UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

Departamento de Engenharia de Construção Civil

ALUIZIO CALDAS E SILVA

ESTUDO DA DURABILIDADE DE COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE CELULOSE

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Civil

São Paulo
2002

ALUIZIO CALDAS E SILVA
Eng. Civil, Escola Politécnica da UPE, 1998.

ESTUDO DA DURABILIDADE DE COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE CELULOSE

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Civil

Área de concentração:
Engenharia de Construção Civil

Orientador:
Prof. Dr. Vanderley M. John

São Paulo
2002

FICHA CATALOGRÁFICA

Silva, Aluizio Caldas

**Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com
fibras de celulose**

Aluizio Caldas e Silva. – São Paulo, 2002

128p.

**Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil**

1.Compósitos 2.Fibras de celulose 3.Durabilidade

**4.Escoria de alto-forno I.Universidade de São Paulo. Escola
Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil
II.t.**

Aos meus Pais: Luis Carlos e Kátia,

Ao meu avô: Antonio Silva,

À minha avó: Zenaide Leite,

À Claudia...

AGRADECIMENTOS

Todos que passam em nossas vidas, de alguma forma, nos ensinam. Ensinaamentos que, às vezes aparentemente simples, ajudam na nossa formação. Pela observação das pessoas ao nosso redor percebemos suas características e muitas vezes ressaltamos seus defeitos. Entretanto, nos concentrar em aprender com suas qualidades certamente é mais recompensador. Na busca constante pelo aperfeiçoamento como ser humano, cada um contribuiu e vem contribuindo. A estes, meu reconhecimento como forma de exaltação às suas principais qualidades.

A Deus. Certamente a única presença em todos os momentos.

Aos meus pais, Luís Carlos e Kátia pela contribuição constante na minha formação profissional e, sobretudo, pessoal. Todos os ensinamentos foram ouvidos, mesmo quando as reações não demonstravam.

Ao meu avô Antonio, exemplo moral de seriedade, honestidade e decência. Obrigado pelos ensinamentos. Espero pô-los em prática. Tentarei sempre não decepcionar.

A minha avó Zenaide, pelo carinho em todos os momentos.

A Claudia pela paciência e espera. Você me fez muita falta em todo este período.

A Tia Penha, de personalidade difícil e coração doce.

A minha avó Aureci, demonstrando a alegria que sempre deveríamos ter.

A minhas irmãs Karine e Taisa pela importância do contraditório.

A tia Nena. Pelas constantes atitudes de otimismo. A Tio Lula, mesmo distante fisicamente, sempre presente com muito carinho.

Aos companheiros de PCC: Mary, SAngulo, Evandro, Tomas, Marcelo, Lili, Rubiane, Grilo, Daniel, Pedró, Ohashi, Rodovalho, Léo Miranda, Érika, Luciano, Fabrício, Tatá, Istemária, Julio Feio, Luciana, Marcelo, Tio William e aos amigos de segunda etapa, Rita e Manuelito.

A Tonhão, grande no porte físico e no coração. A Flávio Cabeludo, por trás da personalidade rebelde, sempre prestativo. A Ângelo, grande revisor e, espero, futuro grande amigo: sua paciência irrita, mas ensina.

Ao Prof Vanderley John, sempre objetivo na orientação e inteligente em todas as observações e contribuições, sobretudo no final.

Ao Prof Holmer Savastano Jr, que além de co-orientador foi um grande conselheiro para todos os assuntos. Obrigado.

Ao Prof Antonio Figueiredo, pessoa humana da mais alta qualidade.

A Profa Maria Alba. Obrigado por seu tratamento sempre atencioso.

Ao Prof Vahan pelas contribuições e exemplo de simplicidade.

A Profa Silvia, Prof Ubiraci, Prof Paulo Helene pelos ensinamentos.

Ao pessoal da secretaria, computação e biblioteca do PCC. Fátima, Alcione, Cristina, Paulinho, Engracia, Patrícia, Dona Fátima, Léozinha.

Ao pessoal do laboratório do PCC, Dorval, Reginaldo, Sr João.

Aos colaboradores da FZEA em Pirassununga: Leandro, Gi, Lu Martello.

Aos companheiros de São Carlos que me acolheram inúmeras vezes: Marcão, Rômulo, Ricardinho, Rafael, Topó. Em especial ao meu amigo Johny Tunga.

Ao CNPq pela bolsa estudos.

Aos professores da POLI-PE: Calado, Armando, Carlos Welligton, Roberto Andrade, Sergio Dias e Béda Barkokébas pelo incentivo e motivação para a continuação dos estudos.

Aos que, pela pressa, não foram citados minhas desculpas e sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	iii
LISTA DE ABREVIATURAS	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
INTRODUÇÃO	1
Contexto da pesquisa	1
Justificativa	2
Objetivos	5
Estrutura do trabalho	5
CAPÍTULO I - COMPÓSITOS A BASE DE MATÉRIAS-PRIMAS RECICLADAS	7
1.1. O impacto ambiental causado pela construção civil	8
1.1.1. Modelos de produção aplicados à construção civil	8
1.1.2. Consumo e extração de matérias-primas e recursos naturais	9
1.1.3. Políticas voltadas para o meio ambiente	10
1.2. Resíduos agro-industriais	12
1.2.1. Uso de RAI na construção civil.....	12
1.3. Aglomerantes alternativos	13
1.3.1. Classificação e características das escórias.....	15
1.3.2. Escórias de alto forno (EAF)	16
1.3.3. Ativação	17
1.4. Reforço de matrizes frágeis com fibras	18
1.4.1. Fibras - tipos e classificação	19
1.4.2. Emprego de fibras na construção civil.....	20

1.4.3. Disponibilidade de fibras	22
1.4.4. Composição e microestrutura das fibras.....	23
1.5. Comentários	26
CAPÍTULO II - REFORÇO COM FIBRAS DE CELULOSE	27
2.1. Fibras de celulose	27
2.1.1. Disponibilidade.....	28
2.2. Processos de polpação	29
2.2.1. Avaliação das características de polpas e dos processos de polpação.....	30
2.3. Propriedades dos Compósitos cimento-celulose	32
2.4. Seleção de matrizes	33
2.5. Processos de produção	34
2.6. Influência da microestrutura no desempenho do compósito	36
2.7. Comentários	38
CAPÍTULO III - DURABILIDADE DE COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE CELULOSE.....	39
3.1. Considerações sobre os conceitos de desempenho	40
3.2. Agentes de degradação	42
3.3. Mecanismos de degradação	43
3.3.1. Decomposição da fibra.....	43
3.3.2. Petrificação da fibra.....	44
3.3.3. Carbonatação da matriz	46
3.3.4. Outros mecanismos.....	48
3.4. Indicadores de degradação	48
3.4.1. Propriedades físicas.....	48
3.4.2. Propriedades mecânicas.....	49
3.5. Características da microestrutura	50

3.6. Métodos para avaliação de durabilidade	50
3.6.1. Ensaaios de envelhecimento natural	51
3.6.2. Ensaaios em uso	51
3.6.3. Ensaaios acelerados	51
3.7. Comentários	52
CAPÍTULO IV - MATERIAIS E MÉTODOS	53
4.1. Planejamento experimental	53
4.2. Materiais	54
4.2.1. Fibras.....	55
4.2.2. Escória de alto forno.....	57
4.2.3. Cimento Portland.....	58
4.2.4. Gipsita	59
4.2.5. Cal hidratada	60
4.3. Métodos de preparo das matérias primas	60
4.3.1. Pré-tratamento da fibra.....	60
4.3.2. Moagem da escória	61
4.4. Métodos de produção do compósito	62
4.4.1. Mistura dos materiais.....	62
4.4.2. Moldagem e adensamento	63
4.4.3. Prensagem	64
4.4.4. Cura.....	64
4.4.5. Corte dos corpos-de-prova	65
4.5. Caracterização do compósito	66
4.5.1. Propriedades físicas	66
4.5.2. Propriedades mecânicas.....	67

4.6. Métodos de envelhecimento do compósito	69
4.6.1. Ensaio de envelhecimento natural	69
4.6.2. Ensaio de envelhecimento acelerado.....	70
4.7. Compósitos de referência	71
4.8. Análise estatística	72
CAPÍTULO V - ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	73
5.1. Desempenho dos compósitos aos 28 dias	73
5.1.1. propriedades físicas	73
5.1.2. propriedades mecânicas.....	74
5.2. envelhecimento natural	78
5.3. Envelhecimento acelerado	80
5.3.1. Efeitos da Carbonatação acelerada.....	80
5.3.2. Ciclos de molhagem e secagem	82
5.3.3. Efeito conjunto entre a carbonatação e os ciclos.....	85
5.4. Comparação dos compósitos com cimento amianto	88
5.5. Relação entre envelhecimento natural e acelerado	91
CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
6.1. Método de envelhecimento acelerado	94
6.2. Fibras de celulose	95
6.3. Matrizes à base de cimento de EAF	95
6.4. Comparação com o cimento-amianto	96
6.5. Sugestões para pesquisas futuras	96
ANEXO A – DOCUMENTAÇÃO FOTOGRÁFICA.....	98
ANEXO B – RESULTADOS E ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	107
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Ciclo de produção fechado (adaptado a partir de CURWELL; COOPER, 1998; CRAVEN <i>et al.</i> , 1996 <i>apud</i> JOHN, 2000)	9
Figura 1.2 - Desafios para o setor de construção civil, segundo a pesquisa da CERF. Escala relativa (a partir de JOHN, 2000a).	10
Figura 1.3 – Evolução histórica da participação da indústria de cimento na geração mundial e nacional de CO ₂ na atmosfera devido à queima de combustíveis fósseis para produção de cimento (JOHN, 2000b).	13
Figura 1.4 - Classificação das fibras (a partir de ZHU, 1993).	19
Figura 1.5 - Esquema da estrutura da fibra de celulose e de uma macrofibra (GRAM, 1988; COUTTS, 1992).	25
Figura 2.1 - Representação esquemática da estrutura de uma fibra proveniente da madeira, comparando suas resistências à tração em diversas etapas de processamento da madeira (a partir de COUTTS, 1986).	28
Figura 2.2 – Fabricação de fibrocimentos em escala industrial. Esquema simplificado do processo Hatscheck onde os números representam: (1) <i>misturador, agitador</i> ; (2) <i>cilindro</i> ; (3) <i>correia transportadora</i> ; (4) <i>sentido de rotação da esteira</i> ; (5) <i>Sistema de vácuo</i> ; (6) <i>cilindro de extrusão indicando sentido de rotação</i> ; (7) <i>sistema de corte da chapa</i> ; (8) <i>Chapa saindo da calandra</i> . (adaptado a partir de COUTTS, 1992)	35
Figura 2.3 – Representação esquemática de uma fissura através de um material compósito reforçado com fibras (a partir de COUTTS, 1986)	37
Figura 3.1– BSEI de fibra de coco-escória. Ponto 1: lacuna central da fibra; ponto 2: grão de cimento anidro. Idade de hidratação: 42 dias (SAVASTANO Jr., 2000).	45
Figura 3.2 – Análise de EDS da lacuna central da fibra de coco (ponto 1 na Figura 3.1). (SAVASTANO Jr., 2000).	46
Figura 4.1 – Planejamento experimental	53
Figura 4.2 – Seqüência de produção do compósito.....	62
Figura 4.3 - Esquema da seqüência de produção do compósito pela adaptação do processo Hatscheck.	63
Figura 4.4 – Seqüência e distribuição dos tempos dos períodos de cura empregados.	65
Figura 4.5 – Esquema do ensaio de flexão utilizado para determinar as resistências à tração na flexão, o módulo de elasticidade e a tenacidade.	68
Figura 4.6 – Demonstração do cálculo do MOE do material.	68

Figura 5.1 – Curvas típicas carga <i>versus</i> deformação em ensaio de flexão dos compósitos reforçados com 2% e 12% de fibras de celulose e do cimento-amianto aos 28 dias, após cura úmida em ambiente saturado (diferença de aproximadamente 2mm entre os corpos-de-prova com 2% e 12% de celulose).....	75
Figura 5.2 – Variação do módulo de ruptura e da energia específica dos compósitos aos 28 dias em relação ao aumento do teor de fibras.....	77
Figura 5.3 – Variação do módulo de ruptura e da energia específica dos compósitos reforçados com 12% de fibras em relação à idade de exposição ao meio ambiente.	79
Figura 5.4 – Efeito da carbonatação no MOR para diferentes composições de matrizes.	81
Figura 5.5 – Efeito da carbonatação na tenacidade para diferentes composições de matrizes com 12%.	82
Figura 5.6 – Variação do módulo de ruptura e da energia específica dos compósitos com 12% não carbonatados em relação à quantidade de ciclos de envelhecimento aplicados.	83
Figura 5.7 – Relação entre a resistência à flexão e a tenacidade do compósito com 12% de fibras para diferentes níveis de hidratação.	85
Figura 5.8 – Variação do módulo de ruptura e da energia específica dos compósitos com 12% carbonatados em relação à quantidades de ciclos de envelhecimento aplicados. .	86
Figura 5.9 – Comparação entre a variação do MOR dos compósitos 12% carbonatados e não carbonatados antes e após a aplicação dos ciclos.	87
Figura 5.10 – Comparação entre a variação da EE dos compósitos 12% carbonatados e não carbonatados antes e após a aplicação dos ciclos.	88
Figura 5.11 – MOR aos 28 dias dos compósitos de Cimento-amianto comparados ao cimento-celulose.	89
Figura 5.12 – Tenacidade aos 28 dias dos compósitos de Cimento-amianto comparados ao cimento-celulose.....	90
Figura 5.13 – Tenacidade aos 28 dias dos compósitos de Cimento-amianto carbonatados e não carbonatados.	90
Figura 5.14 – Comparação entre as tendências observadas no MOR após o envelhecimento natural e acelerado com carbonatação para compósitos com 12% de fibras.	92
Figura 5.15 – Comparação entre as tendências observadas na tenacidade após o envelhecimento natural e acelerado com carbonatação para compósitos com 12% de fibras.	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-1 – Composição química típica de escórias e do cimento Portland (JOHN, 1995).	15
Tabela 1-2 – Características físicas e mecânicas das fibras vegetais, de celulose, amianto e polipropileno (AGOPYAN; SAVASTANO Jr. (1997); NOLASCO (1998) e SWAMY (1998).....	21
Tabela 1-3 - Alguns resíduos oriundos do processamento de fibras ligno-celulósicas (SAVASTANO Jr., 2000).	23
Tabela 1-4 - Composição química das microfibras (adaptado de ILSTON, 1994).	24
Tabela 1-5 – Composição de algumas fibras vegetais (SAVASTANO Jr.; AGOPYAN, 1997).	24
Tabela 2-1 – Características de algumas fibras de celulose (SAVASTANO Jr., 2000).	32
Tabela 4-1 - Nomenclatura adotada para os misturas empregadas no experimento.	55
Tabela 4-2 - Características das fibras residuais de celulose de eucalipto (SAVASTANO Jr, 2000).....	56
Tabela 4-3 - Composição química da escória determinada por via úmida.	57
Tabela 4-4 - Teor de álcalis solúveis da escória determinado por fotometria de chama segundo o método ASTM C 114 (OLIVEIRA, 2000).	58
Tabela 4-6 - Teor de álcalis solúveis do cimento Portland determinado por fotometria de chama segundo o método ASTM C 114 (OLIVEIRA, 2000).	59
Tabela 4-7 - Composição química do cimento do cimento (OLIVEIRA, 2000).....	59
Tabela 4-8- Composição química provável da gipsita (OLIVEIRA, 2000).....	59
Tabela 4-9 - Composição química provável da cal hidratada (OLIVEIRA, 2000).....	60
Tabela 4-10 - Evolução da área específica da escória com o tempo de moagem.....	61
Tabela 4-11 – Determinação do cálculo das propriedades físicas.....	67
Tabela 5-1 – Valores médios (6 exemplares) das propriedades físicas dos compósitos aos 28 dias. Desvio padrão entre parêntesis.	74
Tabela 5-2 – Capacidade de deformação dos compósitos e relação com suas propriedades mecânicas.	76
Tabela 5-3 – Variação das propriedades físicas dos compósitos com 12% sob a ação do envelhecimento natural.....	80
Tabela 5-4 – Variação das propriedades físicas dos compósitos com 12% sob a ação da carbonatação.	81
Tabela 5-5 – Variação das propriedades físicas dos compósitos 12% não carbonatados sob a ação dos ciclos molhagem e secagem.....	84

Tabela 5-6 – Variação das propriedades físicas dos compósitos 12% carbonatados sob a ação dos ciclos molhagem e secagem	87
Tabela 5-7 – Variação das propriedades físicas do cimento-amianto sob a ação da carbonatação.	89
Tabela 5-8 – Variação das propriedades físicas do cimento-amianto sob a ação dos ciclos molhagem e secagem.....	91

LISTA DE ABREVIATURAS

MOR – Módulo de ruptura;

MOE – Módulo de elasticidade;

CRFC – Compósitos reforçados com fibras de celulose;

CRFV - Compósitos reforçados com fibras vegetais;

RAI – Resíduos agro-industriais;

EE – Energia específica;

CPs – Corpos-de-prova;

EAF – Escória de alto-forno;

EGCH – Escória de alto forno ativada com gipsita e cal hidratada;

ECP – Escória de alto-forno ativada com cimento Portland;

NBR – Norma brasileira regulamentadora.

RESUMO

ESTUDO DA DURABILIDADE DE COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE CELULOSE

O uso de fibras vegetais e de cimentos alternativos – ambos provenientes de resíduos, é tido como boa opção na busca por novos fibrocimentos. Entretanto, a maioria das pesquisas desenvolvida nos últimos anos tem apresentado resultados desanimadores no que se refere à durabilidade do material. Além disso, os métodos para avaliação do desempenho ao longo do tempo de materiais reforçados com fibras sensíveis a álcalis ainda não estão bem estabelecidos.

O trabalho avaliou o comportamento de compósitos produzidos com cimento de escória de alto-forno reforçados com fibras de celulose, moldados através de adaptações dos processos industriais usados em todo mundo pelas empresas de fibrocimento. Em seguida, a durabilidade das formulações foi avaliada através de ensaios de envelhecimento, os quais se basearam na simulação dos principais agentes e mecanismos de degradação atuantes no material. O desempenho físico e mecânico dos compósitos foi avaliado através da análise de propriedades pré-estabelecidas, consideradas importantes no emprego material como componente construtivo.

A análise dos resultados confirmou a eficiência da incorporação da celulose nas propriedades mecânicas do compósito. A durabilidade do material foi diferente para as matrizes empregadas. As matrizes ativadas com gipsita e cal hidratada (EGCH) foram menos agressivas às fibras, entretanto apresentaram problemas de hidratação às primeiras idades e perda de resistência devido à carbonatação. A matriz ECP, mais alcalina, apresentou resultados superiores de resistência mecânica nas primeiras idades. Ela decompôs as fibras e reduziu as propriedades mecânicas durante o envelhecimento. A carbonatação reduziu o ataque alcalino às fibras nestas matrizes, estabilizando a resistência mecânica e a perda de tenacidade não foi tão acentuada. A metodologia de envelhecimento acelerado que combinou ciclos de molhagem e secagem à carbonatação se mostrou eficiente na simulação do envelhecimento natural.

Palavras-chave: Compósitos, Fibras de celulose, Escória de alto-forno, Durabilidade, Ensaio de envelhecimento, Carbonatação.

