGURA 5.11 – Curva granulométrica do agregado de EVA escolhido

Através da composição granulométrica (NBR 7217), o agregado selecionado foi classificado como agregado miúdo grosso, apresentando uma dimensão máxima ($D_{máx}$) igual 4,8mm e Módulo de Finura (MF) igual a 4,7.

5.7.2 Durabilidade dos compósitos leves

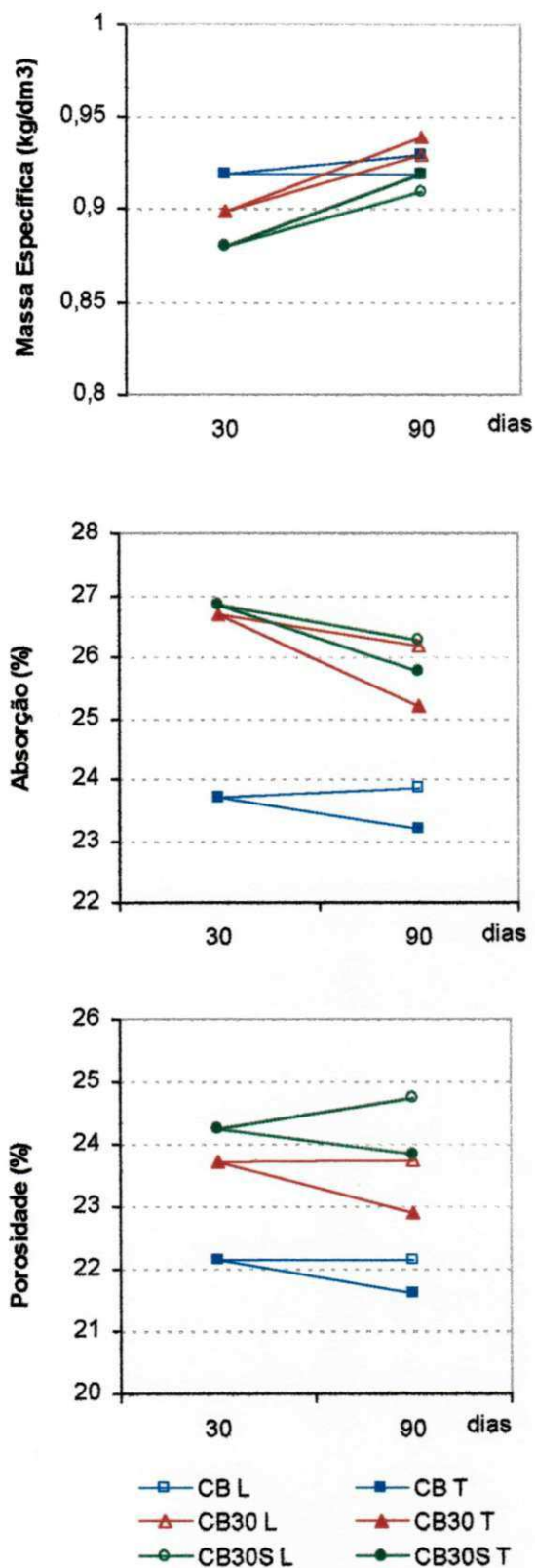
5.7.2.1 Propriedades físicas dos compósitos leves

Os resultados das propriedades físicas estão apresentados na Tabela 5.6 e na Figura 5.12.

TABELA 5.6 – Variação das propriedades físicas dos compósitos leves com o tempo (dias), em diferentes condições de exposição

Mistura	Massa Específica (kg/dm ³)			Absorção (%)			Porosidade (%)		
	30d		90d	30d		90d	30d		90d
	L	L	T	L	L	T	L	L	T
CB	0,92	0,92	0,93	23,7	23,9	23,2	22,2	22,1	21,6
CB30	0,89	0,91	0,92	26,7	26,2	25,2	23,7	23,7	22,9
CB30S	0,90	0,94	0,93	26,8	26,3	25,8	24,2	24,7	23,8

Legenda: d - dias, L - amostras mantidas em laboratório, T - amostras submetidas ao intemperismo natural.
CB - matriz 1:3; 30 - % de substituição; S - 2% de fibra de sisal.



CB - matriz 1:3; 30 - % de substituição; S - 2% de fibra de sisal.
 L - amostras mantidas em laboratório, T - amostras submetidas ao intemperismo natural.

FIGURA 5.12 - Variação das propriedades físicas dos compósitos leves ao longo do tempo

A análise de variância mostra que, para os níveis de significância adotados, os resultados obtidos para massa específica dos diferentes tipos de mistura, idades e condições de exposição apresentam-se estatisticamente iguais. Enquanto que, tanto na absorção, como na porosidade, há diferença significativa entre os tipos de mistura, para um nível de significância de 5%; já para as diferentes idades e condições de exposição, os resultados apresentam-se estatisticamente iguais.

Embora os resultados das propriedades físicas das amostras expostas ao intemperismo natural não tenham sido estatisticamente afetados, uma maior carbonatação pôde ser constatada nessas amostras, conforme Figura 5.13, que mostra uma avaliação qualitativa usando uma solução de 2% de fenolftaleína em etanol anidro borrifada sobre as superfícies fraturadas dos corpos de prova. A cor carmim evidencia as áreas não-carbonatadas nas amostras mantidas em laboratório, com exceção da CB30S, enquanto as amostras submetidas ao intemperismo natural não apresentam nenhuma ocorrência, evidenciando a completa carbonatação das amostras após 60 dias de exposição às intempéries. Tal fato é benéfico às fibras, pois reduz o pH da matriz, diminuindo o ataque alcalino.