ABSTRACT

DURABILITY OF CELLULOSE FIBERS REINFORCED COMPOSITES

Vegetable fibers and alternative cements from residues is a good option for replacement asbestos-cement. However, research development has presented no satisfactory results concerning material durability and methods of performance evaluation to reinforced materials with alkali sensitive fibers are not well developed.

The objectives of this research are: a) evaluation of composites behavior produced with blast-furnace slag reinforced with residual cellulose fibers, which were moulded in adapted conventional industrial processes, common in fibercement companies around world and b) durability performance evaluation applying proposed aging tests. Aging tests were based on simulation of main agents and degradation mechanisms. Physical and mechanical behaviour of composites was evaluated considering important properties in building component uses.

Cellulose fibers improved the mechanical properties of the composites. Durability presented different results for the two matrices. The matrices activated with gypsum and hydrated lime (EGCH) have been less aggressive than matrix activated with ordinary Portland cement (OPC) in relation to fibers. However, they presented problems concerning to the hydration at early dates and loss of resistance due to carbonation. Matrices activated with OPC presented better results of MOR at the early dates. In fact, they are more alkaline and they decomposed fibers and reduced the mechanical properties during the aging. The carbonation reduced the alkaline attack, stabilizing the MOR and reducing the loss of tenacity. The accelerated methods with carbonation were efficient in the simulation of the natural ageing.

Keywords: Composites, cellulose fibers, pulps, blast-furnace slag, durability, Weathering, Carbonation.

Introdução

O presente trabalho estuda o comportamento mecânico e a durabilidade de compósitos de cimento reforçados com fibras de celulose, visando seu emprego como alternativa aos compostos de cimento-amianto, atualmente entrando em fase de desuso em todo mundo. A abordagem se concentra no emprego de novas matérias-primas, provenientes de resíduos agroindustriais e no uso de processo adaptado das indústrias de cimento-amianto, o Hatscheck.

Esta introdução apresenta o contexto em que se insere o trabalho, a justificativa do tema, a estrutura, e os objetivos a serem atingidos pela pesquisa.

CONTEXTO DA PESQUISA

O trabalho é parte inicial de um amplo projeto, conduzido em parceria entre o PCC/USP¹, o LCR/FZEA² e a iniciativa privada. Pesquisas e publicações foram desenvolvidas preliminarmente, destacando-se os estágios realizados no CSIRO/AU³ pelo colaborador Prof. Holmer Savastano Jr., como parte de seu programa de Pós-doutoramento e no KTH-Suécia⁴ pelo orientador dessa pesquisa, Prof. Vanderley John.

O projeto, na sua totalidade, visa o desenvolvimento de componentes esbeltos reforçados, produzidos a partir da utilização de matrizes cimentícias e fibras de celulose, que possam ser usados em substituição ao cimento-amianto sem sucateamento da indústria nacional. Este trabalho, como parte integrante do projeto, contribui com o estudo da durabilidade dos compósitos, a partir dos mecanismos e agentes de degradação associados ao seu uso. Não se visa, entretanto, abordar o componente construtivo, e sim o material compósito. Deve-se destacar que o trabalho utiliza o conhecimento tecnológico adquirido em pesquisas anteriores (AGOPYAN; JOHN, 1992) com resíduos e fibras naturais, desenvolvidas pelos

¹ Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da USP.

² Laboratório de Construções Rurais, Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da USP.

³ *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization*, Austrália.

⁴ *Royal Institute of Technology*, Suécia.

grupos de pesquisa em Reciclagem de Resíduos do PCC e em Fibrocimentos Alternativos do LCR/FZEA.

Diversos trabalhos têm sido publicados no âmbito das fibras naturais, como é o caso das teses de livre docência de AGOPYAN (1991) e de doutorado e livre docência de SAVASTANO Jr. (1992 e 2000).

Com relação aos resíduos, as pesquisas têm se concentrado principalmente no uso de subprodutos industriais, tais como as escórias de alto-forno e de aciaria (MACHADO, 2000). Foram publicados, recentemente, estudos sobre metodologias para reciclagem como, por exemplo, o trabalho de livre docência de JOHN (2000b).

Portanto, o projeto baseia-se na integração de duas linhas de pesquisa já consolidadas no Departamento de Engenharia de Construção Civil da POLI/USP: (a) *os materiais reforçados com fibras naturais, tendo como enfoque específico a utilização de fibras de celulose* e (b) *a utilização de cimentos à base de escória*.

JUSTIFICATIVA

A investigação de novos fibrocimentos tem se intensificado nos últimos anos. A tendência ao banimento dos componentes de cimento-amianto, danosos à saúde humana (GIANNASI; THEBÁUD-MONY, 1997), aliada à necessidade de substituição por um novo material, conduz à busca de matérias-primas compatíveis com o parque industrial e que aliem aspectos técnicos e econômicos.

De acordo com a ABIFIBRO, Associação Brasileira das Indústrias e Distribuidores de Produtos de Fibrocimento, no Brasil, a cada ano, são produzidos mais de 2 milhões de toneladas de produtos de cimento-amianto, destinados principalmente ao mercado de telhas onduladas para cobertura e caixas d'água (SAVASTANO Jr., 2000). Em todo o mundo, 21 países já proibiram o uso do mineral, entre eles o Chile, único na América Latina. Até 2005 todos os países membros da União Européia também seguirão a mesma tendência, enquanto que no Brasil a previsão de banimento é, segundo a ABIFIBRO (2001), em 2005⁵. No entanto, este prazo não deve ser concretizado.

⁵ Notícia veiculada no Jornal HOJE da Rede Globo de televisão em 19/03/2001.

O Governo Federal, por intermédio do Ministro do Meio Ambiente, afirma, entretanto, que: *"O uso de amianto deverá ser banido no País até o fim do governo Fernando Henrique Cardoso, em janeiro de 2003. A proposta de banimento está sendo estudada pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama) há mais de um ano e já mandei ofício pedindo pressa nos procedimentos, mas ainda não recebi resposta. A posição do presidente é a mesma"* (AGENCIA ESTADO, 2001).

Por seu lado, alguns estados já saíram na frente quanto à proibição e têm sido intensamente questionados por políticos dos estados produtores do mineral, caso dos de Goiás (FOLHA DE SÃO PAULO, 2001). O Mato Grosso do Sul já vem proibindo a entrada de amianto no Estado desde o começo do ano de 2001; em São Paulo, além da capital, onde a prefeita Marta Suplicy sancionou lei da Câmara Municipal que proíbe o uso de produtos derivados do mineral na construção civil, outras 3 cidades (Osasco, Mogi Mirim e São Caetano do Sul) já proibiram recentemente sua comercialização. Segundo nota divulgada, a prefeita toma a decisão *"como atitude cautelar e preventiva em relação aos problemas de saúde pública que o uso da fibra pode causar"*, afirmando ainda que *"em Osasco, cidade que conviveu por mais de 50 anos com as maiores fábricas de cimento-amianto e freios automotivos do Brasil, entre 960 ex-trabalhadores de uma indústria do setor examinados até janeiro deste ano, foram constatadas 23 mortes, 98 casos de asbestose (reação inflamatória do pulmão às fibras do material), 188 de placas pleurais (a pleura é uma membrana que recobre os pulmões) e 222 de distúrbios respiratórios, enquanto outras 20 mortes estão sob investigação"* (AGÊNCIA ESTADO, 2001; FOLHA DE SÃO PAULO, 2001; JORNAL DA TARDE, 2001).

Além dos danos causados à saúde, as matérias-primas do cimento-amianto apresentam custos altos, se comparados aos de outros materiais; mesmo assim o material ainda se constitui no único composto fibroso à base de matriz cimentícia com larga escala de produção industrial. Empresas paulistas de médio porte do setor de fibrocimentos, quando consultadas sobre o assunto em abril/2000, quantificaram em US\$ 700/tonelada o preço da fibra de amianto, e em US\$ 70 a tonelada do cimento Portland comum (SAVASTANO Jr., 2000).

Nos países desenvolvidos (como Austrália e EUA) e em desenvolvimento (como Filipinas e Chile) onde são produzidos componentes livres de amianto, os processos empregados se baseiam no uso de polpas industriais e técnicas de autoclavagem para cura do material. Outra tecnologia mistura celulose com fibras de PVA e empregam cura normal.

Por sua vez, nos países em desenvolvimento, onde os recursos são escassos e os fibrocimentos atingem a população de baixo poder aquisitivo, é necessário que as pesquisas se concentrem no emprego de matérias-primas que compatibilizem, simultaneamente, baixo custo e desempenho técnico apropriado.

LEE (2000) afirma que é considerável o uso de fibrocimentos nas coberturas das habitações destinadas à população de baixa renda, devido ao seu custo reduzido em comparação a outras soluções disponíveis.

Até recentemente, as pesquisas recaíam no uso de fibras vegetais e/ou plásticas, porém seus avanços esbarravam comumente nas limitações da primeira ao emprego em matrizes alcalinas ou no custo superior das fibras sintéticas. Além disso, os processos empregados para produção dos compósitos reforçados com fibras vegetais têm sido os mesmos utilizados na moldagem e adensamento de argamassas e concretos, ou seja, betoneiras comuns para mistura e vibração para adensamento. Os problemas relatados a partir do uso dessas técnicas são inúmeros (AGOPYAN; DEROLLE, 1988; SAVASTANO Jr *et al.*, 2001; SAVASTANO Jr *et al.*, 2002) e podem ser resumidos em: má distribuição das fibras no interior da matriz; dificuldade de moldagem com teores elevados de fibras; baixas resistências, causadas pela necessidade de aumento na relação a/c para possibilitar a obtenção das consistências requeridas, além de problemas concernentes à durabilidade.

Assim, o presente estudo propõe-se a contribuir com o desenvolvimento de novos fibrocimentos que empreguem matérias-primas de custos reduzidos e processos de produção que se mostrem adequados tecnicamente ao uso de fibras vegetais. O principal enfoque do trabalho foi dado à durabilidade, uma vez que os compósitos foram submetidos a ensaios de envelhecimento pré-estabelecidos e posteriormente avaliados através de suas propriedades mais relevantes.

Deve-se destacar que o trabalho foca a avaliação da durabilidade do compósito, visando seu aperfeiçoamento e melhoria, e não o desenvolvimento do componente construtivo final (telhas onduladas para cobertura ou painéis reforçados, por exemplo). Para tanto, serão necessários trabalhos posteriores, nos quais deverão ser considerados fatores como a geometria da peça, o processo de produção na indústria e a transferência de tecnologia.

OBJETIVOS

Este trabalho se propõe a avaliar diferentes matérias-primas e compósitos de cimento-celulose, além de desenvolver e aperfeiçoar uma *metodologia para avaliar a durabilidade* dos compósitos produzidos a partir destas. A metodologia procurou basear-se em trabalhos e ensaios anteriores, encontrados e descritos na bibliografia estudada.

Buscou-se, também, verificar o *desempenho* dos compósitos através da análise de algumas de suas propriedades, e de suas variações frente aos principais agentes de degradação aos quais o compósito é submetido em uso.

Assim, os objetivos específicos propostos foram:

- Determinar a importância relativa das propriedades da matriz em relação às propriedades do compósito;
- Adaptar ensaios de envelhecimento acelerado que simulem a ação dos agentes de degradação e de seus respectivos mecanismos, e que se aproximem das condições reais de exposição do material;
- Verificar a importância da carbonatação na degradação do compósito;
- Comparar o método de envelhecimento natural com o envelhecimento acelerado;
- Comparar o desempenho dos compósitos produzidos com o de produtos de cimento-amianto comercial.

ESTRUTURA DO TRABALHO

O texto do trabalho está dividido em duas etapas distintas: os capítulos destinados à ***revisão da literatura***, que serviram para embasar conceitualmente a discussão do tema; e os destinados ao ***programa experimental***, onde foram relacionados os ensaios propriamente ditos, suas formas de execução, a análise dos resultados e as conclusões inferidas. Dessa forma, a revisão bibliográfica apresentada nos capítulos I, II e III, está relacionada diretamente aos temas abordados na dissertação, a saber: resíduos, fibras de celulose, compósitos e durabilidade.

Uma visão geral sobre o uso de *resíduos agro-industriais na construção civil* é apresentada no Capítulo I, em que se discutem os problemas inerentes à sua geração sob aspectos econômicos e ambientais. Dá-se um enfoque especial aos resíduos utilizados como

matéria-prima no trabalho, caso da *escória de alto forno* e das *fibras vegetais e de celulose*, apresentando dados de sua produção, características e aspectos de sua disponibilidade para reciclagem. O capítulo trata também da gestão desses resíduos, comentando os fatores que interferem na viabilidade do seu aproveitamento. São discutidos, ainda, o impacto ambiental causado pelos resíduos e sua relação com o desenvolvimento sustentável.

O capítulo II aborda os compósitos cimentícios reforçados com fibras de celulose, tendo como enfoque principal o emprego de materiais residuais e de técnicas que sejam apropriadas à sua produção. São discutidos os processos de produção de polpas celulósicas e as características destas são avaliadas. Destacam-se, também, as matrizes de baixa alcalinidade, indicadas como vantajosas no uso conjunto com fibras de celulose, além de modelos que simulam processos comerciais de produção empregados para obtenção de fibrocimentos de desempenho adequado. O capítulo é finalizado com o estudo da microestrutura do material, verificando como as alterações destas características podem influenciar no comportamento macroscópico do compósito.

Para complementar a revisão bibliográfica, o Capítulo III discute aspectos da durabilidade dos materiais reforçados com celulose, com base na aplicação dos conceitos de desempenho. Desta forma, são identificados os principais agentes, mecanismos e indicadores de degradação, discutindo-se os mais importantes para o caso específico de compósitos reforçados com fibras de celulose.

Ao final de cada capítulo de revisão bibliográfica são inseridos comentários relativos aos assuntos abordados. Os comentários buscam resumir as idéias apresentadas em relação aos temas tratados de acordo com o ponto de vista do autor.

Os capítulos IV, V e VI são destinados ao programa experimental. O capítulo IV descreve os materiais e métodos empregados no trabalho. No capítulo V estão apresentados os resultados obtidos do programa experimental, juntamente com sua discussão. O capítulo VI resume as conclusões obtidas a partir da discussão dos dados e sugere temas para pesquisas futuras.

Capítulo I

Compósitos a base de matérias-primas recicladas

Este capítulo aborda algumas considerações sobre compósitos⁶, utilizando resíduos como matérias-primas. Inicialmente são feitas considerações sobre a importância e as vantagens da reciclagem de resíduos no setor da construção civil. Em seguida, discutem-se alguns tipos de resíduos potencialmente úteis ao emprego neste trabalho.

A utilização de matérias-primas inovadoras para a produção de materiais de construção civil constitui boa opção na busca pelo desenvolvimento social e econômico do País. Seu emprego, aliado ou em substituição às tecnologias tradicionais, pode contribuir de forma significativa para a redução de custos dos materiais e componentes de construção, bastante elevado no Brasil, entre outros fatores por causa dos altos custos de transporte e de energia necessária para sua produção (SAVASTANO Jr., 2000). Como reflexo disso, observa-se a exclusão de boa parte da população do mercado consumidor de habitações, traduzida pelo elevado déficit habitacional e pela grande quantidade de moradias em condições precárias.

O valor do déficit habitacional brasileiro ainda não é consensual entre os pesquisadores. De acordo com as fontes consultadas, varia entre 5 e 13 milhões de habitações (FIESP, 1999; MCKINSEY & COMPANY; LEITÃO, 1999). Estes valores dependem da metodologia do levantamento, e do conceito de déficit empregado pela pesquisa.

Assim, o emprego dessas matérias-primas não tradicionais pode, de certa forma, contribuir para a melhoria das condições de habitabilidade e, conseqüentemente, das condições sociais das populações menos favorecidas (CALDAS *et al.*, 2000).

⁶ A definição genérica considera compósitos como sendo os materiais constituídos por mais de uma fase. Neste trabalho, seguindo a nomenclatura usual do meio, o termo é empregado para materiais reforçados com fibras.

Material não tradicional, potencialmente reciclável e disponível em grandes quantidades, os resíduos agroindustriais se apresentam como alternativa aos materiais tradicionais, destacando-se entre eles os provenientes da agroindústria da fibra vegetal ou da produção de papel e as escórias, derivadas do beneficiamento do aço.

1.1. O IMPACTO AMBIENTAL CAUSADO PELA CONSTRUÇÃO CIVIL

A indústria da construção civil engloba diversos sub-setores. Da produção de materiais, passando pela construção residencial e obras de infra-estrutura, o setor é considerado estratégico no avanço econômico e social de um país, sobretudo no caso específico do Brasil. Isto fica evidenciado pela sua considerável participação no PIB nacional (cerca de 15%) e na geração de empregos (CONSTRUBUSINESS, 1999; MCKINSEY & COMPANY; LEITÃO, 1999). Entretanto, sua dimensão não gera apenas benefícios à sociedade. Seu impacto causado ao meio ambiente é significativo.

1.1.1. MODELOS DE PRODUÇÃO APLICADOS À CONSTRUÇÃO CIVIL

Como ressaltado por JOHN (2000b), no atual modelo de produção em vigência no mundo, os produtos, sejam eles bens de consumo duráveis (caso de edifícios e estradas) ou não duráveis, são concebidos, consumidos e descartados no lixo. Denominado por muitos de insustentável, esse modelo de desenvolvimento atualmente tem sido contestado, e três problemas decorrentes de sua aplicação já podem ser bastante evidenciados (JOHN, 1999). Primeiramente, para muitos materiais, as reservas naturais de matérias-primas já não são tão abundantes. Segue-se ainda, segundo o mesmo autor, o problema gerado pela crescente incorporação de pessoas à sociedade de consumo, produzindo uma quantidade de resíduos cada vez maior. Em terceiro lugar, o atual modelo só se mantém ativo porque a exclusão social atinge 50% da população. Esta fatia da sociedade não tem acesso a bens de consumo⁷ e sua inclusão no mercado inviabilizaria o modelo ainda mais.

⁷ Vide dados do déficit habitacional apresentados na página anterior.

Figura 1.1 - **Ciclo de produção fechado (adaptado a partir de CURWELL; COOPER, 1998; CRAVEN *et al.*, 1996 *apud* JOHN, 2000)**

A **Figura 1.1** apresenta a reformulação do modelo insustentável, aplicando-o à construção civil, onde busca-se reduzir os impactos causados e o desperdício. A adaptação deste modelo minimizaria os impactos, pois os materiais passariam a ser reaproveitados e reciclados. Denominado de ciclo fechado, o modelo proposto (CURWELL; COOPER, 1998) prevê a racionalização do uso dos materiais e a geração de resíduos em quantidades suficientes que possibilitem a reciclagem (JOHN, 2000b).

1.1.2. CONSUMO E EXTRAÇÃO DE MATÉRIAS-PRIMAS E RECURSOS NATURAIS

A necessidade de ampliação do ambiente construído nos países em desenvolvimento também conduz a impactos ambientais relevantes. Isso pode ser demonstrado pelo elevado consumo de matérias-primas pelo setor que, segundo diferentes estimativas, varia entre 15% e 50% (SJÖTRÖM *apud* JOHN, 2000b) da quantidade total de recursos extraídos da natureza.

O alto consumo energético é outro indicativo do uso de recursos naturais pela indústria da construção civil. O ENBRI (European Network of Building Research Institute, 1994) apresentou a indústria como responsável por 4,5% do consumo de energia mundial, sendo 84% desta usada apenas na fase de produção de materiais.

O *World Resources Institute* (WRI) *apud* JOHN (2000b) cita estudo estimando que países industrializados como Alemanha, Japão e EUA consomem entre 45 e 85 toneladas/hab/ano de matérias primas, sem incluir água e ar.

1.1.3. POLÍTICAS VOLTADAS PARA O MEIO AMBIENTE

A questão ambiental atualmente é considerada pelos seus líderes como um dos principais desafios a ser equacionado pelo setor da construção. Pesquisa de opinião internacional realizada pela CERF (Civil Engineering Research Foundation) apontou o tema como sendo o segundo mais importante de uma lista apresentada (CERF *apud* JOHN, 2000a), conforme mostra o quadro abaixo.

Figura 1.2 - **Desafios para o setor de construção civil, segundo a pesquisa da CERF. Escala relativa (a partir de JOHN, 2000a).**

JOHN (2000b) afirma que a questão ambiental é ainda mais importante, profunda e de maior alcance social que sua antecessora –a qualidade, pois não se discute apenas a satisfação dos usuários diante de um produto específico, mas sim o futuro da humanidade ao longo do tempo, bem como a qualidade de vida da população a curto e médio prazo.

Ações do setor voltadas para a preservação do meio ambiente contribuem para o estabelecimento de um modelo de desenvolvimento sustentável. Entre estas ações destaca-se a reciclagem de resíduos. A partir do reaproveitamento de sub-produtos (inclusive de outras indústrias) pode-se reduzir a extração de matérias-primas naturais, o consumo de energia para produção de materiais e a emissão de gases na atmosfera. Em

conjunto, estes fatores contribuem para suprir às necessidades de vida da população presente, melhorando sua qualidade de vida sem, entretanto, comprometer as gerações futuras, premissa básica do desenvolvimento sustentável. Aspectos de *marketing*, caso dos selos verdes, também contribuem para a difusão do uso de materiais reciclados pela sociedade (JOHN, 1996). A indicação de produto ambientalmente favorável contribui na hora da escolha do consumidor.

Assim, conclui-se que a reciclagem, sob os pontos de vista econômico e ambiental, permite (ENBRI, 1994):

- a) Reduzir o volume de extração de matérias-primas e conservar as não renováveis, beneficiando o meio ambiente;
- b) Diminuir o consumo de energia para a produção de materiais, com a conseqüente diminuição dos custos de seus derivados e a menor necessidade de investimentos econômicos e ambientais com geração de energia;
- c) Minorar o volume de emissões atmosféricas, como, por exemplo, o CO₂;
- d) Melhorar a saúde e a segurança da população.

JOHN (1999) classifica a reciclagem de resíduos como parte fundamental do desenvolvimento sustentável de qualquer país, mas, até pouco tempo atrás, sua prática estava restrita apenas a uma alternativa para redução de custos, visão que aparentemente tem se alterado, sobretudo em função de pesquisas desenvolvidas buscando-se melhorar o desempenho de produtos através da incorporação de resíduos e produtos reciclados. Um bom exemplo disso é o caso da incorporação de cinzas e materiais pozolânicos residuais aos compostos cimentícios, visando principalmente à melhoria das suas propriedades físicas e mecânicas, e de sua durabilidade. A aliança entre esses dois aspectos – baixo custo e desempenho adequado, torna-se uma das grandes vantagens potenciais da reciclagem de resíduos.

1.2. RESÍDUOS AGRO-INDUSTRIAIS

JOHN (1996) classifica resíduo industrial como sinônimo de subproduto, enquadrando assim, todos os produtos secundários gerados em um processo⁸. Alguns autores costumam diferenciar subproduto de resíduo, definindo o primeiro como sendo o resíduo que adquire valor comercial (CINCOTTO, 1988; VALLE, 1995).

Os resíduos agro-industriais (RAI) são provenientes de atividades como agricultura, indústrias têxteis, de papel, automobilísticas e de beneficiamento de metais e, devido à sua geração concentrada, sua recuperação torna-se mais fácil (JOHN, 2000b). Para o seu emprego como matéria-prima, é importante o conhecimento de suas características químicas, físicas e dos prováveis riscos que essa utilização possa vir a causar ao ambiente (JOHN, 1996). A análise dessas características possibilita o direcionamento mais adequado da reciclagem, levando-se em conta os potenciais intrínsecos apresentados pelos resíduos. Fatores como necessidade de transporte até o local de uso, constância ou sazonalidade na produção e forma de apresentação dos resíduos podem ser o diferencial entre a viabilidade ou não da sua reciclagem.

Inúmeros problemas poderiam ser reduzidos com a reciclagem dos RAI, como o impacto ambiental e os custos agregados das indústrias. Deve-se ressaltar, entretanto, a importância de não relacionar o uso de materiais reciclados apenas a aspectos econômicos, mas também às vantagens técnicas advindas da sua incorporação ao produto final.

1.2.1. USO DE RAI NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Como já demonstrado, a construção civil, pela sua ampla distribuição geográfica e pelo volume de materiais consumidos, apresenta-se como boa alternativa para absorção dos resíduos produzidos em outros setores produtivos. As maiores experiências na área de reciclagem de resíduos na construção civil são as empreendidas pelos setores de produção de cimento e aço, responsáveis pela reciclagem de escórias/cinzas e sucata, respectivamente.

Dados recentes mostram que as indústrias cimenteiras incorporam, somente no Brasil, entre 2 e 3 milhões de toneladas de escórias de alto-forno a cada ano (JOHN, 1996). Esta

⁸ Produtos para os quais o processo não foi concebido.

reciclagem permite reduzir a elevada emissão de CO₂ (mostrada na **Figura 1.3**) em até 29%, o que conduz também a uma economia de combustível de 28% (YAMAMOTO *et al.* 1997). Além disso, MARCIANO e KHIARA (1997) estimaram que a indústria cimenteira economizou, entre 1976 e 1995, 750 mil toneladas de combustível, substituindo-os pela queima de serragem, pneus, borrachas e outros tipos diversos de resíduos, técnica conhecida pelo nome de co-processamento.

Figura 1.3 – **Evolução histórica da participação da indústria de cimento na geração mundial e nacional de CO₂ na atmosfera devido à queima de combustíveis fósseis para produção de cimento (JOHN, 2000b).**

No caso da siderurgia, esta produz praticamente todo o aço destinado ao reforço de concreto através da reciclagem de sucata. JOHN (1999) afirma que a medida permitiu, em 1997, uma economia na extração de minério de ferro da ordem de 6 milhões de toneladas, evitando também uma geração de 2,3 milhões de resíduos e de cerca de 11 milhões de toneladas de CO₂.

1.3. AGLOMERANTES ALTERNATIVOS

Os aglomerantes alternativos são assim chamados por causa da sua constituição, ausente de clínquer Portland e sem a necessidade de calcinação para sua produção, refletindo-se em menor custo e condição ambientalmente favorável. Assim como os aglomerantes

hidráulicos tradicionais, eles reagem quimicamente em meio aquoso por meio de mecanismo conhecido como *dissolução-precipitação*⁹, tornando-se, no estado sólido, um produto estável e insolúvel em água. Seu emprego obedece a critérios técnicos e econômicos (AGOPYAN, 1991; CINCOTTO, 1984; SAVASTANO Jr., 2000).

A composição química e o elevado conteúdo energético destes resíduos – caso das escórias de alto-forno granuladas e das cinzas volantes, tornam alguns resíduos adequados à produção de cimentos alternativos sem a necessidade de calcinação da matéria-prima, o que permite uma redução no consumo energético de até 80%, refletindo-se assim no custo final do material e conseqüentemente do sistema onde está inserido (JOHN, 1995). Além da composição química, a superfície específica e sua organização estrutural interna – preferencialmente vítrea, têm grande influência na sua hidraulicidade.

Sua composição química deve apresentar, preferencialmente, compostos de cálcio, silício e alumínio. As escórias básicas granuladas e as cinzas¹⁰ pozolânicas são os aglomerantes alternativos mais difundidos. Outros materiais como as cinzas vegetais, que têm como principal representante a cinza de casca-de-arroz, também podem ser empregados para a produção de aglomerantes. Essas cinzas que apresentam atividade pozolânica, ao contrário das escórias de alto-forno, necessitam de uma fonte auxiliar de cálcio, que pode ser o cimento Portland ou a cal hidratada, para que possam formar produtos hidratados em meio aquoso.

Resíduos provenientes da agroindústria da cana-de-açúcar também podem ser empregados como aglomerantes, como pesquisado por HERNANDEZ *et al.* (1998), que estudaram a microestrutura de pastas produzidas a partir da mistura de cinzas de palha e bagaço com cimento e cal hidratada e concluíram pela presença de produtos hidratados estáveis.

AGOPYAN (1991) estudou cimentos alternativos objetivando seu emprego em compósitos reforçados com fibras vegetais. O autor empregou cimentos de escória e à base de cinza de casca de arroz calcinada para obtenção de produtos hidratados menos alcalinos.

⁹ A dissolução consiste na liberação de espécies químicas em meio aquoso até a sua saturação. A partir daí, inicia-se a precipitação de compostos hidratados, no caso específico o Silicato de Cálcio ou C-S-H.

¹⁰ Principalmente as provenientes da queima de carvão em termoelétricas, *fly-ashes* ou, em português, cinza volante.

SAVASTANO Jr. *et al.* (1998) realizaram estudos com cimentos de escória de baixa alcalinidade e concluíram pela viabilidade de seu uso em componentes construtivos por apresentarem durabilidade semelhante à de outros sistemas compatíveis (AGOPYAN; JOHN, 1992).

1.3.1. CLASSIFICAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DAS ESCÓRIAS

As escórias podem ser classificadas, de acordo com a sua composição química, em dois grupos: as básicas e as ácidas. Essa diferenciação dá-se em função da relação CaO/SiO_2 , maior que 1 para as básicas e menor que 1 para as ácidas. O principal efeito decorrente dessa diferença se dá pela maior solubilidade em meio aquoso das primeiras. CINCOTTO *et al.* (1992) afirmam que as escórias brasileiras possuem relação CaO/SiO_2 entre 1,14 e 1,33.

Para utilização como aglomerante, as escórias precisam ter, como característica fundamental, a reatividade hidráulica, função de diversos fatores, como conteúdo de fase vítrea, composição química e finura. Temperatura e pH do meio podem influenciar a sua maior ou menor hidraulicidade. A hidraulicidade pode ser avaliada por métodos como o ensaio acelerado com soda, o teste de *MICHELSSEN* e o índice de refração da escória. Alguns autores costumam incluir a idade entre os fatores relevantes na reatividade da escória, considerando que escórias antigas podem apresentar uma pré-hidratação na sua estocagem, prejudicando assim seu bom desempenho (JOLICOEUR *et al.*, nd).

A **Tabela 1-1** apresenta a composição química média das escória básicas e ácidas produzidas no Brasil tendo o cimento Portland como referência:

Tabela 1-1 – **Composição química típica de escórias e do cimento Portland (JOHN, 1995).**

	Escória básica (%)	Escória ácida (%)	Cimento Portland (%)
CaO	40 – 45	24 – 39	66
SiO₂	30 – 35	38 – 55	22
Al₂O₃	11 – 18	8 – 19	5
MgO	2,5 – 9	1,5 – 9	-
Fe₂O₃	0 – 2	0,4 – 2,5	3
FeO	0 – 2	0,2 – 1,5	-
S	0,5 – 1,5	0,03 – 0,2	-
Ca/Si média	1,31	0,68	3

Em termos gerais, as escórias básicas são provenientes do processo de produção de ferro gusa em altos-fornos a coque e as ácidas em alto-forno carvão vegetal. A maior ou menor concentração de Ca em sua composição influencia na sua solubilidade e depende à quantidade deste óxido adicionado ao forno com a função de fundente. Ambas podem se apresentar sob a forma de grãos, similares à areia e necessitam de moagem.

1.3.2. ESCORIAS DE ALTO-FORNO (EAF)

O uso de EAF como adição a compostos cimentícios já é bastante difundido no nosso país e em diversas regiões da Europa (CINCOTTO *et al.*, 1992). Seu emprego se apresenta sob a forma de adição aos cimentos Portlands ou diretamente na produção de concretos (ACI *apud* SILVA, 1998). No Brasil, que a partir de 1952 iniciou a adição de EAF aos cimentos (BATTAGIN; ESPER, 1988), produtos comerciais estão disponíveis no mercado e sua aceitação por parte do consumidor já foi estabelecida.

Entretanto, a quantidade empregada para produção desses tipos de cimento Portland ainda não é suficiente para esgotar o excedente deste sub-produto. Isto conduz ao seu emprego em outras aplicações mais específicas, principalmente por questões ambientais e de ordem econômica (SILVA, 1998). Entre as aplicações potenciais, destaca-se a produção dos cimentos DE escória que, ao contrário dos cimentos COM adição de escória¹¹, não possuem como componente principal o clínquer Portland.

De cada tonelada de ferro-gusa, produzida em alto-forno a coque, são gerados cerca de 330 kg de escória granulada (JOHN, 1995). No Brasil, a produção de gusa é de aproximadamente 25 milhões de toneladas, gerando aproximadamente 8 milhões de toneladas de EAF disponível para reciclagem. Já retirada a parte consumida pelas cimenteiras, JOHN (1995); CINCOTTO *et al.* (1992) estimam que existem aproximadamente 4 milhões de toneladas de escória disponíveis a cada ano, com valor de mercado inferior a US\$ 10/tonelada. No caso do seu uso para produção do cimento de escória, o único beneficiamento necessário é a sua moagem e a adição dos chamados ativadores, o que elevam o preço desse tipo de cimento.

¹¹ Casos dos CP-II E e CP-III brasileiros;

No Brasil, inúmeros pesquisadores (BATTAGIN; ESPER, 1988; AGOPYAN, 1991; CINCOTTO *et al.*, 1992; JOHN, 1995; SILVA, 1998; OLIVEIRA, 2000) têm atentado para as vantagens advindas do emprego de cimento de EAF. Pela menor alcalinidade de seus produtos hidratados, são especialmente indicados para o uso em compósitos onde são empregados fibras sensíveis a álcalis ou onde se deseje produzir materiais de menor custo pelo uso de resíduos. Ao contrário do cimento Portland, é possível formular cimentos de EAF com baixo teor de portlandita e álcalis (dependendo dos ativadores) e baixo pH da água do poro (OLIVEIRA, 2000), credenciando-o para produção de matrizes reforçadas com fibras sensíveis a meios alcalinos.

Outra vantagem no seu uso em compósitos reforçados é a ausência de macro-cristais de portlandita na interface fibra-matriz do compósito, o que prejudicaria sua boa ligação, imprescindível quando do emprego de fibras vegetais. SAVASTANO Jr. (2000) analisou, através de MEV, pastas de cimento de EAF reforçadas com fibras de eucalipto e observou a ausência de alta concentração de cal livre perto da superfície da fibra, o que mencionou como uma das vantagens deste cimento. Entretanto, no mesmo estudo, o autor observou a presença, aos 32 dias de idade, de grãos anidros de escória com arestas vivas e pouco atacadas, devido à sua má hidratação, confirmando que o seu desenvolvimento de resistência e a sua hidratação ocorrem mais lentamente que o cimento Portland (TAYLOR, 1997).

1.3.3. ATIVAÇÃO

Devido à sua baixa reatividade em meio aquoso (JOLICOEUR *et al.*, nd; SILVA, 1998), empregam-se métodos para acelerar hidratação da escória. Conhecidos por ativação, podem ser químicos, através da utilização de produtos alcalinos, ou térmicos, aumentando-se a temperatura do meio de reação. Também é descrito na literatura o chamado processo mecânico, que consiste no aumento da moagem, possibilitando assim uma maior finura do material e aumentando sua área de contato disponível para reação. Estudos concluem que o aumento da área específica através da moagem conduz a maior quantidade de escória hidratada em um dado intervalo de tempo, comprovando assim a influência da finura na sua hidratação (SATO *apud* JOHN, 1999). Entretanto, aspectos técnicos – como o alto consumo energético, e econômicos são empecilhos ao emprego desse método como única forma de ativação.

A hidratação da escória em meio aquoso ocorre lentamente por dois motivos: sua baixa solubilidade em pHs neutros, como o da água, e pela formação de uma camada impermeável na superfície da escória, dificultando o prosseguimento de sua dissolução (CINCOTTO *et al.*, 1992).

A ativação química é empregada com mais frequência, interferindo na velocidade de hidratação da escória através de dois fatores (JOHN, 1995):

- Elevação da velocidade de dissolução pela elevação do pH do meio aquoso;
- Antecipação do início de precipitação dos compostos hidratados, pelo aumento da concentração de íons na solução no início da dissolução ou pela alteração da solubilidade da escória;

Os produtos alcalinos mais comumente empregados para ativação da escória são os hidróxidos de cálcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ e de sódio $[\text{NaOH}]$, o silicato de sódio $[\text{Na}_2\text{O} \cdot x\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}]$, o sulfato de cálcio ou a combinação desses. Também pode ser empregado como ativador o próprio cimento Portland (OLIVEIRA, 2000).

AGOPYAN (1991) realizou estudos para avaliação de ativadores mais adequados à escória. O uso da cal hidratada apresentou vantagens como o aumento das resistências às primeiras idades. Porém, adicionalmente, relatou como inconveniente o elevado conteúdo de cal livre na mistura hidratada. A solução encontrada foi a sua utilização em conjunto com a gipsita, empregando teores de cal hidratada mínimos que permitissem o emprego do aglomerante sem demora excessiva na pega.

1.4. REFORÇO DE MATRIZES FRÁGEIS COM FIBRAS

A construção civil emprega matrizes frágeis: as pastas, argamassas e concretos. Estas matrizes, na sua maioria derivadas de aglomerantes minerais, rompem-se sem deformação plástica e, apesar de resistentes a esforços de compressão, não suportam grandes solicitações de tração e cargas dinâmicas. Para compensar esta deficiência, outros materiais -como o aço, são empregados como reforço aos materiais à base de cimento. O concreto armado pode ser descrito como exemplo clássico.

Em caso de componentes esbeltos ou em aplicações onde a massa específica deva ser considerada, como os painéis, as telhas e as divisórias, o reforço deve ser feito com materiais compatíveis, em dimensão e massa, com a aplicação desejada. O uso das fibras

surge então como alternativa técnica recomendada. Sua aplicação tem sido bastante difundida atualmente, constituindo-se em um campo de pesquisa em expansão no mundo todo, inclusive no Brasil (SAVASTANO Jr., 2000), onde atualmente existem pesquisas em andamento visando o desenvolvimento de componentes com emprego de fibras residuais (papel jornal e eucalipto residual) (NEVES, 2000; SAVASTANO Jr., 2002). As fibras, além de apresentarem as vantagens descritas acima, podem contribuir para a minimização da retração das matrizes.

1.4.1. FIBRAS - TIPOS E CLASSIFICAÇÃO

Em relação à sua composição, as fibras podem ser orgânicas ou inorgânicas¹². As fibras orgânicas se dividem, ainda, em naturais ou artificiais. Existem controvérsias relativas a alguns tipos de fibras e sua classificação, principalmente no que se refere às fibras de celulose. Apesar de provenientes da natureza (plantas fibrosas ou madeiras), o pré-tratamento antes do seu emprego¹³ ainda suscita opiniões contraditórias. Neste trabalho, denominamos por fibra orgânica natural aquela proveniente de vegetais que não passou por processo industrial antes de seu emprego como reforço. A figura a seguir, adaptada a partir de ZHU (1993), apresenta um diagrama de classificação de algumas fibras.