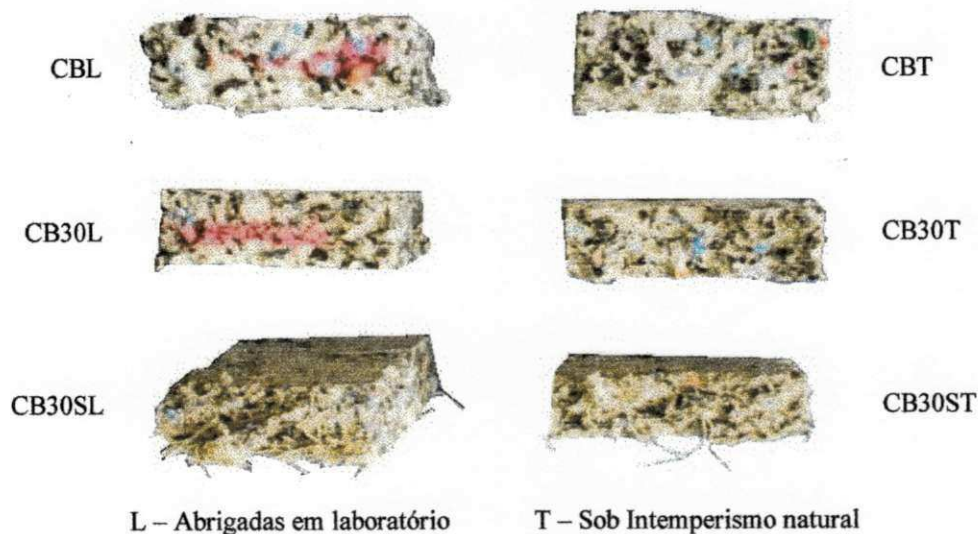


FIGURA 5.13 – Compósitos leves aos 90 dias borrifados com solução de fenolftaleína

Em estudo similar, PADILHA (1999) elaborou um compósito leve à base de cimento Portland com 50% de vermiculita e 50% de areia comum no traço 1:1,5 e 2% de polpa de sisal, obtendo massa específica de $1,2\text{kg/dm}^3$, absorção de 39,4% e porosidade de 42%.

5.7.2.2 Resistência à compressão simples

Os resultados obtidos para resistência à compressão simples estão apresentados na Tabela 5.7 e na Figura 5.14. Todas as misturas atendem à recomendação do RILEM (1978), onde a resistência à compressão simples deve ser maior que 0,5MPa aos 30 dias, para concretos leves para fins de isolamento.

TABELA 5.7 – Resistência à compressão simples dos compósitos leves

Mistura	Resistência à Compressão Simples – RCS (MPa)		
	30d – CV(%)	90d – CV(%)	210d – CV(%)
CB	1,25 (6,4)	1,39 (1,1)	1,46 (2,3)
CB30	1,12 (1,6)	1,20 (2,2)	1,38 (3,4)
CB30S	1,04 (0,7)	1,10 (1,8)	1,21 (1,3)

CV – Coeficiente de variação, d – dias.

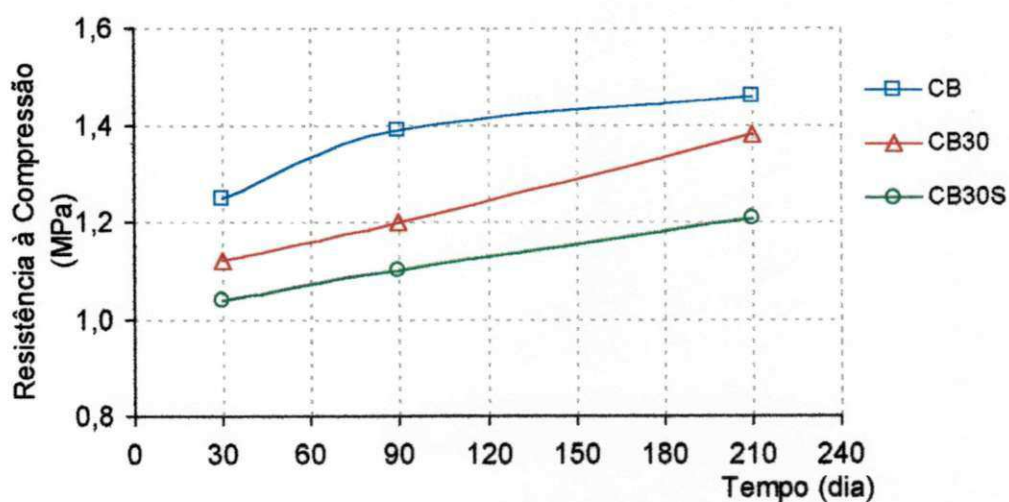


FIGURA 5.14 – Evolução da resistência à compressão simples dos compósitos leves

Aos 30 dias de cura, os resultados indicam a redução na resistência à compressão das misturas CB30 e CB30S, em relação à mistura CB, em cerca de 10% e 17% respectivamente. Tal redução era esperada em função do teor de substituição do cimento pelo resíduo de bloco cerâmico (30%).

Aos 210 dias de cura, todas as misturas aumentaram o valor da resistência à compressão em mais de 16% em relação aos 30 dias, e a diferença entre as misturas CB e CB30 caiu para 5,5% e entre CB e CB30S permaneceu em cerca de 17%. A presença das fibras incorporou mais ar na mistura, aumentando a porosidade e, através de sua alta absorção, as fibras podem ter influenciado na redução da quantidade de água disponível para hidratação da matriz, uma vez que o fator *a/c* foi mantido constante, prejudicando o ganho de resistência pela ação pozolânica do resíduo de bloco cerâmico, como o caso da mistura CB30 (aumento de 23,2% em relação aos 30 dias).

Em estudo similar, PADILHA (1999) obteve resistência à compressão igual a 1,36MPa, após 28 dias de cura, resultado este bastante próximo aos obtidos na presente pesquisa (1,04-1,25MPa). No entanto, os compósitos leves com resíduos de EVA apresentam massas específicas bem inferiores (0,89-0,94 kg/dm³) à apresentada por PADILHA (1999).

5.7.2.3 Ensaio de flexão em três pontos

A Figura 5.15 mostra as curvas características da força x deflexão das três misturas. Após fissuração da matriz, os compósitos leves preparados com agregado de EVA apresentam aumento da capacidade de suporte de carga, bem como grandes deformações, não existindo a fratura brusca como nos caso dos demais compósitos cimentícios sem fibras.

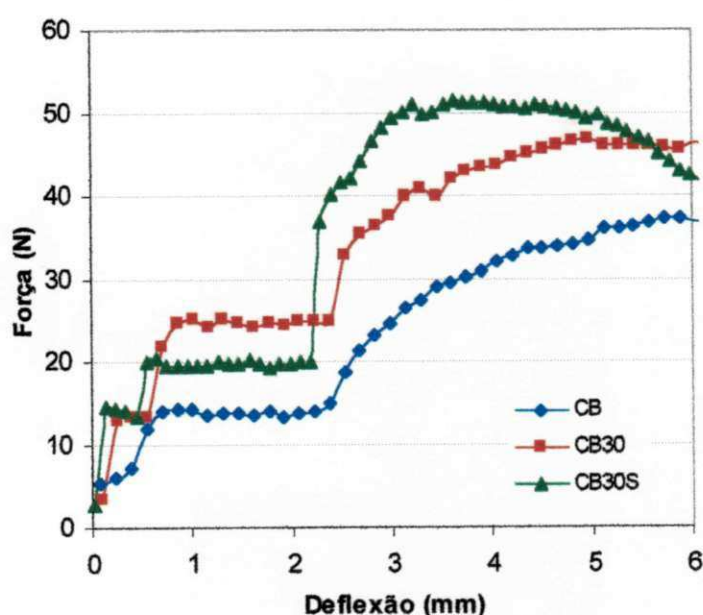


FIGURA 5.15 – Curvas característica do ensaio de flexão dos compósitos leves

Os resultados do ensaio de flexão para cada mistura empregada, em função das condições de exposição, estão apresentados na Tabela 5.8 e nas Figuras 5.16, 5.17 e 5.18. A análise de variância revela que houve diferença significativa nas propriedades mecânicas avaliadas entre os diferentes tipos de mistura e para as diferentes condições de exposição.

Aos 30 dias, pode-se perceber a influência da substituição parcial do cimento por resíduos cerâmicos isoladamente e em conjunto com a inclusão de fibras no módulo de ruptura (MOR), aumentando-o em 20% e 10%; no módulo de elasticidade, aumentando-o em 33% e reduzindo-o em 11%; e na energia específica, aumentando-a em 20% e 30%, respectivamente.

Entre os 90 e 210 dias, os resultados obtidos para o módulo de ruptura e energia específica (tenacidade) apresentam-se estatisticamente iguais, enquanto o módulo de elasticidade aos 210 dias é 52% maior que aos 90 dias. Já entre as diferentes misturas e condições de exposição houve diferenças significativas. O MOR e a EE da mistura CB30 são 18% maiores que na mistura CB, enquanto que o MOR e a EE da mistura CB30S são 24% e 40% maiores que na mistura CB, respectivamente.

Para as amostras submetidas ao intemperismo natural, o MOR e a EE são maiores que nas amostras mantidas em laboratório 45% e 58%, respectivamente. Estes fatos, aliados à diminuição da porosidade, indicam que os processos de hidratação e carbonatação foram mais intensos para essa condição de exposição, favorecendo a densificação da matriz.

A influência das fibras pode ser verificada comparando-se as misturas CB30 e CB30S. As fibras aumentaram a EE em 18,6% e reduziram o MOE em 40%, em média. Ao final do período analisado, 210 dias, não foi possível constatar a degradação das fibras através da metodologia empregada, uma vez que o compósito leve não apresenta ruptura brusca, dificultando a visualização do momento da ruptura da fibra ou da interface com a matriz.

Os resultados obtidos estão em acordo com resultados obtidos por outros trabalhos. Em estudo similar, PADILHA (1999) obteve módulo de ruptura à flexão (MOR) igual a 0,57MPa, após 28 dias de cura, resultado este comparável aos obtidos na presente pesquisa (0,50-0,60MPa).