Figura 1.4 - **Classificação das fibras (a partir de ZHU,1993).**

As fibras podem se dividir, de acordo com sua elasticidade, em fibras de baixo e alto módulo, diferindo, assim, suas aplicações. As fibras de alto módulo melhoram a resistência do compósito, principalmente à tração, enquanto as de baixo módulo propiciam melhores resistências ao impacto e permitem ao compósito trabalhar no estágio pós fissurado,

¹² As fibras inorgânicas (ex. fibras de aço) não são alvo deste estudo.

¹³ No caso de papéis por exemplo.

aumentando consideravelmente sua tenacidade (AGOPYAN, 1991) quando aplicadas em teores adequados.

1.4.2. EMPREGO DE FIBRAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A utilização de fibras vegetais em compósitos reforçados para a construção civil pode ser de grande interesse para os países em desenvolvimento e seria capaz de contribuir para o crescimento de suas infra-estruturas (SWAMY, 1990; SAVASTANO Jr., 2000).

Seu estudo sistemático data da década de 70, na Inglaterra, tendo sido iniciado, no Brasil, no ano de 1980, por meio das pesquisas desenvolvidas no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento (Ceped), em Camaçari na Bahia.

O estudo do Ceped (1982) contemplou o desenvolvimento de argamassas reforçadas com fibras de coco, piaçava e sisal, de volumes e comprimentos variáveis. Os melhores resultados foram obtidos com fibras longas (>270mm) de sisal e piaçava, que apresentaram valores das propriedades mecânicas acima dos obtidos com a matriz sem reforço. Os pesquisadores desenvolveram uma telha tipo canal, chamada telhão, moldada em duas camadas de argamassa com as fibras colocadas manualmente entre as camadas. A moldagem foi realizada sobre uma folha plástica com um esquadro de madeira e em seguida a telha era colocada suspensa em dois cavaletes, adquirindo assim o formato de canal. Um dos problemas relatados foi decorrente da má distribuição das fibras, tendo sido recomendada a adição das fibras durante o processo de mistura da argamassa.

As características físicas e mecânicas de algumas fibras disponíveis no Brasil foram sintetizadas por SAVASTANO Jr. (2000) e estão apresentadas na **Tabela 1-2**:

Tabela 1-2 – **Características físicas e mecânicas das fibras vegetais, de celulose, amianto e polipropileno (AGOPYAN; SAVASTANO Jr. (1997); NOLASCO (1998) e SWAMY (1998).**

Fibras	Propriedades				
	Massa específica (Kg/m ³)	Absorção máxima (%)	Alongamento na ruptura (%)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Coco	1177	93,8	23,9 a 51,4	95 a 118	2,8
Sisal	1370	110,0	4,9 a 5,4	347 a 378	15,2
Malva	1409	182,2	5,2	160	17,4
Amianto	2200 a 2600	-	2	560 a 750	164
Polipropileno	913	-	22,3 a 26,0	250	2,0
Celulose	1609	643	-	700	10-40

A análise da tabela acima permite concluir que, apesar da variabilidade nas características das fibras, seu uso como reforço pode melhorar as propriedades dos compósitos à base de cimento.

As fibras vegetais são fibras de baixo módulo de elasticidade e elevada resistência à tração. Seu emprego como reforço proporciona às matrizes cimentícias maior resistência ao impacto, causada por maior absorção de energia, possibilidade de trabalho no estágio pós fissurado e um aumento na capacidade de isolamento termo-acústico (AGOPYAN; SAVASTANO Jr., 1997).

Por outro lado, o seu emprego ainda traz consigo algumas dificuldades associadas ao uso em compósitos à base de cimento e, por isso, a necessidade de aperfeiçoamento dessa tecnologia. Dentre as dificuldades reportadas que limitam seu uso, podemos citar:

- A presença de contaminantes que interferem, por exemplo, na hidratação dos aglomerantes. COUTTS; WARDEN (1992) por meio de processo de de-lignificação aplicado a fibras de sisal, conseguiram resultados de resistência à tração na flexão da ordem de 20 MPa em compósitos com 8% de fibra em relação à massa do cimento;
- Adequação dos processos de produção dos compósitos. Os processos convencionais, de mistura e moldagem, geralmente originam problemas de má distribuição das fibras na matriz, com incorporação excessiva de vazios, causando um aumento na

porosidade do material. A ordem de mistura, a retirada do excesso de água, a aplicação de pressão após a moldagem e o uso de autoclave são técnicas que melhoram o desempenho do compósito (COUTTS; NI, 1995; SAVASTANO *et al.*, 2000).

1.4.3. DISPONIBILIDADE DE FIBRAS

AGOPYAN (1991) realizou um amplo estudo sobre as fibras vegetais disponíveis no Brasil e a possibilidade do seu emprego na construção civil, destacando como importante a quantificação de sua disponibilidade e distribuição geográfica. A avaliação das principais características físicas, custos, durabilidade e possibilidade de cultivo no Brasil, definiu as mais adequadas ao uso como reforço de matrizes cimentícias, em comparação a outras fibras já utilizadas, como as de amianto e as de polipropileno. As fibras selecionadas foram provenientes de rejeitos das indústrias de amarras, estofados e tecelagem e eram descartadas em função de seu comprimento diminuto para essas aplicações (AGOPYAN, 1988), apresentando custos reduzidos. Porém, a alta variabilidade característica dessas fibras também foi destacada pelo autor no trabalho. Por seu custo reduzido, larga disponibilidade e características adequadas ao emprego como reforço, os resíduos provenientes da indústria de fibras vegetais são vistos como excelente opção para produção de fibrocimentos alternativos nos países em desenvolvimento. A **Tabela 1-3** apresenta a síntese de um levantamento realizado sobre alguns resíduos potencialmente úteis ao emprego como reforço de matrizes cimentícias (SAVASTANO Jr., 2000).

Tabela 1-3 - **Alguns resíduos oriundos do processamento de fibras ligno-celulósicas (SAVASTANO Jr., 2000).**

Fibra	Produto principal	Resíduo				
		Denominação	Aproveitamento para outro fim	Valor mercado US\$/ton	Quadde (t/ano) - abrangência	Relação ¹⁴ (%)
Malva	Fibra bruta limpa	Fibra tipo 4	Tecelagem e fiação com baixo rendimento	340	1180 Brasil	20
Coco	Fibras longas e médias	Fibras curtas (1 – 3 cm)	Parcial: filtros, mantas, tapetes e substrato agrícola	270	3000 Brasil	40
Polpa de celulose eucalipto	Produção de papel	Rejeito	Papel de qualidade inferior	15	17000 Aracruz/ES	0,5
Sisal	Fibra verde antes da secagem	Bucha verde (já separada do bagaço)	Uso potencial para produção de celulose	Nulo	30000 Apaeb/BA	300
	Fios e cordas	Bucha branca (sem tratamento)	Produção de celulose (uso total)	180	25 Crispim	1,5
	Tapetes	Retalhos de fios (tingimento a quente)	Uso potencial para produção de celulose	Nulo	54 Cosibra	6

A **Tabela 1-1** indica parâmetros importantes para definição da viabilidade da reciclagem dos resíduos fibrosos: quantidades de resíduos disponíveis, sua dispersão geográfica, as características das fibras e seu valor de mercado. Estes dados devem ser analisados em conjunto, permitindo uma avaliação sistêmica para cada caso.

1.4.4. COMPOSIÇÃO E MICROESTRUTURA DAS FIBRAS

O conhecimento da estrutura interna das fibras ligno-celulósicas e da sua composição química é importante para a compreensão de como ela poderá influir nas características do compósito onde foram empregadas.

As fibras são compostas, basicamente, de celulose, hemicelulose e lignina (ILSTON, 1994), conforme apresentado na **Tabela 1-4**. Essas substâncias são cadeias poliméricas que vão, desde longas, como é o caso da celulose, até menores, caso da lignina. As cadeias de

¹⁴ Resíduo gerado em relação ao produto.

celulose possuem grau de polimerização (GP) da ordem de 25.000 e estão aglomeradas por hemicelulose e lignina amorfa com GPs variando entre 50 e 200. Do GP depende a maior ou menor solubilidade em meio aquoso e alcalino. Substâncias com menor GP tendem a ser mais solúveis e por isso, como no caso da lignina, podem provocar perda de resistência mecânica por decomposição quando empregadas como reforço.

Tabela 1-4 - **Composição química das microfibras (adaptado de ILSTON, 1994).**

	Estado polimérico	Função
Celulose	Cristalino	Fibra
Hemicelulose	Semi-cristalino	Matriz
Lignina	Amorfo	Matriz

A **Tabela 1-5** apresenta a composição de algumas fibras estudadas por SAVASTANO Jr.; AGOPYAN (1997).

Tabela 1-5 – **Composição de algumas fibras vegetais (SAVASTANO Jr.; AGOPYAN, 1997).**

Fibras	Celulose (% massa)	Lignina (% massa)	Ângulo das microfibrilas
Malva	76,0	10,0	8
Sisal	78,6	9,9	10 – 22
Coco	53,0	40,8	30 – 49

A estrutura física das fibras é constituída por células individuais, compostas de microfibrilas e dispostas em camadas de diferentes espessuras e ângulos de orientação. Dessa forma, o que denominamos de fibra (ou mais corretamente, macrofibra) é, na verdade, um conjunto de células individuais, as chamadas microfibrilas, aglomeradas pela lamela intercelular. A **Figura 1.5** apresenta o esquema estrutural de uma fibra ligno-celulósica.

Figura 1.5 - **Esquema da estrutura da fibra de celulose e de uma macrofibra (GRAM, 1988; COUTTS, 1992).**

A análise da **Tabela 1-5** em conjunto com a **Tabela 1-2** permite concluir que a resistência à tração e o módulo de elasticidade das fibras variam diretamente com o teor de celulose e inversamente com o ângulo das microfibrilas (SAVASTANO Jr., 2000).

COUTTS *apud* SAVASTANO Jr. (2000) estudou essa disposição e encontrou células das fibras com dimensões entre 10 μ m e 25 μ m de diâmetro e compostas por quatro camadas de microfibrilas. As dimensões das células podem influenciar nas suas características. Fibras com relação de aspecto (comprimento/espessura) alta tendem a possuir resistências à tração mais elevadas, podendo contribuir positivamente com a resistência à flexão do compósito, pelo efeito de melhor ancoragem na matriz (McKENZIE, 1994). Contudo, relações de aspecto altas podem também conduzir a reduções nos valores de absorção de energia do compósito, pela ruptura da fibra, em detrimento de seu arrancamento da matriz. As fibras longas podem ainda trazer dificuldades nos processos de produção de compósitos por meio de dispersão em solução aquosa (SAVASTANO Jr, 2000). O mesmo autor também justificou a elevada absorção de água e massa específica aparente das fibras, pela grande incidência de poros permeáveis oriundos das lacunas e lumens encontrados nas fibras. A absorção alta favorece o apodrecimento da fibra bem como facilita o ataque alcalino da matriz, considerado prejudicial (SAVASTANO Jr., 1987).

1.5. COMENTÁRIOS

O uso de fibras residuais e de aglomerantes alternativos à base de resíduos surge como boa opção para redução dos custos dos materiais de construção empregados na habitação. Por sua disponibilidade e custos adequados, podem ser usados na produção de novos fibrocimentos, que venham a substituir o cimento-amianto como material para produção de componentes esbeltos reforçados. Entretanto, as pesquisas desenvolvidas até o momento têm apresentado dificuldades relacionadas à durabilidade das matérias-primas e aos processos de produção empregados. Estes são os principais motivos que explicam a ainda pouca difusão os compósitos reforçados com fibras ligno-celulósicas. O capítulo a seguir avalia novas formas de emprego das fibras, aliadas a processos industriais adaptados. Estas soluções podem representar a viabilização definitiva de produtos desenvolvidos à base dessas fibras e de aglomerantes alternativos.

Capítulo II

Reforço com fibras de celulose

No presente capítulo, são abordadas matérias-primas e técnicas adequadas à produção de compósitos reforçados. Elas incluem o uso de polpas celulósicas, matrizes de baixa alcalinidade e processos que empregam o uso de vácuo e pressão na moldagem, e são adaptadas dos processos empregados nas indústrias de fibrocimentos comerciais¹⁵.

2.1. FIBRAS DE CELULOSE

O que se chama corriqueiramente de fibra é, conforme já apresentado no item 1.4.4, um conjunto de filamentos individuais, formados por fibrilas¹⁶ e unidas por espécies químicas orgânicas não cristalinas (lignina e hemicelulose). As fibrilas são compostas por moléculas de celulose e estão orientadas em ângulos distintos, formando as diversas camadas que compõem a macrofibra. Assim, de forma simplificada, a denominação “macrofibra” é dada ao conjunto de filamentos, compostos preferencialmente por moléculas de celulose e unidos por hemicelulose e lignina.

Em função de sua maior cristalinidade e do seu alto grau de polimerização (GP), a celulose, como já visto na **Figura 1.5** e na **Tabela 1-5**, costuma apresentar uma maior estabilidade aos efeitos da degradação, seja ela mecânica, química ou térmica, quando comparadas aos componentes não-celulósicos co-formadores das fibras. VAN VLACK (1970) afirma que produtos naturais como a celulose, por possuírem moléculas grandes, são mais resistentes às tensões mecânicas e térmicas que os compostos formados por moléculas pequenas. Dessa forma, a durabilidade e a resistência à tração de fibras individuais de celulose serão notadamente superiores às apresentadas por suas respectivas macrofibras (COUTTS, 1986).

¹⁵ O processo em questão é conhecido como Hatscheck e será abordado com mais propriedade no item 2.5.

¹⁶ Ver **Figura 1.5** do capítulo anterior.

O uso de macrofibras explica, em parte, o insucesso dos resultados obtidos em pesquisas que buscaram empregar as fibras em seu estado natural como reforço de matrizes cimentícias (AGOPYAN, 1988). Apesar de apresentarem desempenho mecânico adequado, as fibras invariavelmente se decompunham, especialmente devido à dissolução da lignina pela elevada alcalinidade da água do poro das matrizes cimentícias, reduzindo assim o desempenho do compósito ao longo do tempo. A **Figura 2.1** apresenta esquematicamente a estrutura de uma fibra (no caso proveniente da madeira), mostrando sua resistência à tração em diversas fases de processamento. COUTTS (1986) apresenta a celulose com resistência à tração dez vezes maior que o filamento (macrofibra) que a contém.

Figura 2.1 - **Representação esquemática da estrutura de uma fibra proveniente da madeira, comparando suas resistências à tração em diversas etapas de processamento da madeira (a partir de COUTTS, 1986).**

As fibras de celulose normalmente se apresentam na forma de polpas ou folhas¹⁷, utilizadas para diversos fins, destacando-se a produção de variados tipos de papel (COUTTS, 1986). A utilização de polpas celulósicas no reforço de materiais à base de matrizes cimentícias tem adquirido importância cada vez maior em todo mundo, sobretudo nos países desenvolvidos (SAVASTANO Jr., 2000).

2.1.1. DISPONIBILIDADE

As polpas celulósicas são bastante difundidas e seu uso em todo mundo se concentra principalmente na produção de papel. Seu emprego em fibrocimentos tem-se ampliado nos últimos anos e estudos direcionados a este emprego têm-se desenvolvido pois o

¹⁷ Polpas são pastas (úmidas) empregadas, na maioria das vezes, nas indústrias de papel. Folhas são a forma comercial de apresentação da celulose.

comportamento da fibra no interior da matriz cimentícia é diferente do seu uso como papel (HIGGINS, 1996). Países como a Austrália já produzem polpas com fins específicos de uso em compósitos, e os processos de polpação¹⁸ já vêm sendo aperfeiçoados para a obtenção de polpas adequadas a este fim (COUTTS, 1992).

As fibras de celulose se apresentam sob o formato de folhas comerciais e, no Brasil, sua produção pode ser encontrada em praticamente todas as regiões. A celulose pode ser produzida a partir de diversos tipos de espécies vegetais, sejam elas plantas fibrosas ou madeiras, dependendo da disponibilidade encontrada na região.

A **Tabela 1-3**, apresentada no capítulo anterior, mostra a disponibilidade da celulose de eucalipto produzida em apenas uma indústria no Brasil. Estas fibras apresentam uma redução em seus teores de componentes não-celulósicos (lignina em torno de 0,5%) e são consideradas como opção ao reforço de compósitos (FORDOS, 1988).

As fibras residuais de eucalipto são provenientes das sobras do processo de polpação empregado para a produção de polpas químicas, utilizadas principalmente para a confecção de papel. Por diversos motivos¹⁹, sua utilização é restrita e seu valor comercial é bastante reduzido se comparado aos preços de polpas comerciais (US\$ 15 x US\$ 500 por tonelada) (SAVASTANO Jr., 2000; AUSNEWZ, 1999).

2.2. PROCESSOS DE POLPAÇÃO

As polpas são obtidas através de processos que podem aliar métodos químicos e/ou termomecânicos, sendo o *kraft* o mais empregado e difundido (SAVASTANO Jr., 2000). Este método, também conhecido como método químico dos sulfatos, consiste no cozimento da matéria-prima em solução alcalina²⁰ a temperaturas elevadas (aproximadamente 170°C) (ZHU, 1993; COUTTS; WARDEN, 1992). Os produtos alcalinos associados à temperatura têm a função de decompor os componentes não-celulósicos.

¹⁸ Processos de transformação sofridos pelas madeiras e plantas fibrosas para produção de polpas.

¹⁹ Baixos comprimentos (em torno de 0,5mm), forma heterogênea pois são provenientes de diversas etapas do processo.

²⁰ Normalmente composta de produtos alcalinos como o sulfeto e o hidróxido de sódio.

Outro método empregado para produção de polpas é o chamado CTMP²¹, ou *processo químico-térmico-mecânico de polpação*. Nesse processo, as fibras são cozidas em água fervente com cal hidratada e, em seguida, passadas em equipamentos mecânicos de desfibrilação e refinamento. Como vantagem relativa ao anterior, esse processo pode ser apresentado como menos poluente devido à maior facilidade para tratamento de seus efluentes e ao seu menor custo, produzindo polpas mais baratas (COUTTS, 1986).

Os processos de polpação podem gerar transformações nas propriedades das fibras, encurtando ou danificando-as (McKENZIE, 1994). Por outro lado, essas transformações podem contribuir com o desempenho mecânico dos compósitos. O refino pode aumentar a fibrilação e conseqüentemente melhorar a aderência entre a fibra e a matriz. Além disso, o comprimento heterogêneo das fibras pode contribuir com o reforço, visto que as matrizes possuem faixas de poros de diversos tamanhos e as fibras funcionam como pontes entre os poros, transferindo as cargas a outros pontos das matrizes.

2.2.1. AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE POLPAS E DOS PROCESSOS DE POLPAÇÃO

Os processos de polpação podem ser avaliados pela análise das propriedades das polpas resultantes. As polpas são classificadas pelo conteúdo residual de lignina, correlacionando esse valor ao consumo de permanganato pela polpa ensaiada, pois essa substância reage rapidamente com a lignina, mas lentamente com a celulose em soluções ácidas (SAVASTANO Jr., 2000). Essa medida, muito empregada nas indústrias de papel é chamada de número Kappa.