TABELA 5.8 – Variação das propriedades mecânicas dos compósitos leves com o tempo (dias) em duas condições de exposição

Mistura	MOR (MPa)					MOE (GPa)					EE (kJ/m ²)							
	30d		90d		210d		30d		90d		210d		30d		90d		210d	
	L	L	T	L	T	L	L	T	L	T	L	L	T	L	L	T	L	T
CB	0,50	0,51	0,64	0,45	0,90	0,18	0,25	0,28	0,53	0,64	0,20	0,16	0,25	0,11	0,39			
CB30	0,60	0,56	0,81	0,60	0,90	0,24	0,48	0,63	0,45	0,62	0,24	0,25	0,36	0,16	0,31			
CB30S	0,55	0,65	0,86	0,61	0,82	0,16	0,22	0,31	0,38	0,37	0,26	0,32	0,34	0,26	0,35			

Legenda: d - dias, L - amostras mantidas em laboratório, T - amostras submetidas ao intemperismo natural.
 CB - matriz 1:3; 30 - % de substituição; S - 2% de fibra de sisal.

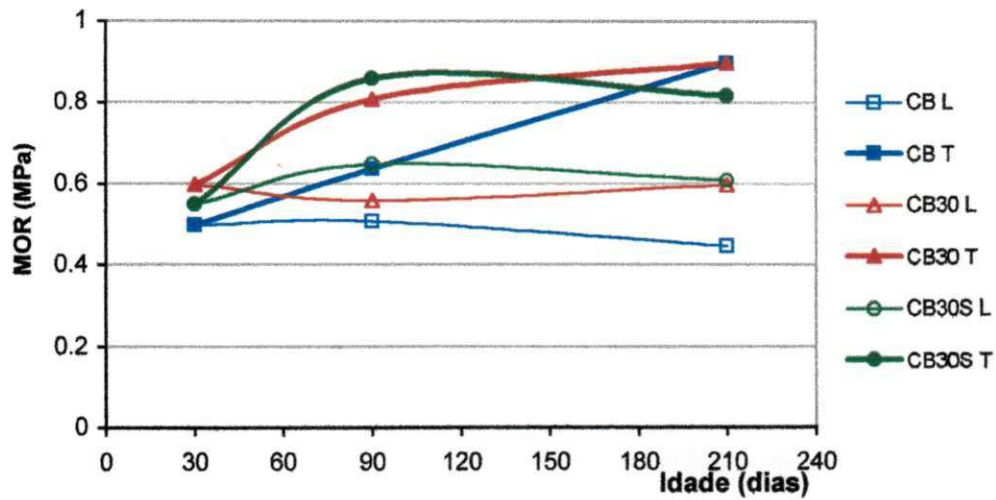


FIGURA 5.16 – Variação do módulo de ruptura à flexão (MOR) dos compósitos leves

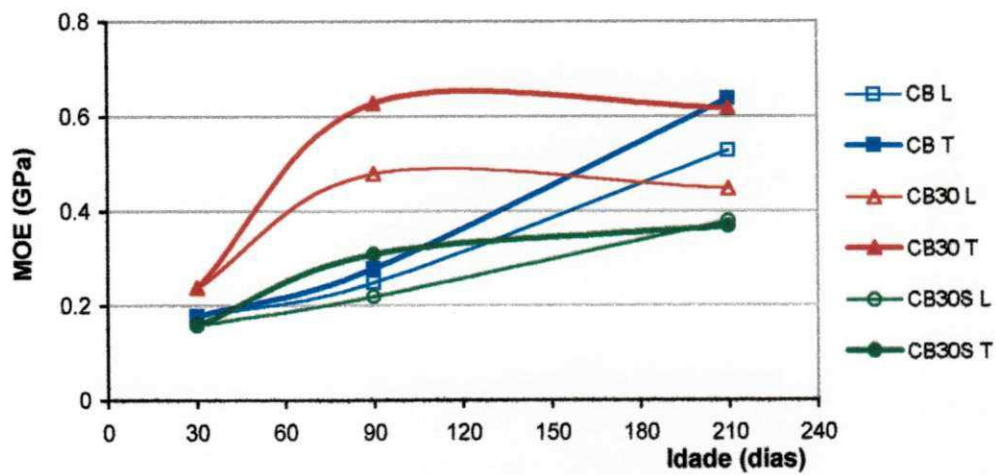


FIGURA 5.17 – Variação módulo de elasticidade (MOE) dos compósitos leves

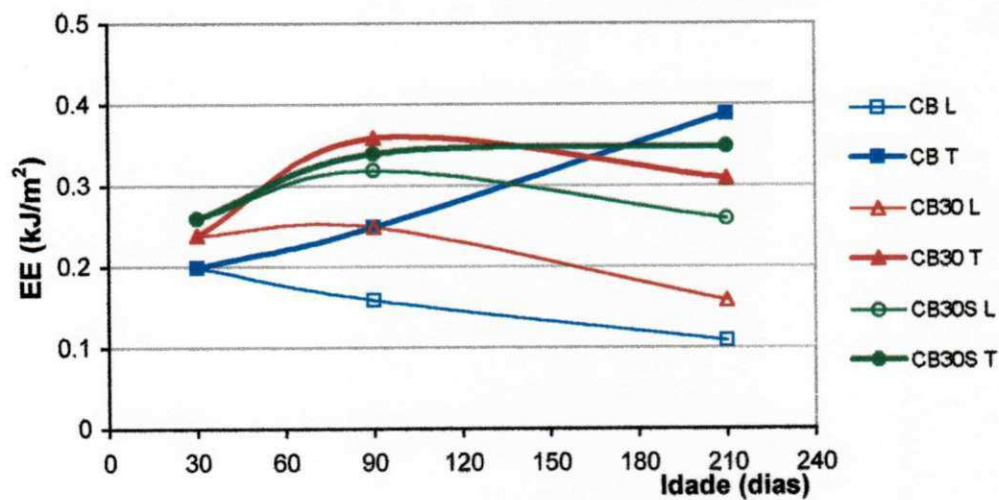


FIGURA 5.18 – Variação da energia específica (EE) dos compósitos leves

5.7.3 Análise do comportamento térmico dos compósitos leves

O gráfico da Figura 5.19 mostra o comportamento térmico característico para todos os conjuntos ensaiados. Percebe-se que após 6 horas de ensaio as temperaturas tendem a se manter estáveis. Portanto, os dados desse instante foram usados para comparação entre os conjuntos.

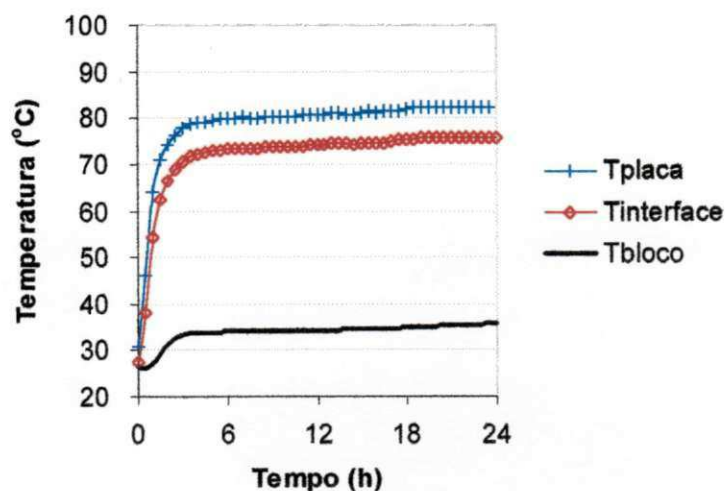


FIGURA 5.19 – Comportamento térmico característico dos conjuntos ensaiados

As maiores variações de temperatura dos conjuntos ocorreram entre a interface e o bloco cerâmico independente do tipo de placa utilizada, e os valores dessas variações são muito próximos uns dos outros, dando em média uma redução de $34,5^{\circ}\text{C}$. Já as variações ocorridas entre as temperaturas de superfície da placa e da interface comprovam o melhor desempenho térmico dos compósitos leves, que tiveram uma média de redução de temperatura de $14,7^{\circ}\text{C}$ contra $6,6^{\circ}\text{C}$ alcançada pela argamassa 1:6 (Figura 5.20).

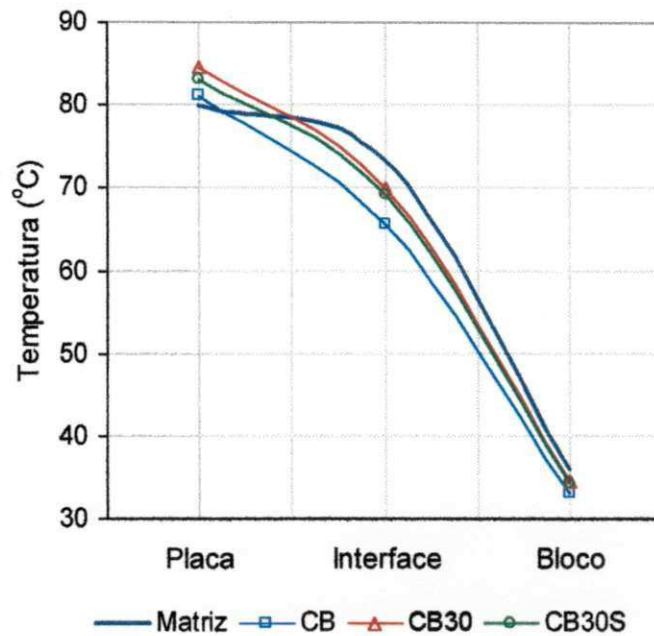


FIGURA 5.20 – Gradientes de temperatura dos conjuntos após 6 horas de ensaio

Na Tabela 5.9 podem ser vistas as temperaturas médias medidas para cada mistura nos diferentes pontos de leitura e as relações obtidas entre a condutividade térmica da argamassa comum (1:6) e a dos compósitos leves.

TABELA 5.9 – Temperaturas médias obtidas nos conjuntos e relações entre as condutividades térmicas das placas após 6 horas de ensaio

Misturas	Temperaturas (°C)			Condutividade Térmica da placa (W.mm/°C)
	Placa	Interface	Bloco	
Argamassa (1:6)	80,1	73,5	35,9	K_1
CB	81,2	65,7	33,2	$K_2 = 0,426K_1$
CB30	84,7	70,1	34,5	$K_3 = 0,452K_1$
CB30S	83,2	69,3	34,4	$K_4 = 0,475K_1$

Percebe-se a redução da condutividade térmica das placas de compósitos leves em relação à placa de argamassa comum (1:6). Uma redução média de 55% na condutividade térmica em relação ao revestimento (reboco) normalmente empregado nas construções demonstra a potencialidade desse material como isolante térmico.

5.8 Conclusões Parciais

Os resíduos da indústria de calçados estudados apresentaram um grande potencial em sua utilização como matéria-prima para elaboração de compósitos leves à base de cimento Portland.