A drenabilidade também é uma característica exigida das polpas e está relacionada à capacidade de extração de água, podendo ser avaliada pelo método canadense CSF²² (SAVASTANO Jr., 2000). Seu valor está associado à velocidade de drenagem de uma manta de polpa úmida durante processo de sucção (COUTTS; RIDIKAS, 1982). Este é um aspecto crítico na indústria de papel, mas também relevante nos processos de produção de fibrocimentos através do método Hatscheck²³, posto que as fibras necessitam reter finos.

²¹ Do inglês *Chemi-thermo-mechanical pulp*.

²² *Canadian Standard Freeness*;

²³ O método Hatscheck será apresentado no 2.5.

O comprimento médio, com base no conceito de média ponderada, e a massa por unidade de comprimento²⁴ também são avaliados. A massa por unidade de comprimento do filamento está relacionada à área transversal da parede celular e influencia o número total de fibras presente por unidade de massa da amostra, bem como a configuração espacial da malha de fibras e ainda a resistência individual e o módulo de elasticidade de cada filamento (McKENZIE *apud* SAVASTANO Jr., 2000). Para avaliação dos métodos de polpação, deve ser considerado ainda o rendimento médio, ou seja, a relação entre a massa útil final de polpa e a quantidade de fibras utilizadas no processo.

As polpas CTMP costumam apresentar número Kappa elevado (ver **Tabela 2-1**), acima dos obtidos com o processo *Kraft*, indicando que as segundas tendem a possuir uma durabilidade maior em meio alcalino (SOROUSHIAN *et al.*, 1996; SAVASTANO Jr., 2000), sendo mais indicadas à produção de compósitos de base cimentícia.

O grau de drenabilidade irá influir nas etapas de produção dos compósitos pelo processo Hatscheck, devido à possibilidade de extratificação da placa de fibrocimento e do aumento dos custos de produção (COUTTS; RIDIKAS, 1982). A drenabilidade poderá ser influenciada pela presença de finos, fato que pode ser resolvido pela sua limpeza por peneiramento (ZHU, 1993).

SAVASTANO Jr. (2000) empregou os dois métodos citados de polpação e, partindo de fibras de bananeira, obteve polpas com distribuição de comprimentos similares (**Tabela 2-1**). Concluiu que o processo CTMP, além de mais econômico e ambientalmente favorável, conduziu a polpas com distribuição de comprimento de fibras adequado.

Em estudo paralelo, o mesmo autor percebeu ainda que as polpas *Kraft*, devido à sua proveniência, possuem reduzidos teores de componentes não celulósicos, especialmente lignina, conforme já observado por FORDOS (1988), credenciando-as, assim, a serem mais duráveis como reforço. A **Tabela 2-1** apresenta as propriedades de algumas polpas em função do processo de polpação empregado.

²⁴ Conhecido no meio por *Coarseness*;

Tabela 2-1 – **Características de algumas fibras de celulose (SAVASTANO Jr., 2000).**

Fibras	Propriedades						
	Número Kappa ¹	Drenab. CSF ²	Comprim Médio ³ (mm)	Finos (%)	Massa por unid comp ³ (mg/m)	Espessura (μm) ⁴	Relação aspecto
<i>Kraft</i> de sisal	31,7	650	1,66	3,31	0,163	13,5	123
CTMP de sisal	50,5	500	1,53	2,14	0,138	9,4	163
<i>Kraft</i> de banana	44,5	222	1,95	6,86	0,154	15,3	127
CTMP de banana	86,5	465	2,09	1,55	0,147	11,8	177
<i>Kraft</i> residual de <i>Eucaliptus grandis</i>	6,1	685	0,66	7,01	0,107	10,9	61
<i>Kraft</i> refinado de <i>Pinus radiata</i>	17,0	650	1,71	10,36	0,184	32,4	53

¹ Appita P201 m-86² AS 1301.206s-88
Média de 20 determinações em MEV³Kajjani FS-200

Nd- Não disponível

⁴

2.3. PROPRIEDADES DOS COMPÓSITOS CIMENTO-CELULOSE

Em função do seu comprimento (<5mm), a celulose é utilizada principalmente no reforço de pastas com ou sem adições²⁵ e, em todo mundo, seu uso é combinado ou não a fibras plásticas. Com este compósito é realizada a produção de componentes esbeltos como telhas, painéis, caixas d'água e tubos. Estima-se que a produção anual é de cerca de 3 milhões de toneladas do material em todo o mundo (HEINRICKS *et al*, 2000). Este valor apresenta um acréscimo de mais de 100% se comparado a dados anteriores, caso dos levantados por RONGXI (1995), que quantificou a produção, naquele ano, em 1,4 milhão de toneladas. Grande parte dessa produção se concentra nos EUA, Europa, Ásia e Oceania. A Austrália, seguida da Nova Zelândia, foi o primeiro país a produzir comercialmente fibrocimentos sem o uso de amianto (COUTTS, 1992 e RONGXI, 1995).

SAVASTANO Jr. (2000) produziu argamassas reforçadas empregando polpas celulósicas de eucalipto e banana. O autor avaliou os componentes através de ensaios de empenamento, permeabilidade, absorção de água e desempenho mecânico à flexão. O teor em massa de fibras analisado variou de 4% a 16%. A consistência, medida através do *flow-table*,

²⁵ A adição pode ser de diversos tipos: material carbonático, microsílca, areia fina etc.

apresentou aumento considerável quando se incorporavam fibras. A alta absorção de água das fibras, e a conseqüente redução da trabalhabilidade levaram a necessidade de um aumento na relação água/cimento de 0,40 para até 0,50.

No estado endurecido foi observado um aumento de até 20 vezes na absorção de energia dos compósitos reforçados em relação às matrizes sem fibra. No caso da resistência à tração na flexão, as matrizes sem reforço apresentaram resultados superiores às reforçadas (37,3 MPa *versus* 20 MPa em média) , explicado pelo aumento na relação a/c nas matrizes reforçadas, o que fez o autor concluir pela necessidade de adaptação do processo produtivo dos compósitos, permitindo um adensamento mais eficiente e que possibilite melhor desempenho no que tange às resistências obtidas, sem esquecer, porém, o baixo custo exigido.

2.4. SELEÇÃO DE MATRIZES

Nos estudos reportados ao longo do tempo, o cimento Portland tem sido o material mais empregado na produção de matrizes para a construção civil. Apesar da alta alcalinidade apresentada pelos seus produtos hidratados, inúmeras pesquisas têm avaliado compósitos produzidos pela sua mistura com fibras ligno-celulósicas. Diversas técnicas (GUIMARÃES, 1990; GRAM, 1988) têm sido empregadas buscando aperfeiçoar a durabilidade dos materiais reforçados com estas fibras, destacando os processos de proteção das fibras, tais como a sua impregnação com diversas substâncias, sua mineralização, ou a utilização de revestimentos como barreira física. A eficiência dessas técnicas é contestada por alguns pesquisadores (AGOPYAN, 1991).

As soluções encontradas para aumentar a durabilidade das fibras passam, então, pela adoção de matrizes menos alcalinas que, hidratadas, não comprometam o desempenho da fibra como reforço ao longo do tempo.

A agressividade da matriz pode ser explicada pela presença de produtos alcalinos na água do poro das matrizes hidratadas. O principal responsável pela alta alcalinidade é a portlandita $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, liberada em grande quantidade quando da hidratação do cimento Portland. Contribui, ainda, a presença de álcalis solúveis como o óxido de potássio $[\text{K}_2\text{O}]$ e o de sódio $[\text{Na}_2\text{O}]$. Soluções como a carbonatação acelerada da matriz têm sido avaliadas como forma de redução de alcalinidade.

O uso de aglomerantes alternativos, como já visto, apresenta-se como boa alternativa no campo de matrizes de baixa alcalinidade (OLIVEIRA, 2000). A adição de materiais pozolânicos também contribui para redução da alcalinidade, funcionando como fixador de álcalis (TAYLOR, 1997).

Os cimentos de EAF são, normalmente, uma mistura de escória com teores menores de produtos alcalinos, utilizados como ativadores para acelerar sua hidratação, conforme já citado. Na sua hidratação, ao contrário da do cimento Portland, a quantidade de portlandita é reduzida, vindo daí a explicação para sua menor alcalinidade.

Apesar dessas vantagens, as matrizes de cimento de EAF ainda necessitam de maiores estudos, sobretudo no que se refere ao desenvolvimento de resistência e seu comportamento frente à carbonatação, fato que será melhor discutido no item 3.3.3.

2.5. PROCESSOS DE PRODUÇÃO

Os métodos tradicionais de moldagem²⁶ têm-se mostrado parcialmente inadequados à produção de compósitos reforçados com fibras ligno-celulósicas. Diversos insucessos descritos na literatura são decorrentes de problemas gerados nesses processos (AGOPYAN, 1988; SAVASTANO Jr., 2000). Em primeiro lugar, as altas absorções apresentadas pelas fibras conduzem a um aumento considerável na consistência, tornando a mistura inviável devido à baixa trabalhabilidade ou necessitando de acréscimos na quantidade de água, acarretando, assim, aumento na relação a/c da mistura e conseqüentemente piora nas propriedades físicas e mecânicas do conjunto. Além disso, os processos tradicionais levam a uma má distribuição das fibras no interior da matriz, prejudicando sua função de reforço. Os problemas descritos podem limitar o teor de fibras adicionado a valores menores ou, até mesmo, tornar impossível a moldagem dos compósitos.

Melhores desempenhos das fibras dentro do compósito requerem a adequação dos processos de moldagem. Dentre os processos empregados para produção de fibrocimentos em escala comercial, destaca-se o Hatscheck, desenvolvido pelo pesquisador de mesmo nome no ano de 1900 e empregado até hoje pelas indústrias.

²⁶ Processos tradicionais são descritos aqui como aqueles que empregam: mistura em betoneira comum e moldagem e adensamento por vibração.

O processo, apresentado na **Figura 2.1**, é baseado no uso de misturas altamente fluidas, permitindo a perfeita dispersão das fibras no interior da matriz. Em etapa seguinte do processo, a mistura é drenada para retirada do excesso de água.

Figura 2.2 – **Fabricação de fibrocimentos em escala industrial. Esquema simplificado do processo Hatscheck onde os números representam: (1) misturador, agitador; (2) cilindro; (3) correia transportadora; (4) sentido de rotação da esteira; (5) Sistema de vácuo; (6) cilindro de extrusão indicando sentido de rotação; (7) sistema de corte da chapa; (8) Chapa saindo da calandra. (adaptado a partir de COUTTS, 1992)**

Observando a figura percebe-se a sequência de produção das chapas, que consiste em:

- 1) Mistura e agitação do cimento e das fibras, empregando teor reduzido de sólidos – em torno de 30%;
- 2) A pasta de alta fluidez é transferida para a correia através da rotação do primeiro cilindro;
- 3) A mistura passa então sobre a central de pressão reduzida (indicada na **Figura 2.2** pelo n. 5) onde o excesso de água é retirado;
- 4) O material é prensado passando sob um terceiro cilindro que funciona como calandra e é dotado de um sistema circulante de corte, estabelecendo a dimensão final da chapa lisa;
- 5) A chapa lisa, mas ainda plástica, é então colocada sobre uma superfície ondulada e adquire a forma desejada;

Uma observação deve ser feita a respeito do processo: o uso dos cilindros rotativos faz com que as fibras se alinhem preferencialmente no seu sentido de rotação. O alinhamento

das fibras conduz a diferenças no comportamento mecânico entre as direções longitudinal e transversal da placa.

Além do descrito, existem outros processos adaptados deste para a produção de fibrocimentos, destacando-se os desenvolvidos por MAGNANI –processo semi-úmido e por MAZZA, empregado para produção de tubos de fibrocimento. Para peças pequenas, pode ser utilizado também o processo de prensagem e filtragem.

2.6. INFLUÊNCIA DA MICROESTRUTURA NO DESEMPENHO DO COMPÓSITO

O comportamento mecânico adequado dos CRFC depende de alguns fatores considerados importantes na sua estrutura interna e estão relacionados à capacidade do compósito de absorver os esforços aos quais foi submetido, ou seja, da sua tenacidade e da manutenção da integridade das características de sua microestrutura. Essas propriedades dependem do tipo e das características da matriz, do tipo e da rigidez da fibra empregada, e das características na interação entre esses dois constituintes.

Matrizes compostas por matérias-primas distintas apresentam composições próprias em seus produtos hidratados. A composição desses produtos hidratados ajudará a definir as propriedades físicas e mecânicas do compósito. A presença de portlandita (cristais de hidróxido de cálcio) em excesso, por exemplo, pode levar a uma concentração desses cristais nas interfaces das fibras com a matriz, produzindo uma aderência deficiente em função do aumento da porosidade do sistema. Essa concentração também contribui para a diminuição na durabilidade da fibra, em contato direto com o material alcalino.

SAVASTANO Jr. (2000), ao avaliar a influência da microestrutura nas propriedades mecânicas do compósito, concluiu que, ao se empregar fibras vegetais, o mecanismo de arrancamento da fibra do interior da matriz é mais importante que a ruptura da fibra no ganho de tenacidade, ou seja, compósitos reforçados com fibras de baixo módulo tendem a se romper devido ao arrancamento das fibras do interior da matriz e não em função da sua ruptura.

Figura 2.3 – **Representação esquemática de uma fissura através de um material compósito reforçado com fibras (a partir de COUTTS, 1986)**

A **Figura 2.3** mostra a representação de uma fissura atravessando um compósito reforçado com fibras, onde: o número (1) *representa uma fibra rompida*; o (2) *representa uma fibra arrancada*; enquanto o (3) *representa uma fibra íntegra, se deformando e atravessando a fissura*. O número (2) exemplifica um caso onde a fibra escorrega da matriz, caso típico citado anteriormente. No caso apresentado da fibra (3), a mesma se apresenta íntegra, absorvendo parcialmente a energia a qual o material está submetido. Deve-se atentar para o caso de descolamento apresentado na interface (COUTTS, 1986), que pode ocorrer pela movimentação das fibras devido à variação de umidade.

Dessa forma, a estrutura interna dos compósitos e a sua interação, a qual, por sua vez, é função da aderência entre fibra e matriz, influem de forma significativa no seu desempenho e na sua durabilidade. Considerando fibras de mesma natureza, a aderência é influenciada, em grande parte, pelas características da zona de transição²⁷.

A maior aderência pode ser conseguida através da melhora do desempenho da zona de transição entre as fibras e a matriz, fazendo com que as duas fases trabalhem solidariamente. Alguns fatores podem contribuir para o melhor desempenho da zona de transição, destacando-se entre eles a morfologia e rugosidade das fibras, sua absorção e porosidade. Características da matriz, como a presença de portlandita em grandes quantidades nos seus produtos hidratados, também podem influir negativamente na aderência fibra-matriz.

²⁷ Zona de transição é definida como a região da pasta endurecida próxima à fibra, com espessura entre 10µm e 100µm, e que apresenta características diferenciadas do restante da matriz (SAVASTANO Jr. *et al.*, 1994).

SAVASTANO Jr. (2000) destaca que, no caso específico das fibras vegetais, há um descolamento da interface fibra-matriz, ocorrido pela variação dimensional gerada pela perda de água absorvida durante a moldagem. Isto favorece uma concentração de porlandita na zona de transição.

Como o arrancamento da fibra é considerado fator preponderante na ruptura do compósito, o comprimento de ancoragem da fibra na matriz é outro fator que também deverá ser levado em consideração. Essa ancoragem pode ser otimizada empregando-se fibras de superfície rugosa, com maiores relações de aspecto e isentas de impurezas na superfície. A presença de fibras lisas pode diminuir a aderência.

2.7. COMENTÁRIOS

A adoção de matrizes de baixa alcalinidade, aliada ao uso de fibras celulósicas e processos adequados de produção, apresentados neste capítulo para produção de compósitos reforçados empregados na construção civil, pode constituir a fronteira entre a viabilidade ou não do desenvolvimento de materiais reforçados com fibras sensíveis a álcalis, que apresentem bom desempenho e durabilidade adequada ao seu emprego. O uso das fibras de celulose já está bem estabelecido em países desenvolvidos, sobretudo naqueles que dispõem dos produtos chamados *asbestos-free*, caso da Austrália que, já há algum tempo, comercializa produtos de qualidade comprovada reforçados com fibras de celulose. Esses países empregam técnicas como o uso de fibras em formato de polpa e utilizam processos fundamentados no método Hatscheck.

Entretanto, os produtos comercializados nesses países são produzidos a partir de técnicas de cura baseadas em autoclave para que se atinja durabilidade adequada, e estas técnicas demandam recursos incompatíveis à realidade dos países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil, gerando a necessidade de desenvolvimento de técnicas mais compatíveis à realidade de nosso país e à realidade das indústrias nacionais. O capítulo a seguir utiliza as técnicas de avaliação de desempenho para subsidiar o desenvolvimento de produtos compostos de cimento e celulose empregando, porém, matérias-primas e processos de produção de custo reduzido que conduzam a compósitos duráveis.

Capítulo III

Durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose

Este capítulo discute os aspectos relativos à durabilidade dos compósitos reforçados com fibras de celulose (CRFC), sob o ponto de vista dos conceitos de avaliação de desempenho. São abordados os fatores que influenciam na durabilidade e as formas de se identificar a redução desta propriedade na aplicação específica.

A durabilidade é um dos aspectos mais importantes no desenvolvimento de um novo material. Para que uma nova tecnologia possa ser inserida no mercado, principalmente no da construção civil onde os investimentos atingem quantias consideráveis, um estudo amplo de sua vida útil deve ser levado a efeito. SAVASTANO Jr. (2000) classifica a habitação como o maior bem adquirido por uma pessoa durante sua vida, daí a necessidade de que seus componentes possuam vida útil longa.

De acordo com os conceitos de avaliação de desempenho, adotados aqui como referência, o estudo da durabilidade de um material deve ser iniciado a partir da identificação dos agentes agressivos relevantes em cada aplicação, e dos mecanismos de degradação a eles associados. A identificação dos agentes requer conhecimento da química e da microestrutura do material (ASTM 632 E *apud* JOHN *et al.*, 1988). A ação conjunta entre os agentes de degradação também deve ser considerada como fator importante na previsão da degradação do material. Em alguns casos, agentes que por si só não afetam o material, quando atuantes em sinergia com outros, podem levar a alterações desfavoráveis nas propriedades dos materiais.

A durabilidade dos compósitos reforçados com fibras sensíveis a álcalis é talvez o maior desafio a ser superado pelos pesquisadores da área, fato que explica os inúmeros trabalhos que têm sido desenvolvidos sobre o tema nos últimos anos (AKERS; STUDINKA, 1989; MacVICAR *et al.*, 1999). Ela está relacionada diretamente com o tipo de matriz e fibra empregada, com a porosidade do sistema e o ambiente onde o material está inserido.

Neste capítulo utilizam-se os conceitos de desempenho, definidos adiante, para avaliar a durabilidade dos CRFC. Primeiramente serão identificados os agentes com seus respectivos mecanismos de degradação atuantes no material e os indicadores que venham a exprimir essa degradação, seja ela por redução nas propriedades físicas e mecânicas do compósito ou por qualquer tipo de manifestação apresentada na microestrutura que possa comprometer o seu desempenho ao longo do tempo. Serão abordados ainda métodos para avaliação de durabilidade, sendo feitas considerações sobre a correlação entre eles e a sua aplicabilidade.

Para um melhor entendimento da nomenclatura empregada durante o transcorrer do texto, uma breve consideração sobre os conceitos de desempenho é acrescentada aqui como preâmbulo.