Os principais cuidados na utilização de agregados leves de EVA são: o custo da energia elétrica consumida no processo de obtenção do agregado, podendo este custo ser minimizado utilizando-se equipamentos industriais e uma granulometria adequada a cada aplicação; e a etapa de imersão em água antes de sua aplicação, para que o mesmo não absorva parte da água de amassamento durante a mistura.

Os compósitos produzidos com agregados leves de EVA apresentaram bons resultados, atendendo às especificações para concreto leve destinado a isolamento, recomendadas pelo RILEM (1978).

A baixa massa específica apresentada (930kg/m^3) e as resistências mecânicas médias alcançadas aos 90 dias (compressão= $1,2\text{MPa}$, flexão= $0,7\text{MPa}$) garantem a sua utilização em vários elementos de construção como painéis para forro, enchimento de lajes, placas para revestimento de paredes, etc. O desempenho térmico registrado também lhes garantem a utilização em aplicações de isolamento térmico sob baixas temperaturas.

A mistura CB30, com 30% de resíduo moído de blocos cerâmicos em substituição ao cimento Portland, apresentou características física, mecânica e térmica similares à mistura CB, tendo a vantagem do custo mais baixo. Portanto, essa mistura (CB30) pode ser recomendada para as já citadas aplicações na construção civil.

A presença de fibras de sisal melhorou a performance dos compósitos leves no tocante à energia absorvida após a fissura da matriz, aumentando-a em 18,6%. A utilização das fibras pode ser recomendada em aplicações não expostas às intempéries e utilizando-se uma pozolana (resíduo moído de blocos cerâmicos) para a diminuição do pH da matriz, favorecendo a sua durabilidade.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Este trabalho teve como principal objetivo determinar os comportamentos físico e mecânico dos compósitos cimentícios reforçados com fibras de sisal utilizando resíduos das indústrias de blocos cerâmicos e de calçados. Também buscou-se a produção de elementos construtivos com materiais locais, de baixo custo, aliados a uma tecnologia de produção simples.

Com base nos materiais utilizados e nos ensaios realizados nesta pesquisa as principais conclusões são:

Fibras de sisal

- A presença das fibras de sisal dificultou o preparo e o lançamento das argamassas nos moldes utilizados. No momento da mistura foi necessário uma dispersão manual das fibras para evitar o seu enovelamento.
- As fibras no teor (2% em volume) e comprimento (2,5-3,0cm) estudados, permitem tanto a compactação manual quanto por vibração mecânica.
- A inclusão das fibras na matriz interferiu nas propriedades físicas e mecânicas dos compósitos estruturais e das telhas: reduzindo a massa específica; aumentando a absorção e porosidade; reduzindo o módulo de ruptura à flexão (MOR) e o módulo de elasticidade (MOE); e aumentando a capacidade de absorção de energia (energia específica).
- Com o passar do tempo, a contribuição das fibras de sisal à absorção de energia após o pico da carga aplicada foi atenuada, principalmente nas amostras expostas às

intempéries dos compósitos estruturais e telhas. Tal redução deve-se à degradação das fibras e da interface fibra-matriz, devido ao ataque alcalino e às variações volumétricas das fibras causadas pelas mudanças no teor de umidade do compósito.

Resíduo moído de blocos cerâmicos

- O resíduo moído de blocos cerâmicos utilizado apresenta o índice de atividade pozolânica requerido pela norma brasileira e consumiu a maior parte do hidróxido de cálcio livre presente nas misturas preparadas. Isto demonstra as potencialidades de um resíduo industrial abundante, com um alto valor agregado e que ainda tem um destino pouco nobre, sendo geralmente tratado como entulho.
- A utilização do resíduo de blocos cerâmicos como material pozolânico reduziu a alcalinidade das matrizes e interferiu nas propriedades físicas e mecânicas dos compósitos estruturais e telhas: reduzindo a massa específica e aumentando a absorção e a porosidade; reduzindo o módulo de ruptura à flexão (MOR), o módulo de elasticidade (MOE) e a energia específica (EE).
- A substituição parcial do cimento Portland pelo resíduo de blocos cerâmicos não garantiu a não degradação das fibras ao longo do tempo. Embora tenha conseguido reduzir o teor de hidróxido livre, reduzindo a alcalinidade da matriz, esse tratamento não conseguiu manter a contribuição à energia absorvida dada pelas fibras no decorrer do período ensaiado.

Resíduo da indústria de calçados

- Os resíduos da indústria de calçados (EVA – etileno acetato de vinila) estudados apresentaram um grande potencial em sua utilização como agregado leve em compósitos fibrosos à base de cimento Portland.
- Os principais cuidados na utilização desses resíduos de EVA como agregados leves são: achar a dimensão do agregado leve adequada à espessura das peças a serem confeccionadas, tendo em vista os custos do processo de moagem para obtenção do agregado; e imergir o agregado leve em água antes de sua aplicação, evitando a absorção de parte da água de amassamento durante a mistura.

Produção de compósitos estruturais

- Os resultados obtidos nas primeiras idades demonstram que a produção de compósitos estruturais com a utilização de fibras de sisal, de resíduo moído de bloco cerâmico e de prensagem na moldagem é tecnicamente viável.
- A capacidade de absorção de energia após o pico da carga aplicada dos compósitos com fibras foi aumentada nas primeiras idades. Após cerca de 7 meses de exposição, este acréscimo foi bastante atenuado, de modo que os compósitos com fibras passaram a apresentar comportamento semelhante aos sem fibras. Esse fato indica a degradação das fibras e da interface fibra-matriz.
- A prensagem aplicada na moldagem dos compósitos estruturais resultou numa melhoria das propriedades físicas e mecânicas dos mesmos. Atenuou os aumentos de absorção e de porosidade causados pela adição das fibras e pela substituição parcial do cimento por resíduo de blocos cerâmicos, mantendo essas propriedades próximas às da matriz referência (M); e aumentou o módulo de ruptura à flexão e a tenacidade dos compósitos.
- Considerando as propriedades físicas e mecânicas antes da degradação tanto das fibras como da interface fibra-matriz, a mistura ideal parece estar na faixa de 20 a 30% de resíduo moído de blocos cerâmicos e no intervalo de 2,4 a 3,2MPa de tensão de prensagem na moldagem, sempre com 2% de fibra de sisal.

Produção de telhas

- O modelo de telha proposto apresenta real potencialidade. Tem processos de produção e construtivo muito simples; não requer investimentos iniciais elevados; diminui os custos de madeiramento do telhado; e tem um aspecto visual agradável.
- As telhas produzidas atenderam aos limites de permeabilidade e absorção; tiveram um melhor comportamento térmico que a telha de cimento-amianto; e apresentaram boa capacidade de carga distribuída e uma média no módulo de ruptura na flexão acima de 6,0MPa.
- Houve um aumento da capacidade de absorção de energia nas primeiras idades, em relação ao padrão sem fibras, e isto pode evitar a ruptura frágil das telhas durante transporte e instalação. Com o passar do tempo, em virtude da degradação tanto das

fibras como de sua interface com a matriz, ocorreu a perda dessa capacidade de absorção de energia após o pico da carga aplicada, tendo as telhas com fibras um comportamento semelhante às sem fibra.

- Após 800 dias de exposição às intempéries, embora a capacidade de absorção de energia após o pico da carga aplicada esteja comprometida, as telhas permanecem com uma boa aparência e sem apresentar alteração estrutural ou perda de impermeabilidade que comprometam a sua utilização.

Produção de compósitos leves

- Os compósitos leves à base de cimento Portland produzidos com agregados de resíduos da indústria de calçados (EVA) atenderam às especificações para concreto leve destinado a isolamento térmico. O desempenho térmico alcançado permite a sua utilização em aplicações de isolamento térmico.
- Os compósitos leves com ou sem fibras apresentaram uma baixa massa específica (930kg/m^3), e resistência à compressão (1,2MPa) e módulo de ruptura à flexão (0,7MPa) que lhes garantem utilização em vários elementos de construção, tais como: painéis para forro, divisórias, vedações, placas para revestimento de paredes, etc.
- A mistura CB30 (traço 1:3, cimento-agregado leve, em volume, e 30% de resíduo moído de blocos cerâmicos em substituição parcial ao aglomerante) pode ser recomendada para as já citadas aplicações na construção civil, uma vez que apresentou características físicas, mecânicas e térmicas similares à mistura CB (sem substituição), tendo a vantagem dos benefícios da reciclagem.
- A presença de fibras de sisal melhorou a capacidade dos compósitos leves de absorver energia. A utilização das fibras pode ser recomendada em aplicações não expostas às intempéries e utilizando-se uma pozolana (resíduo moído de blocos cerâmicos) para a diminuição do pH da matriz para favorecer a durabilidade das fibras.

Sugestões para futuras pesquisas

Neste trabalho foram identificados alguns tópicos que poderiam despertar a realização de futuras pesquisas:

1. Avaliação de novos tratamentos para a proteção das fibras e melhoramento da interface com a matriz;
2. novos tratamentos para redução da alcalinidade da matriz, inclusive com a utilização de outros resíduos industriais;
3. desenvolvimento de compósitos e produtos com novos arranjos e comprimentos de fibras;
4. utilização de diferentes métodos de produção;
5. elaboração de novos traços para os compósitos leves utilizando agregados leves gerados a partir do resíduo de EVA;
6. utilização de novos tipos de cura (térmica, a vapor, aspersão, etc.);
7. avaliação de outros tipos de ensaios de durabilidade (ex. acelerado com carbonatação);
8. novas aplicações em produtos pré-fabricados (blocos, painéis, vigas, etc);
9. novos estudos de comportamento térmico e acústico de produtos;
10. desenvolvimento de novas metodologias de obtenção da tenacidade dos compósitos com fibras naturais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “Agregado em estado solto – determinação da massa unitária”, NBR 7251. Rio de Janeiro, 1982.

_____. “Poliestireno expandido para fins de isolamento térmica – determinação de absorção de água”. NBR 7973. Rio de Janeiro, 1983.

_____. “Determinação de massa específica real”, NBR-6474. Rio de Janeiro, 1984.

_____. “Agregados - determinação da composição granulométrica”, NBR 7217. Rio de Janeiro, 1987.

_____. “Agregado para concreto”, NBR 7211. Rio de Janeiro, 1983.

_____. “Telhas de concreto - parte 2: requisitos e métodos de ensaio”, NBR 13858-2. Rio de Janeiro, 1987.

_____. “Argamassa e concreto endurecido: determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica”, NBR 9778. Rio de Janeiro, 1987.

_____. “Materiais pozolânicos – determinação de atividade pozolânica com cimento portland – índice de atividade pozolânica com cimento”, NBR 5752. Rio de Janeiro, 1992.