3.1. CONSIDERAÇÕES SOBRE OS CONCEITOS DE DESEMPENHO

A avaliação da qualidade de um material pode ser realizada de diversas maneiras diferentes. No caso dos materiais e componentes empregados na construção civil no Brasil, o produto é especificado de acordo com as normas vigentes, caso das NBR's, de responsabilidade da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Entretanto, em se tratando de nova tecnologia, normalmente não existe norma que prescreva essa avaliação.

A utilização dos conceitos de avaliação de desempenho surge então como alternativa para a comprovação da viabilidade técnica de um produto. A partir dos conceitos de desempenho pode-se, inclusive, comparar materiais diferentes destinados à mesma aplicação.

Desempenho ou, em linhas gerais, *comportamento em utilização* (SOUZA, 1983), pode ser definido como: "*o comportamento de um produto durante seu uso e pode ser expresso pela função desempenho x tempo, que representa a variação das características e propriedades do produto no decorrer do tempo*" (JOHN, 1987).

A avaliação se baseia primeiramente na identificação das necessidades do usuário, ou seja, para avaliação de um material que será usado como cobertura, deve-se observar a importância da manutenção de sua estanqueidade, de suas resistências a esforços dinâmicos e estáticos, seus aspectos estéticos e principalmente observar se o material é durável ao longo do tempo (FLAUZINO, 1983). Tomando por base a função do produto e

as exigências inerentes a ele, parte-se então para identificar as condições de exposição às quais o produto será submetido.

Sendo a habitação um bem de alto valor agregado, a principal característica que se deseja dela (ou a exigência do usuário) é a sua **durabilidade e vida útil**, de forma a poder se prever o tempo necessário para realização de manutenções ou substituição do produto. Essas definições estão baseadas nos conceitos propostos por FROHNSDORFF; MASTERS, (1980), ASTM E 632 (1978), CIB W 80/RILEM 71 PSL, NIREKI (1980) e foram sintetizados por JOHN (1987).

A **durabilidade** é a capacidade que um produto possui de manter suas condições de serviço, para o qual foi projetado e construído, durante determinado período de tempo. A durabilidade do produto pode ser avaliada pelo seu tempo de vida em anos ou pela sua resistência a agentes que afetem seu desempenho.

Vida útil é o período de tempo que um material, componente construtivo ou edificação, mantém seu desempenho acima dos níveis aceitáveis, desde que sofram manutenção rotineira.

Para entendimento do processo de avaliação da durabilidade de um material, além dos conceitos acima, é necessário o conhecimento do significado de termos como:

Degradação: processo no qual um material sofre transformações irreversíveis que impliquem perda de qualidade ou valor.

Agentes (ou fatores) de degradação: ações físicas, químicas, ambientais ou biológicas que causem degradação do material.

Mecanismos de degradação: formas como os agentes causam uma seqüência de mudanças físicas e/ou químicas que levam a perdas nas propriedades esperadas de um material.

Indicadores de degradação: Indicativos utilizados para quantificar os mecanismos de degradação; são propriedades mensuráveis, que podem ser quantificadas e expressam a variação do desempenho de um produto durante seu uso.

Dessa forma e como proposto aqui, um estudo sistemático de durabilidade de um novo material deve contemplar as seguintes etapas:

- Identificação da função e das características (exigências do usuário) desejadas do material ao longo do seu uso e verificação das suas condições de exposição;
- Caracterização dos principais agentes de degradação atuantes;
- Identificação dos mecanismos de degradação causados pelos agentes;
- Quantificação do dano presenciado devido a ação imposta pelos agentes através dos mecanismos de degradação;

Isso nos leva a concluir pela durabilidade ou não do material, possibilitando o seu aperfeiçoamento ou adaptação e permitindo, assim, avaliar a viabilidade da inserção do novo produto no mercado a que se propõe.

3.2. AGENTES DE DEGRADAÇÃO

Os CRFC, quando usados em telhados ou paredes externas, estão sujeitos a alguns agentes que atuam diretamente na sua degradação, tanto de forma isolada como sinergicamente. Os principais agentes que podem degradar o compósito são: a hidratação do cimento, através da liberação de compostos de elevada alcalinidade; o CO_2 , presente no ar atmosférico (caso de alguns tipos de matrizes), produzindo a carbonatação da matriz; e a ação da água e da temperatura, que podem causar a lixiviação de compostos.

A incompatibilidade química é o principal agente atuante nos CRFC e decorre da sensibilidade das fibras ao meio alcalino produzido pela hidratação do cimento. Ela se dá devido a elevada alcalinidade da água presente nos poros da matriz, decorrente da presença abundante de íons alcalinos, provenientes do cimento e de suas reações de hidratação. O meio alcalino produz a degradação da fibra, quebrando suas adesões ou destruindo suas cadeias moleculares. A elevação da temperatura ambiente pode provocar uma aceleração na velocidade de degradação.

A água é, muitas vezes, um importante fator de degradação (JOHN, 1997). Sua ação, combinada a outros fatores, pode levar à decomposição de compostos presentes na fibra e à lixiviação de produtos hidratados que foram decompostos, por exemplo, pela carbonatação. SAVASTANO Jr. (2000) também atenta para as variações dimensionais

produzidas pelas modificações nos teores de umidade do compósito devido aos ciclos de molhagem e secagem aos quais é submetido durante o uso.

O CO_2 atmosférico também é considerado agente de degradação dos compósitos. Principalmente quando é empregado cimento de EAF. Nos casos de matrizes de cimento Portland, o CO_2 contribui para diminuição da alcalinidade do meio e para redução da porosidade do material através da obturação dos poros pelo carbonato de cálcio $[\text{CaCO}_3]$, mais denso que o seu hidróxido $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, tornando-se, assim, benéfico ao invés de degradante.

A incompatibilidade física também produz efeitos degradantes no compósito. A movimentação diferencial, gerada da variação de umidade das fibras, pode causar microfissuração, levando ao mecanismo conhecido como dano progressivo. Os danos podem afetar a resistência mecânica e a ligação entre as fibras e a matriz.

Em menor proporção, dada a alcalinidade apresentada pelo material, a ação de fungos também pode ser descrita como agente de degradação. Os fungos agem quebrando e diminuindo as cadeias poliméricas, reduzindo seu GP e destruindo progressivamente a capacidade de reforço das fibras.

3.3. MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO

Os mecanismos de degradação são a forma como os agentes se manifestam no compósito. No caso da incompatibilidade química, pode se apresentar enfraquecendo ou petrificando a fibra; a incompatibilidade física poderá causar perda de aderência entre a fibra e a matriz. Além da variação no teor de umidade do compósito, a água, pode agir como lixiviante dos produtos gerados a partir da carbonatação, causando aumento na porosidade do material. Os principais mecanismos estão apresentados a seguir:

3.3.1. DECOMPOSIÇÃO DA FIBRA

A decomposição da fibra ocorre quando os constituintes da fibra, principalmente a lignina e a hemicelulose presentes na lamela intercelular, são decompostos pela ação do elevado pH da água do poro da pasta de cimento. A decomposição desses produtos conduz à redução na capacidade de reforço da fibra, quebra a aderência com a matriz e torna a fibra um material inerte dentro do compósito. Dessa forma, com a perda de aderência na interface com a matriz, a fibra deixa de funcionar como reforço, passando a ser um material de

enchimento, com o agravante de ser higroscópico e putrescível (AGOPYAN, 1991). Esse fenômeno poderá ser agravado pela variação de umidade da matriz, já citado como maléfico à integridade da interface.

Quando o compósito se encontra ainda no estado fresco, essa decomposição pode inclusive retardar a pega do cimento pela liberação de substâncias de caráter ácido (AGGARWAL; SINGH *apud* SAVASTANO Jr., 1992).

AKERS; STUDINKA (1989) estudaram o efeito do grau de polimerização (GP) da celulose e sua influência na resistência da fibra e do compósito onde ela está inserida. As fibras foram testadas através de procedimento empregado na indústria de papel e o compósito usando o método dos 03 (três) cutelos (ISO 39611). As fibras foram submetidas ao ataque alcalino em elevadas temperaturas, o que resultou em um decréscimo considerável no GP da celulose. Em compósitos curados normalmente houve uma queda, após 05 (cinco) anos de envelhecimento, de 20% no GP; para os compósitos auto-clavados essa diminuição chegou a 35%.

Esses resultados contrastam com a tendência de aumento na resistência a tração na flexão e no módulo de elasticidade, que apresentaram um aumento com o passar da idade. Os autores concluíram que, o efeito enfraquecedor, esperado pela redução do GP, é aparentemente compensado por outros fatores, como a carbonatação e a densificação.

Dessa forma, não fica claro como a queda no GP afeta as propriedades mecânicas dos compósitos com a idade. A queda no GP levaria, logicamente, a um decréscimo na resistência a tração das fibras. Esta tendência de decréscimo porém, não se mostrou destacável nas resistências dos compósitos, que aumentaram mesmo com a queda do GP.

3.3.2. PETRIFICAÇÃO DA FIBRA

O mecanismo de petrificação ocorre quando as lacunas presentes nas fibras (descritas na **Figura 1.5**) são preenchidas, parcial ou totalmente, com os elementos químicos provenientes dos produtos hidratados do cimento. Esse acúmulo provoca um enrijecimento na estrutura da fibra, impedindo-a de se deformar, prejudicando, dessa maneira, a sua capacidade de absorver energia e tornando seu comportamento frágil, refletindo-se principalmente na tenacidade do compósito.

SAVASTANO Jr. (2000) analisou, através de imagens obtidas por EDS²⁸, compósitos a base de cimento de escória e fibras de coco e encontrou a presença de diversos elementos químicos, provavelmente provenientes da matriz.

Figura 3.1— BSEI²⁹ de fibra de coco-escória. Ponto 1: lacuna central da fibra; ponto 2: grão de cimento anidro. Idade de hidratação: 42 dias (SAVASTANO Jr., 2000).

A **Figura 3.1** mostra a seção transversal de uma macrofibra de coco. O ponto 1 representa a lacuna central da fibra onde a análise por EDS (mostrada na **Figura 3.2**) indica a incidência de diversos elementos químicos provavelmente provenientes de fases relacionadas à matriz de cimento, colaborando com a suposição de ocorrência do fenômeno de petrificação das fibras (BENTUR; AKERS, 1989).

²⁸ Do inglês *Energy Dispersive X-ray spectroscopy*. Essa análise da microestrutura do material permite a avaliação qualitativa da composição química de uma amostra de superfície plana (PADILHA; AMBROZIO FILHO *apud* SAVASTANO Jr., 2000)

²⁹ Abreviatura para *backscattering electron image* ou, em português, imagem de elétrons retroespalhados.

Figura 3.2 – **Análise de EDS da lacuna central da fibra de coco (ponto 1 na Figura 3.1). (SAVASTANO Jr., 2000).**

O fenômeno da petrificação pode ser acelerado pelo processo de carbonatação da matriz, em virtude da presença de um pH mais baixo e maior solubilidade das espécies químicas, fazendo com que os produtos migrem com maior facilidade para o interior das fibras (BENTUR; AKERS, 1989).

3.3.3. CARBONATAÇÃO DA MATRIZ

O fenômeno da carbonatação é bastante conhecido dos pesquisadores que atuam na área dos materiais de construção. Seu efeito é discutido em função da ambigüidade da sua atuação quando se trata do concreto. Apesar de elevar a resistência através da diminuição da porosidade, seu efeito reduz o pH do sistema e, no caso do concreto armado, pode acelerar o processo de corrosão da armadura.

Em compósitos reforçados com fibras vegetais e de celulose, a carbonatação da matriz é potencializada devido à sua alta porosidade, que facilita a penetração do CO_2 permitindo, dependendo do cimento, formação de carbonato de cálcio no interior do material. Seu efeito, em compósitos a base de cimento Portland, pode ser descrito como benéfico ao material. O consumo de álcalis, presentes nos poros do material, conduz a uma diminuição da alcalinidade do meio, fornecendo, por consequência, um ambiente menos agressivo a fibra.

Além disso, a carbonatação conduz a uma maior densificação do material, aumentando a massa específica. O aumento da massa específica está associado a maiores valores de resistência mecânica e do módulo de elasticidade.

Isso pôde ser comprovado analisando os resultados obtidos por AKERS; STUDINKA (1989). Os autores avaliaram o efeito da carbonatação em matrizes de cimento Portland e concluíram, após ensaios físicos, que depois de 05 (cinco) anos de envelhecimento, seu efeito levou a um aumento na massa específica de 1750 kg/m³ para 1870 kg/m³ em compósitos curados normalmente e de 1610 kg/m³ para 1790 kg/m³ em compósitos auto-clavados envelhecidos por 04 (quatro) anos.

Nos componentes com fibras ligno-celulósicas, a carbonatação tende a ser benéfica, através da diminuição do pH (MARIKUNTE; SOROUSHAN, 1994); esse fator, entretanto, não foi considerado significativo por SAVASTANO Jr. (2000).

Corroborando os resultados de outros pesquisadores, JOHN *et al.*, (1997) descreve a carbonatação como mecanismo de estabilização química do processo, devido ao seu efeito de diminuição do pH do meio e conseqüentemente da alcalinidade prejudicial à fibra, tornando-se assim, benéfico ao material.

O mesmo autor realizou ensaios painéis esbeltos de argamassas de cimento de escória reforçadas com fibras de coco e sisal e constatou que a carbonatação completa se deu aos sete dias em ambiente saturado a 100% de CO₂ e aos 100 dias em ambiente de laboratório.

No caso de algumas matrizes de cimento de EAF³⁰, a carbonatação, via de regra, provoca uma perda de resistência mecânica e aumento na porosidade (MANNS; WESCHE *apud* JOHN *et al.* 1997). O fato pode ser explicado pela presença de pouco hidróxido de cálcio [Ca(OH)₂] não combinado nas pastas hidratadas desses cimentos, levando à decomposição de outros produtos hidratados, como a etringita, a gipsita e o C-S-H. Abaixo um exemplo de como essa reação pode se processar para o caso da etringita:

³⁰ Cimentos que apresentem reduzidos valores de portlandita em seus produtos hidratados.

Após a reação, ocorre liberação de água e formação de gipsita, conduzindo ao aumento da porosidade do material; em seguida acontece a lixiviação da gipsita, devido à sua alta solubilidade, que também causará aumento na porosidade.

A carbonatação da matriz, ainda no caso dos cimentos de EAF, pode provocar uma diminuição na velocidade de hidratação, devido à redução no pH do sistema. JOHN (1995) afirma que esta velocidade cresce com o crescimento do pH, tornando-se mais lenta em função da queda de alcalinidade.

3.3.4. OUTROS MECANISMOS

Um outro mecanismo que pode ser considerado na degradação dos CRFC é a biodeterioração. Ela ocorre devido à remoção da lignina das fibras pela ação de fungos aeróbicos. Os fungos, segundo JOHN *et al.* (1997), necessitam de condições adequadas para executar essa remoção. A presença de água e a manutenção do pH do meio próximo ao neutro são condições necessárias. A alcalinidade da pasta de cimento de cimento Portland, mesmo quando carbonatada deve inibir, teoricamente, a ação deste mecanismo.

A quebra das cadeias poliméricas, pela ação de radiações ultra-violeta, também pode ser considerada uma forma de degradação e perda das propriedades mecânicas. Entretanto, JOHN *et al.* (1997) considera este mecanismo desprezível devido ao fato das fibras estarem inteiramente embutidas na pasta de cimento.

3.4. INDICADORES DE DEGRADAÇÃO

Os indicadores de degradação são as propriedades críticas que devem ser preservadas pelo material avaliado, de forma que ele se mantenha acima de um nível mínimo para a satisfação do usuário. Dos compósitos reforçados com fibras são exigidos que suas propriedades físicas, mecânicas e microestruturais sejam afetadas o menos possível pela ação dos agentes de degradação. A manutenção dessas propriedades é indispensável para o bom desempenho do compósito ao longo do tempo.

3.4.1. PROPRIEDADES FÍSICAS

As propriedades físicas exigidas por um material compósito, principalmente os destinados a componentes externos e de coberturas se referem à estanqueidade, massa específica adequada à aplicação, porosidade e aos aspectos visuais apresentados pelo material.

Os materiais esbeltos usados em coberturas e divisórias (principalmente externas) precisam se manter impermeáveis por motivos óbvios. Em função da sua alta porosidade, aliada à elevada absorção apresentada pelas fibras de celulose (aproximadamente 400%), esses compósitos podem vir a apresentar problemas relativos à sua permeabilidade.

O uso de materiais de massa específica reduzida, caso das fibras de celulose quando comparadas a outras como as de amianto ou de aço, contribuem para a redução do peso específico da edificação, reduzindo assim seus custos. As características visuais do material também são importantes. Materiais apresentando cores claras podem contribuir para um melhor conforto térmico.

3.4.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS

A utilização da resistência à flexão é uma das formas de avaliação da degradação do material. Todavia, seu valor deve ser cuidadosamente analisado. Isto porque, devido à evolução da hidratação do cimento com o passar do tempo, os valores de perda de desempenho talvez venham a ficar mascarados, levando o pesquisador a subestimar os efeitos do processo de degradação do compósito. Dessa forma, a degradação deve ser quantificada subtraindo-se esse valor da evolução de hidratação. Uma forma de se quantificar claramente essa evolução é empregando-se corpos-de-prova não sujeitos ao envelhecimento.

SAVASTANO Jr. (2000) considera que a resistência não é a melhor indicadora de degradação, especialmente às primeiras idades, não só porque a hidratação tende a elevar seu valor, mas também porque as fibras de celulose nem sempre conseguem melhorar a resistência à tração do compósito, visto que sua principal função é melhorar o desempenho do compósito no estado pós-fissurado, frente a esforços dinâmicos. Seu valor pode, então, ser mais indicado para avaliar a degradação da matriz.

A tenacidade pode indicar se a fibra está sendo ou não atacada pela alcalinidade da matriz. Sua diminuição pode se caracterizar como indício de que a fibra pode estar sendo decomposta, fragilizada ou que a interface com a matriz já não mantém suas características adequadas.

O módulo de elasticidade é importante, pois sugere quanto o material poderá deformar sobre ação das cargas em uso. CRFC costumam apresentar baixo módulo em função da incorporação das fibras de baixo módulo.

JOHN *et al.* (1997) realizou ensaios de impacto em painéis reforçados com fibras vegetais e concluiu ser inadequada sua utilização como indicador de degradação devido a alta variabilidade apresentada nos resultados.

3.5. CARACTERÍSTICAS DA MICROESTRUTURA

A conservação da integridade da interface é fator fundamental para a manutenção do desempenho do compósito. Problemas como o desligamento entre a matriz e a fibra pode causar redução no comportamento físico e mecânico do compósito.

A microestrutura do material pode ser avaliada através de imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). As imagens podem ser obtidas a partir de superfícies polidas ou fraturadas, dependendo do que se deseja observar.

Entretanto, alguns cuidados devem ser tomados na coleta das imagens. Há descrição na literatura onde a matriz encontra-se parcialmente desligada da fibra, o que pode estar diretamente relacionado à variação volumétrica da fibra e aos procedimentos de secagem do compósito durante a preparação da amostra para visualização em microscópios.

Além disso, observações em fibras extraídas das matrizes podem ser usadas como parâmetro para avaliação da durabilidade da fibra. Essa avaliação, através de observações diretas com uso de microscópios, é descrita por SAVASTANO Jr. (2000) como difícil devido à degradação mecânica sofrida pela fibra durante o processo de sua extração. A presença de produtos hidratados incrustados na superfície da fibra é outra dificuldade apresentada. O autor sugere o desenvolvimento de uma técnica que possibilite dissolver esses produtos sem afetar as fibras. A observação de seções transversais da ligação fibra-matriz em MEV pode auxiliar na análise da degradação da aderência entre a fibra e a matriz.