_____. “Materiais pozolânicos – especificação”, NBR 12653. Rio de Janeiro, 1992.

AGOPYAN, V. “Materias reforçados com fibras para construção civil nos países em desenvolvimento: o uso de fibras vegetais”. Tese (Livre-Docência). Universidade de São Paulo. São Paulo, 1991. 204p.

ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. “Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil”. In: Seminário Desenvolvimento Sustentável e Reciclagem na Construção Civil. São Paulo, 5-6 jun., 2001. Anais. São Paulo: IBRACON, 2001. p.43-56.

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

BERALDO, A. L. “Compósitos biomassa vegetal-cimento”. In: Toledo Filho, R.D. et al. Materiais não convencionais para construções rurais. Campina Grande, UFPB/Sbea, 1997. p.1-48.

- BERHANE, Z. "Durability of mortar roofing sheets reinforced with natural fibre", Symposium on Building Materials, for Low-Income Housing, Bangkok, Tailandia, Jan. 20-26, 1987, p. 321-327.
- BERHANE, Z. "Performance of natural fibre reinforced mortar roofing tiles". Materials and Structures, 1994. p. 347-352.
- BEZERRA, A. J. V. "Utilização do resíduo da indústria de calçados (EVA - etileno acetato de vinila) como agregado leve na produção de blocos vazados de concreto para alvenaria sem função estrutural". Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande, 2002. 115p.
- BREMNER, T. W. "Concreto de agregado leve". Técnica, São Paulo: PINI, n.37, p.45-47, nov/dez. 1998. Trad. A. M. Andrade.
- CEPED - Centro de Pesquisas e Desenvolvimento. "Utilização de fibras vegetais no fibrocimento e no concreto". BNH. Rio de Janeiro, 1982.
- CEPED - Centro de Pesquisas e Desenvolvimento. "Cartilha para fabricação de telhão em argamassa armada". BNH. Rio de Janeiro, 1985. 25p.
- COLLEPARDI, M. "A durabilidade em questão". Técnica, São Paulo: Pini, n.38, p.52-57, jan/fev. 1999.
- CONAB. "Fibras de sisal - plano safra 2002/2003 – proposta de preço mínimo". Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 14 de agosto de 2002.
- FARIAS FILHO, J. "Efeito da adição metacaulinita e tijolo moído queimado na durabilidade de compósito argamassa-fibra de sisal". Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande, 1999. 109p.
- GARLET, G. "Aproveitamento de resíduos de E.V.A. (ethylene vinyl acetate) como agregado para concreto leve na construção civil". Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1998. 146p.
- GRAM, H.E., "Durability of natural fibres in concrete", Swedish Cement and Concrete Research Institute, Research Fo. 1983, 225p.
- IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. "Fibre/agro-industrial by products bearing walls". AMPC/DCC/IPT (Relatório, 27.937, v.1). São Paulo, 1989.
- JOHN, V. M. "Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento". Tese (Livre-Docência). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000. 113p.
- JOHN, V. M.; AGOPYAN, V.; PRADO, T. A. "Durabilidade de compósitos de cimento e fibras vegetais". In: Workshop: Durabilidade das construções. p.19-29. São Leopoldo/RS, 1997.

LEAL, E.; SILVA, G. B.; COSTA, I. C.; SILVA, L. G.; PEREIRA, M. M. B.; QUEIROGA, O. M.; MIRANDA, O. V. "*Sistema agroindustrial do sisal na Paraíba*", UFPB, Campina Grande, 1997. 41p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. "*Concreto: estrutura, propriedades e materiais*". São Paulo: Pini, 1999. 616p.

MUKHERJEE, K. G., "*Structure and properties of some vegetable fibres. part 1: sisal fibre*", Journal of Materials Science 19, 1984, p.3925-3934.

NEVILLE, A. M. "*Propriedades do concreto*". São Paulo: Pini, 1997. Trad. Salvador E. Giamusso.

ORIOLE M.; PERA J. "*Pozzollanic activity of metakaolin under microwave treatment*". Cement and Concrete Research, v. 25, n.2, sep, 1994. p.265-270

PADILHA, J. A. S. "*Utilização da polpa de sisal como elemento de reforço do concreto leve*". Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande, 1999. 118p.

PEDRO, A. F. P. "*Resíduos industriais: a responsabilidade do gerador*". Disponível em: <<http://www.pinheiropedro.com.br>>. Acesso em: 10 de março de 2002.

PETRUCCI, E. G. R. "*Concretos leves celulares e sem finos*". Conferência proferida no Instituto Brasileiro do Concreto. São Paulo, 1973.

RILEM - Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions. "*Classification fonctionnelle des bétons légers*". Matériaux et Constructions, jul/out, v.11, n.64. Paris, 1978. p.281.

SANTOS, J. D. "*Fibras de sisal*", In: CONAB - Plano Safra 2002/2003 – Proposta de Preço Mínimo. Brasília, DF, 2002.

SATO, N. M. N.; AGOPYAN, V. "*Influência da porosidade no transporte de água em concretos*". In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. ANAIS. Salvador, ENTAC 2000. (CD-Room)

SAVASTANO Jr., H. "*Materiais a base de cimento reforçados com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo*". Tese (Livre docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000. 144p.

SHIMIZU, G., JORILLO JR, P., "*Coir fibre reinforced cement based composite. part 1: microstructure and properties of fibre mortar*", 4th RILEM Symposium on Fibre Reinforced Cement and Concrete, Sheffield. Published by E & FN Spon, Londres, 1992.

SILVA, A. C., "*Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose*", Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002. 128p.