3.6. MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DE DURABILIDADE

No desenvolvimento dos CRFC a comprovação da durabilidade do novo material é indispensável. Para quantificação dessa durabilidade são empregados métodos que expõe o material às condições que será submetido durante sua vida útil para avaliar sua

degradação. Os mais conhecidos são: os ensaios naturais, os ensaios em uso e os ensaios acelerados, descritos a seguir onde são consideradas as vantagens e as desvantagens do seu emprego.

3.6.1. ENSAIOS DE ENVELHECIMENTO NATURAL

Nos ensaios de envelhecimento natural os compósitos são expostos às condições às quais serão submetidos durante uso. Os corpos-de-prova são colocados em bancadas com inclinação de 30° voltadas para o norte magnético. Ele tem como principal vantagem a proximidade com as condições de uso do material. Entretanto, o ensaio é considerado lento, requerendo tempos longos de exposição para que os fatores de degradação possam agir no material.

3.6.2. ENSAIOS EM USO

Os ensaios em uso são os mais eficientes na avaliação da durabilidade do material. Além de submeterem o compósito às condições de exposição real, eles têm a vantagem de utilizar o componente com a conformação e os detalhes característicos do seu emprego, tais como fixação, ligação com outros subsistemas, etc. Ao contrário dos ensaios naturais onde podem ser empregados o material de construção, os ensaios em uso utilizam o componente interagindo com os outros sistemas construtivos, permitindo assim uma avaliação sistêmica do material no desempenho de sua função. Porém, assim como os naturais, requerem tempos alongados. Os custos empregados para sua implementação também devem ser considerados.

3.6.3. ENSAIOS ACELERADOS

Os ensaios acelerados possuem a vantagem da rapidez, possibilitando respostas em menor espaço de tempo sobre o desempenho do material ao longo da vida útil. Eles se baseiam na simulação das condições de exposição do material a intensidades elevadas de seus principais agentes de degradação. Apesar de eficientes no tocante a respostas rápidas, podem fornecer resultados imprecisos, em função de mecanismos paralelos ocorridos nos exemplares ensaiados, caso da aceleração da hidratação já descrita. A simulação da degradação de CRFC pode ser realizada através da carbonatação acelerada do material e do uso de ciclos para simular o efeito secagem e molhagem do material.

3.7. COMENTÁRIOS

O estudo da durabilidade é de fundamental importância no desenvolvimento de um novo material. Através de levantamentos bibliográficos dos principais agentes e mecanismos de degradação atuantes nos CRFC é possível determinar os ensaios de envelhecimento aos quais esse compósito será submetido. Os ensaios propostos – naturais e acelerados, servem para simular as condições de uso do material agindo sobre as propriedades do compósito. A degradação é então avaliada pelas propriedades físicas, mecânicas e microestruturais que o material deverá apresentar em uso. O presente capítulo serviu de base para a definição dos ensaios de envelhecimento aplicados ao compósito em desenvolvimento na pesquisa, bem como das propriedades que serão avaliadas no decorrer dos capítulos seguintes visando a viabilização e otimização do produto em questão.

Capítulo IV

Materiais e métodos

O presente capítulo aborda a descrição do planejamento experimental, os tipos de materiais usados como matéria-prima dos compósitos e os métodos empregados para sua confecção. No anexo A são apresentadas fotos que ilustram em detalhes os procedimentos e os materiais.

4.1. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O experimento foi realizado com corpos-de-prova (CPs) de formato prismático de dimensões aproximadas de 120mm x 40mm x 6 mm, moldados empregando-se uma simulação do processo Hatscheck. As variáveis avaliadas no experimento foram: tipo de matriz, teor de fibras e durabilidade do compósito após ensaios de envelhecimento natural e acelerado. A **Figura 4.1** resume o experimento:

Figura 4.1 – Planejamento experimental

As matrizes selecionadas se dividem em duas formulações: EGCH (88% escória + 10% gipsita + 2% cal hidratada) e ECP (60% escória + 40% cimento Portland). O uso de composições com características químicas e propriedades diferentes teve por objetivo analisar o efeito da alcalinidade sobre as fibras, além das diferenças na cinética de hidratação.

As fibras foram empregadas em teores iguais a 2% e 12% da massa total de sólidos. O percentual de 2% é preferível ao teor nulo de fibras, pois não conduz a corpos-de-prova com excesso de imperfeições. O teor de 12% foi escolhido por ter sido o que apresentou melhores respostas em pesquisas anteriores (SAVASTANO Jr., 2000), tanto sob o aspecto de reforço, quanto pela exeqüibilidade da moldagem.

A avaliação da durabilidade foi realizada através de ensaios de envelhecimento natural pela exposição dos CPs em ambiente externo e por ensaios de envelhecimento acelerado empregando ciclos de molhagem e secagem, eventualmente combinados com carbonatação acelerada.

4.2. MATERIAIS

Os principais materiais empregados no trabalho são resíduos e foram selecionados segundo as tendências atuais de pesquisas para aproveitamento destes na construção civil, desenvolvidas no PCC/POLI e no LCR/FZEA, ambos da USP, e que já contam com diversos resultados relativos a aglomerantes alternativos, fibras vegetais e de celulose e compósitos reforçados (AGOPYAN, 1991; JOHN, 1995; OLIVEIRA, 2000; SAVASTANO Jr., 2000 e SILVA, 1998), que procuram aliar desempenho adequado a custos reduzidos de produção.

O uso de materiais industrializados restringiu-se a percentuais menores, sendo utilizados como ativadores para a EAF a gipsita em combinação com a cal hidratada e o cimento Portland CP V ARI. A **Tabela 4-1** apresenta as misturas utilizadas no experimento, juntamente com a nomenclatura adotada para sua identificação mais fácil.

O teor dos ativadores (cal hidratada, gipsita e CP V) foi selecionado com base em pesquisas precedentes (AGOPYAN, 1991; OLIVEIRA, 2000). No caso da ativação com gipsita e cal hidratada, os percentuais de 10% e 2% respectivamente foram os sugeridos por AGOPYAN (1991), obtidos a partir da avaliação dos teores de cal livre apresentados nas misturas endurecidas. No referido estudo, tais teores foram considerados adequados,

em razão da menor alcalinidade apresentada pela matriz, desejável quando da utilização de fibras vegetais como reforço. Por sua vez, a utilização de 40% de cimento Portland, como outra opção de ativação, serviu como comparativo para avaliar o comportamento das fibras em meio, supostamente, mais alcalino.

No caso das fibras, procurou-se ampliar os conhecimentos e dar seqüência às pesquisas de SAVASTANO Jr. (2000) com uso de celulose. Os percentuais empregados também seguiram recomendação deste autor, optando-se por utilizar os teores de 2% e 12% da massa de sólidos.

Tabela 4-1 - **Nomenclatura adotada para os misturas empregadas no experimento.**

Escória	Gipsita	Cal hidratada	Cimento CP V ARI	Código	Fibra
88%	10%	2%		EGCH	2%
88%	10%	2%		EGCH	12%
60%			40%	ECP	2%
60%			40%	ECP	12%

Os sub-itens na seqüência apresentam, de forma individual e mais detalhada, as matérias-primas empregadas, bem como suas características.

4.2.1. FIBRAS

As fibras empregadas são resíduos da produção de celulose de *Eucalyptus grandis*, pelo processo *Kraft* com branqueamento parcial, fornecidas pela empresa Aracruz Celulose, situada no Espírito Santo. Estas fibras são resíduos da filtragem dos efluentes do processo de polpação e de branqueamento. As polpas foram secas em estufa com circulação de ar (65°C), até constância de massa, previamente à estocagem em laboratório. A caracterização da amostra de fibras é apresentada por SAVASTANO Jr. (2000) e resumida na **Tabela 4-2**.

As fibras apresentam comprimento médio igual a 0,66mm e espessura de 10,9µm, medidos respectivamente por analisador óptico automatizado Kajaani FS-200 e por microscopia eletrônica de varredura (MEV). A massa específica da fibra alcançou 1609 kg/m³, bastante acima de sua massa aparente, determinada como sendo de 230 kg/m³, diferença explicada pelo alto conteúdo de vazios (89%) em sua estrutura. Sua absorção de água, por

consequência, também é considerada alta, atingindo 643%. Suas propriedades avaliadas estão resumidas na **Tabela 4-2**.

Tabela 4-2 - **Características das fibras residuais de celulose de eucalipto (SAVASTANO Jr, 2000).**

Determinação	Método	Valor	Observações
Massa específica (kg/m³)	NBR 9778	1609	
Massa aparente (kg/m³)	NBR 9778	230	
Volume de vazios permeáveis (%)	NBR 9778	89	
Absorção de água (%)	NBR 9778	643	
Comprimento médio (mm)	Analisador óptico automatizado Kajaani FS-200	0,66	Coefficiente de variação igual a 50%
Espessura da fibra (µm)	MEV	10,9	Média de 20 medidas em MEV
Relação de aspecto	Comprimento médio/espessura	61	
Número Kappa	Appita P201 m-86	6,1	
Drenabilidade CSF (ml)	AS 1301.206s-88	685	
Finos (%)		7,01	
Massa por unidade de comprimento (mg/m)		0,107	

Em decorrência de sua natureza residual, as fibras apresentam contaminantes como folhas e restos vegetais em sua composição, principalmente pequenos cavacos de madeira (aglomerados de fibras individuais não totalmente desintegrados durante o processo de polpação), o que não gerou nenhum inconveniente em seu uso.

4.2.2. ESCÓRIA DE ALTO FORNO

A escória granulada de alto-forno, proveniente da CST³¹, foi moída até uma finura Blaine de 510 m²/kg (NBR 7224/84), conforme detalhado em 4.3.2. A escolha do tipo e da procedência se deu em razão do conhecimento prévio das características do material, disponíveis em trabalhos científicos anteriores de AGOPYAN (1991); JOHN (1995); SILVA (1998); OLIVEIRA (2000) e SAVASTANO Jr. (2000). A finura adotada foi recomendada nas pesquisas citadas, pois alia velocidade de hidratação aceitável da escória à viabilidade técnica e custos de moagem razoáveis. A massa específica da escória, determinada de acordo com a NBR 6474, foi de 2,88 kg/m³.

Os dados da análise química e do teor de álcalis solúveis da escória foram obtidos por OLIVEIRA (2000), e estão apresentados na **Tabela 4-3** e na **Tabela 4-4**.

Tabela 4-3 - **Composição química da escória determinada por via úmida.**

Determinação	Teor em massa (%)	Determinação	Teor em massa (%)
Perda ao fogo	1,67	Na ₂ O	0,16
SiO ₂	33,78	K ₂ O	0,32
Al ₂ O ₃	13,11	S ²⁻	1,14
Fe ₂ O ₃	0,51	CaO livre	0,10
CaO	42,47	Resíduo insolúvel	0,53
MgO	7,46		
SO ₃	0,15		

A relação Cao/SiO₂ da escória é 1,3 (em massa), sendo definida como básica. O teor de vidro, obtido por meio de contagem em microscópio óptico, de 99,5% é elevado.

³¹ Companhia Siderúrgica Tubarão, localizada em Vitória, Espírito Santo. Maiores informações: <http://www.cst.com.br>

Tabela 4-4 - **Teor de álcalis solúveis da escória determinado por fotometria de chama segundo o método ASTM C 114 (OLIVEIRA, 2000).**

Álcali solúvel	Teor (%)
Na ⁺	0,004
K ⁺	0,001

Para avaliação e quantificação de seu poder aglomerante em função da finura apresentada, foi empregado o método sugerido por CINCOTTO *et al.* (1992) que consiste na moldagem e ruptura à compressão de CPs cilíndricos de 5 cm x 10 cm, utilizando ativação por soda cáustica. As escórias analisadas foram ativadas com solução sódica na concentração de 200 g de soda por litro de água, usando relação soda/escória igual 0,50, e comparadas a misturas confeccionadas com substituição de 40% de escória por cimento Portland e relação a/c também igual 0,50. Os resultados das resistências mecânicas são apresentados na Tabela 4-5.

Tabela 4-5 - **Resistências mecânicas obtidas pelas argamassas de escória ativada com solução sódica ou com cimento Portland a diversas idades.**

Aglomerante		Ativador	Resistência mecânica (MPa)			
Tipo	Finura (m ² /kg)		6 horas	24 horas	48 horas	28 dias
Escória	350	Solução sódica	3,1	5,9	7,1	18,0
Escória	500	Solução sódica	5,2	9,2	10,5	23,0
Escória	350	Cimento Portland	0,3	6,9	13,4	39,0

Os resultados apresentados da resistência mecânica das escórias ratificaram a opção pelo uso da finura de 500 m²/kg. Os valores obtidos acima de 3 MPa às 6 horas confirmam a boa qualidade da escória utilizada (CINCOTTO *et al.*, 1992).

4.2.3. CIMENTO PORTLAND

O cimento Portland, empregado como outra opção de ativador, foi o CP V ARI marca CIMINAS, escolhido pela sua finura mais próxima à da escória (450 kg/m²) e pelo seu menor conteúdo de adições. Sua composição química e seus teores de álcalis solúveis são apresentados a seguir.

Tabela 4-6 - **Teor de álcalis solúveis do cimento Portland determinado por fotometria de chama segundo o método ASTM C 114 (OLIVEIRA, 2000).**

Álcali solúvel	Teor (%)
Na ⁺	0,006
K ⁺	0,303

Tabela 4-7 - **Composição química do cimento do cimento (OLIVEIRA, 2000)**

Determinação	Teor (%)	Determinação	Teor (%)
SiO ₂	19,2	SO ₃	2,96
Al ₂ O ₃	4,98	Na ₂ O	0,02
Fe ₂ O ₃	3,17	K ₂ O	0,57
CaO	65,6	CO ₂	1,76
MgO	0,36	Na ₂ O _e	0,40

A massa específica do cimento é 3,01 kg/m³ e se situou dentro da faixa de variação dos cimentos nacionais (entre 2,80 kg/m³ e 3,20 kg/m³).

4.2.4. GIPSITA

A gipsita utilizada é proveniente da região do Araripe/PE e sua composição química provável é apresentada na tabela a seguir.

Tabela 4-8- **Composição química provável da gipsita (OLIVEIRA, 2000)**

Determinação	Teor (%)	Determinação	Teor (%)
CaSO ₄ .2H ₂ O	88,90	MgCO ₃	0,42
CaSO ₄	7,12	MgO	0,16
CaCO ₃	1,54	SiO ₂ + Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃	0,84

Seu alto grau de pureza e ausência de resíduos insolúveis contribui para sua melhor solubilidade, favorável ao processo de hidratação da escória, de dissolução-precipitação.

A massa específica da gipsita é de 2,30 kg/m³ e sua finura Blaine 353 m²/kg. O teor de gipsita empregado foi 10% em relação à massa total de aglomerante. Experiências com a utilização de fosfogipso (resíduo de indústrias de fertilizantes) não recomendaram seu uso,

devido à demora observada na hidratação da escória. Tal comportamento foi causado, provavelmente, pela finura reduzida e sua baixa solubilidade em meio aquoso.

4.2.5. CAL HIDRATADA

A cal empregada foi do tipo CHI (classificação conforme NBR 7175), com massa específica igual 2,28 kg/m³ (NBR 6474) e área específica Blaine de 1090 m²/kg (NBR 7224). A composição química da cal é apresentada na **Tabela 4-9**.

Tabela 4-9 - **Composição química provável da cal hidratada (OLIVEIRA, 2000).**

Determinação	Teor (%)	Determinação	Teor (%)
Ca(OH) ₂	91,00	SiO ₂	1,50
Mg(OH) ₂	0,56	Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	0,89
CaSO ₄	3,17	H ₂ O livre	0,36
CaCO ₃	5,60	Óxidos totais na base não volátil	92,00

Assim como a pureza da gipsita, a alta finura da cal também contribui com a velocidade de hidratação da escória, acelerando o processo de dissolução e aumentando sequencialmente a saturação do meio.

4.3. MÉTODOS DE PREPARO DAS MATÉRIAS PRIMAS

Os processos para produção dos compósitos foram e vêm sendo aperfeiçoados pela equipe integrante do grupo de pesquisas em novos fibrocimentos do LCR/FZEA. Tais processos visam simular, em escala laboratorial, o método Hatscheck utilizado em escala industrial na produção de compósitos reforçados com fibras. A experiência na adaptação dos referidos processos se deve, em grande parte, ao conhecimento adquirido pelo colaborador desta pesquisa, Prof. Holmer Savastano Jr. Para melhor visualização dos detalhes de moldagem, as etapas descritas estão ilustradas em fotos no anexo.

4.3.1. PRÉ-TRATAMENTO DA FIBRA

As fibras foram submetidas a processo de dispersão em água para sua desintegração, através do uso de um agitador de alta rotação. O agitador consiste em uma espécie de liquidificador industrial, no qual eram colocados os materiais, na concentração de 5,6g de fibra por litro de água e processados durante 10 minutos. Esses valores foram definidos

após o aperfeiçoamento durante os experimentos e proporcionaram melhor qualidade de dispersão final da polpa.

Após dispersão, retirou-se o excesso de água, com auxílio de bomba de pressão reduzida ("bomba de vácuo"). Para evitar a formação de grandes aglomerados de fibras, as polpas eram submetidas a 5 min de agitação em uma argamassadeira laboratorial a baixa velocidade e, em seguida, guardadas na geladeira em sacos plásticos fechados e com umidade entre 70% e 75%, avaliada pelo menos um dia após o processo de dispersão, pela diferença entre suas massas úmida e seca, após 24 h de secagem em estufa a 105°C.

4.3.2. MOAGEM DA ESCÓRIA

A escória foi moída em moinho de bolas, em bateladas de 15 kg. Ao atingir finuras acima de 300 m²/kg a moagem tornava-se lenta devido à aglomeração das partículas nas bolas. Visando a torná-la mais rápida, foi utilizado um tensoativo etilenoglicol.

Para aumentar a dispersão, o moinho era carregado em duas etapas de 7,5 kg, intercaladas pela colocação do etilenoglicol. A evolução da finura foi avaliada a cada 30 minutos de moagem por meio da área específica (NBR 7224) (**Tabela 4-10**).

Tabela 4-10 - **Evolução da área específica da escória com o tempo de moagem**

Tempo de moagem (min)	Massa específica (kg/m³)	Área específica (m²/kg)
30	2,68	79
60	2,84	182
90	2,93	217
120	2,90	236
150	2,88	339
180	2,88	388
210	2,88	460
240	2,88	510

As dificuldades inerentes ao ensaio de massa específica, tais como a retirada de bolhas presentes entre as partículas da escória é a explicação para a variação neste valor. Todavia, esta variação foi considerada desprezível, menos de 1%.

4.4. MÉTODOS DE PRODUÇÃO DO COMPÓSITO

O processo para produção dos compósitos é baseado na adaptação do Hatscheck para uma escala laboratorial. Suas principais etapas são apresentadas na **Figura 4.2**.

Figura 4.2 – **Seqüência de produção do compósito.**

As etapas são descritas de forma individual nos subitens posteriores, destacando mais detalhadamente seus procedimentos.

4.4.1. MISTURA DOS MATERIAIS

A mistura foi realizada com o uso de um agitador de eixo vertical, potência de 70W e rotação regulável até 5300 RPM. A rotação adotada foi aproximadamente 2000 RPM.

No processo, procurou-se sempre manter a concentração sólidos:massa total³² variando entre 20% (para 12% de fibras) e 40%(para 2% de fibras), de forma a permitir a perfeita dispersão das fibras celulósicas e sua conseqüente melhor distribuição no interior do compósito, mesmo em teores elevados, melhorando e uniformizando assim, seus desempenhos físico e mecânico.

As fibras, depois de pesadas e corrigida sua umidade, eram colocadas em béqueres com capacidade para 1 litro e completados com água até 600 ml, no caso de teores de fibra de 12% e com 200ml, no caso das misturas com 2%, buscando manter a relação de sólidos (cimento+fibras) em 0,30. As fibras eram então agitadas até dispersão completa ou até não mais se apresentarem aglomeradas (aproximadamente 2 min), para daí ser adicionado o aglomerante e misturado por mais 5 min.

4.4.2. MOLDAGEM E ADENSAMENTO

Após misturado, o material é lançado em uma câmara galvanizada de aço, com dimensões internas de (120 x 120)mm, acoplada por sua base a uma bomba de pressão reduzida ("bomba de vácuo"), para sucção do excesso de água do compósito. Os detalhes da moldagem e adensamento das placas estão apresentados na **Figura 4.3** e suas etapas são descritas em seguida:

Figura 4.3 - **Esquema da seqüência de produção do compósito pela adaptação do processo Hatscheck.**

³² O total de sólidos é a soma do cimento mais a fibra; acrescentando-se a água tem-se a massa total.

- 1) A mistura, de consistência bem fluída é derramada na câmara-molde e, a partir daí, a sub-pressão (pressão manométrica negativa entre 60 kPa e 80 kPa) é acionada até que o excesso de água fosse retirado, indicado pela opacidade da placa;
- 2) A bomba é desligada e o adensamento realizado por meio de 30 golpes de um soquete metálico de base retangular (50 x 75) mm e altura de 210 mm, pesando cerca de 1100 g;
- 3) Após a compactação manual, o vácuo é acionado novamente por mais 2 minutos e em seguida a câmara é aberta e a placa retirada, aguardando para ser prensada juntamente com outras duas da mesma série.

4.4.3. PRENSAGEM

Após moldadas, grupos de três placas de uma mesma série, intercaladas pela colocação de chapas metálicas e telas de drenagem entre elas (**Figura 4.3**) e com dimensões aproximadas de (120 x 120 x 6) mm foram submetidas à prensagem de 3,2 MPa, conforme recomendação de COUTTS; WARDEN (1990). A prensagem das placas retira o excesso de água ainda presente, através de telas colocadas sobre as chapas, além de aumentar sua compacidade. O equipamento usado para prensagem foi uma prensa EMIC, modelo DL 30000 com célula de carga de 30 kN. Durante a prensagem um jato de ar comprimido era utilizado para remover a água que saía da placa. A velocidade de deslocamento do braço da prensa (*crossover*) foi estabelecida em 10 mm/min e, uma vez atingida a carga pré-estabelecida, as placas permaneciam comprimidas por 5 min, após o que a tensão era aliviada de forma lenta para não causar variações de tensão bruscas nos corpos-de-prova. Depois da prensagem, as placas eram pesadas em balança de precisão de 0,01g para que, por diferença de massa entre a matéria-prima seca inicial e a placa recém moldada, fosse determinado, de forma estimativa, a relação água/cimento.

4.4.4. CURA

As placas, três a três, após a prensagem, foram acondicionadas em sacos plásticos selados e com pouco ar em seu interior. Estes sacos foram então mantidos a temperatura de laboratório por um período de sete dias. Após este período, os sacos eram abertos e deixados por mais sete dias em ambiente de laboratório, para, a partir daí, serem submetidos ao terceiro período de cura, que era determinado em função do tipo de ensaio

de envelhecimento ao qual seria submetido. A seqüência de cura está descrita na **Figura 4.4** com seus períodos correspondentes.

Figura 4.4 – **Seqüência e distribuição dos tempos dos períodos de cura empregados.**

Dos CPs utilizados como referencia (rompimento aos 28 dias), metade foram submetidos a ambiente de laboratório durante 14 dias e a outra metade a uma câmara de dióxido de carbono (CO₂) a 100% de concentração pelo mesmo período. Este período foi suficiente para propiciar a carbonatação total da matriz. A opção pela idade de 28 dias permitiu uma correlação e uma comparação mais fácil com outros dados já publicados.

Os CPs submetidos ao envelhecimento natural foram curados por sete dias em ambiente saturado e, durante os 21 dias subseqüentes, armazenados em ambiente de laboratório, para posterior exposição às intempéries do ambiente externo.

Os CPs submetidos ao envelhecimento acelerado sofreram o mesmo processo de cura empregado para os CPs de referência para posterior aplicação dos ciclos de molhagem e secagem.

4.4.5. CORTE DOS CORPOS-DE-PROVA

As placas, de dimensões iniciais aproximadas de (120 x 120 x 6) mm foram cortadas em uma serra de disco diamantado com dispositivo aspersor de água para obtenção das dimensões finais planejadas (120 x 40 x 6) mm. Dessa forma, cada placa deu origem a três CPs de dimensões iguais.

A operação era feita após a cura inicial de 7 dias e após o corte, as placas eram limpas e raspadas levemente com uma espátula, sob um filete de água corrente, para retirar possíveis imperfeições e rebarbas ainda existentes.

A partir daí, o armazenamento era realizado em suportes de tubos de PVC com 100 mm de diâmetro, cortados ao meio na direção longitudinal e com fendas transversais para encaixe dos CPs, que permitissem a sua exposição de forma uniforme ao ar, sem se deformar pela perda diferencial de umidade.

4.5. CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO

Os compósitos foram caracterizados no que se refere às suas propriedades físicas e mecânicas, seguindo um dos objetivos do trabalho em identificar os principais mecanismos de degradação e avaliá-los. Dessa forma, a avaliação dessas propriedades permitiu a obtenção de dados relativos ao desempenho físico e mecânico do material ao longo do tempo.

4.5.1. PROPRIEDADES FÍSICAS

As propriedades físicas avaliadas foram massa específica, porosidade e absorção de água do compósito, obtidas pela média dos valores de, no mínimo, seis corpos-de-prova previamente ensaiados à flexão, de acordo com a ASTM C 948-81.

Os CPs eram pesados em balança digital com dispositivo hidrostático com sensibilidade de 0,01g e suas massas, seca em estufa por 24 h a 105°C, saturada com superfície seca (SSS) após imersão em água por 24 h e imersa, eram anotadas para que, utilizando a correlação entre esses índices, as propriedades físicas citadas fossem obtidas. A tabela a seguir apresenta um resumo da forma de cálculo das propriedades físicas.

Tabela 4-11 – **Determinação do cálculo das propriedades físicas.**

Propriedade avaliada	Unidade	Determinação	Observações
Massa específica	Kg/dm ³	$M_{s_{est}} / M_{s_{est}} - M_{im}$	$M_{s_{est}}$ – Massa seca em estufa M_{im} – Massa imersa
Absorção	(%)	$M_{sss} - M_{s_{est}} / M_{s_{est}}$	M_{sss} – Massa saturada com superfície seca
Porosidade	(%)	$M_{sss} - M_{s_{est}} / M_{sss} - M_{im}$	

Os cálculos dessas três propriedades físicas serviram para facilitar a avaliação da influência da adição das fibras sobre elas, bem como obter indicativos de como a degradação do compósito atua nas mesmas. Aliadas à permeabilidade, essas propriedades foram consideradas, sob o aspecto físico, as mais relevantes no desenvolvimento de materiais a serem empregados em coberturas.

4.5.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas foram determinadas pelo ensaio de flexão com três cutelos (vão inferior de 100 mm), determinando o módulo de ruptura (MOR), o módulo de elasticidade (MOE) e a energia específica dos compósitos por meio da máquina universal de ensaios EMIC DL 30000, com velocidade de carga (deslocamento do braço da prensa) de 0,5 mm/min e emprego de nove corpos-de-prova por série para cálculo da média aritmética. Os resultados do MOR e do MOE foram obtidos das fórmulas apresentadas a seguir, calculadas pelo software da prensa:

$$MOR = \frac{3Pl}{2bd^2}; \quad e \quad MOE = \frac{ml^3}{4bd^3}, \text{ onde:}$$

P – Carga máxima aplicada;

l – Vão inferior entre cutelos;

b e *d* – Largura e espessura dos corpos-de-prova na região de aplicação da carga;

m – Inclinação da curva carga-deflexão durante a região elástica.

As deformações correspondentes às cargas aplicadas foram obtidas com uso de um LVDT instalado no centro do corpo-de-prova. Um computador munido do software M-Test (versão 1.01/96) foi utilizado para aquisição dos dados. Utilizou-se célula de carga com capacidade última de 5 kN. O desenho esquemático do ensaio de flexão é apresentado na **Figura 4.5** a seguir.

Figura 4.5 – **Esquema do ensaio de flexão utilizado para determinar as resistências à tração na flexão, o módulo de elasticidade e a tenacidade.**

A energia específica do compósito foi obtida pela relação entre a energia de fratura, obtida da integração da área abaixo da curva carga x deslocamento, até o ponto de redução de 50% na carga máxima aplicada, dividida pela área da seção transversal do corpo-prova na região da fratura.

Indicativo da capacidade de deformação do material, o módulo de elasticidade foi calculado como sendo a relação entre a tensão máxima atingida pelo compósito no regime elástico, identificada pela conformação da curva e sua correspondente deformação específica, que é a relação entre a deformação obtida e a base de medida utilizada para sua obtenção em unidades correspondentes. Os dados foram gerados automaticamente do software da prensa.

Figura 4.6 – **Demonstração do cálculo do MOE do material.**

A largura de cada CP foi medida com um paquímetro digital, de marca MITUTOYO com precisão de 0,01 mm. Um micrômetro, também MITUTOYO e com resolução de 0,001 mm foi utilizado para medir a espessura. A média aritmética de três medidas foi utilizada na determinação da tensão, da energia e do módulo de elasticidade.

4.6. MÉTODOS DE ENVELHECIMENTO DO COMPÓSITO

4.6.1. ENSAIOS DE ENVELHECIMENTO NATURAL

Os métodos empregados para avaliação da durabilidade de um compósito ao longo do tempo, na sua grande maioria, concentram-se na exposição de exemplares ao ambiente externo, em condições similares às que o componente estará submetido durante seu uso.

Esses métodos, denominados de envelhecimento natural, costumam demandar um período de tempo extenso de exposição dos espécimes às intempéries, tornando difícil seu emprego, por exemplo, em um projeto de pesquisa de mestrado que, comumente, desenvolve-se ao longo de 24 meses. A bibliografia chega a apresentar resultados de ensaios realizados em corpos-de-prova após 25 anos de envelhecimento ao meio ambiente (BENTUR; AKERS, 1989).

Inúmeras pesquisas procuram simular, da forma mais aproximada possível, o efeito que a degradação causa no compósito, diminuindo assim, o tempo necessário à obtenção de respostas, que possam contribuir com o desenvolvimento de materiais que sejam mais duráveis ao longo do tempo. A utilização dos ensaios acelerados contribui de forma significativa para isso, devendo-se observar, porém, as limitações técnicas impostas por esses métodos já apresentadas no Capítulo III.

Os ensaios de envelhecimento natural dos compósitos seguiram as recomendações de SAVASTANO Jr. (2000); AGOPYAN (1991) JOHN *et al.* (1997) e AKERS; STUDINKA (1989).

Os corpos-de-prova foram expostos ao meio ambiente externo do telhado da Escola Politécnica da USP, no campus da Cidade Universitária em São Paulo/SP, apoiados em bancadas construídas para tal fim, com inclinação de 30° em relação ao eixo horizontal e voltados para o Norte magnético.

4.6.2. ENSAIOS DE ENVELHECIMENTO ACELERADO

Os ensaios acelerados foram planejados visando simular a ação das intempéries na durabilidade dos compósitos, de forma a acelerar a degradação. Sabe-se, como já foi discutido anteriormente no Capítulo III, que os principais agentes de degradação são a água, o CO₂, a temperatura e a incompatibilidade química e física entre as fibras e a matriz, decorrentes dos processos de hidratação do cimento e de variação dimensional das fibras. Dessa forma, os ciclos de envelhecimento escolhidos nesse experimento buscaram simular a ação isolada ou conjunta desses fatores.

Estudos prévios descritos na literatura também foram considerados para determinação dos ensaios e de seus parâmetros. AKERS; STUDINKA (1989), estudando possíveis formas para avaliação de durabilidade, analisaram métodos cíclicos que combinavam molhagem por imersão, seguida de secagem por radiação em câmaras de infra-vermelho, aliados à carbonatação acelerada ou não da matriz cimentícia. Após os testes, os autores recomendaram a utilização dos métodos de molhagem e secagem aliados a exposição dos CPs a ambiente rico em CO₂, considerando que o método se mostrou mais eficiente na simulação da degradação em uso do material do que apenas os ciclos isolados.

JOHN *et al.* (1997) utilizou ensaios cíclicos em CRFV, perfazendo um total de 648 h de exposição e adotou ciclos de 8 h de molhagem por aspersão de vapor d'água a 100°C e secagem a 45°C por mais 8 h.

SAVASTANO Jr. (2000) reportou ensaios de envelhecimento acelerado baseados na prescrição da ASTM G-53, empregando ciclos de 8 h de duração, sendo 4 h sob luz ultravioleta e 4 h sob aspersão de água potável. A simulação, assim como a manutenção dos corpos-de-prova em ambientes de laboratório, levou a aumentos nos valores das resistências à tração, atribuídos ao favorecimento na hidratação do aglomerante empregado. O autor considerou, então, os ciclos pouco válidos para simulação do envelhecimento dos compósitos, recomendando a utilização de ciclos por umedecimento por imersão e secagem por aquecimento, em conjunto com a utilização da carbonatação acelerada (MacVICAR *et al.*, 1999 e SOROUSHIAN *et al.*, 1994).

Estabeleceu-se, no presente experimento, após a análise das propostas estudadas, ciclos de 6 h de imersão em água potável a 70°C, temperatura que foi escolhida para condicionar um processo de decomposição mais rápido da fibra pela extração de seus componentes,

principalmente a lignina (AGOPYAN, 1991), seguida de 6 h de secagem em estufa com circulação de ar à mesma temperatura. Foi estabelecido que seriam realizados 10, 20 e 40 ciclos, ensaiando os CPs a cada término das séries propostas.

Antes de serem submetidos aos ciclos, metade dos CPs foram totalmente carbonatados (como mostrado na **Figura 4.4**), seguindo a orientação de AKERS; STUDINKA (1989) e visando avaliar a influência desse efeito sobre a durabilidade do material, já que tal efeito pode ser tanto benéfico, visto a baixa de alcalinidade proporcionada, quanto maléfico, por causa da perda de resistência mecânica da matriz, assunto também já discutido previamente no capítulo relativo à durabilidade (item 3.3.3).

A carbonatação total dos espécimes foi realizada em câmara fechada, com ambiente saturado em 100% de CO₂ e umidade relativa controlada, variando entre 70% e 75%. A verificação da profundidade da carbonatação dos exemplares foi feita com solução de 2% de fenolftaleína em álcool.

4.7. COMPÓSITOS DE REFERÊNCIA

Visando obter uma maior confiabilidade nos resultados obtidos na avaliação do compósito aqui desenvolvido, optou-se por usar o cimento-amianto comercial como referência e parâmetro para comparação.

As placas de cimento-amianto foram doadas pelas empresas INFIBRA e PERMATEX, produtoras de telhas para cobertura e caixas d'água. Foi solicitado que as placas enviadas tivessem forma lisa, que o sentido de rotação do cilindro fosse informado³³, bem como a data de moldagem da placa.

As placas eram então cortadas da mesma forma e dimensões que as placas de cimento-celulose (ver item 4.4.5), dando origem a corpos-de-prova de (120 x 40 x 6)mm. Os resultados utilizados são a média aritmética de 12 CPs. Para efeito comparativo com os CPs de cimento-celulose, nos quais as fibras eram distribuídas sem orientação característica definida, foram empregados 6 CPs cortados no sentido longitudinal da placa e outros 6 cortados perpendicularmente.

³³ O processo de produção de telhas cimento amianto segue o que foi apresentado na **Figura 2.2**.

Os CPs de cimento-amianto foram submetidos a tratamentos de envelhecimento idênticos aos empregados para os CPs de cimento com celulose, sendo avaliados também sob os mesmos parâmetros e propriedades.

4.8. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Cada série de nove CP's foi submetida a análise estatística seqüencial que consistiu em: exclusão dos valores individuais espúrios; cálculo da média ($\bar{X}$) e do desvio padrão (dp) entre os valores individuais; exclusão dos valores fora da variação proposta: $\bar{X} \pm 2 \text{ dp}$.

Foi empregada a análise de variância (ANOVA) de fator único para determinar as variáveis que influíram nas propriedades dos compósitos. Em seguida foram realizados testes de comparação de médias para verificar a diferença significativa entre grupos. A análise completa está apresentada no anexo B.

Capítulo V

Análise e discussão dos resultados

O presente capítulo discute os resultados obtidos do programa experimental. O capítulo foi subdividido nos tópicos que discutem aspectos como: influência da adição de fibras celulósicas no comportamento do compósito e as propriedades da matriz sem reforço; matrizes de composição distinta e sua influência nas propriedades dos compósitos; efeito dos ensaios de envelhecimento propostos sobre as propriedades dos compósitos; a correlação entre os ensaios acelerados e naturais; comparação entre os compósitos reforçados com fibras de celulose e o cimento-amianto comercial.

5.1. DESEMPENHO DOS COMPÓSITOS AOS 28 DIAS

5.1.1. PROPRIEDADES FÍSICAS

As propriedades físicas foram afetadas com a incorporação das fibras, o que pode ser constatado pela observação da **Tabela 5-1**. A redução na massa específica e o aumento da absorção do compósito podem ser atribuídos a um somatório de fatores:

- Presença de maior volume de fração menos densa (fibras), dada a diferença entre a sua massa específica (230 kg/m^3) e da matriz sem reforço (estimada para o cálculo a seguir em 1735 kg/m^3 para ECP). O cálculo a seguir demonstra que a simples adição das fibras, não é suficiente para explicar a queda da densidade observada nos corpos-de-prova.

$$\gamma_{\text{composito.2\%}} = (\gamma_{\text{fibras}} \times 0,02) + (\gamma_{\text{matriz}} \times 0,98)$$

$$1700 = (0,230 \times 0,02) + (0,98 \gamma_{\text{matriz}})$$

$$\gamma_{\text{matriz}} = 1735 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$\gamma_{\text{composito.12\%}} = (0,230 \times 0,12) + (1735 \times 0,98)$$

$$\gamma_{\text{composito.12\%}} = 1520 \text{ kg} / \text{m}^3$$

- Aumento da porosidade em razão da elevação da relação a/c, que aumentou de aproximadamente 0,40 com 2% de fibras para aproximadamente 0,62 com 12%, em função da alta absorção das fibras. Os valores da relação a/c foram estimados

pela diferença entre os materiais secos antes da mistura e os compósitos depois de moldados.

- Aumento da porosidade pela incorporação de ar pelas fibras;
- Grande quantidade de poros nas fibras, conforme demonstrado pela e sua alta absorção, que embora variável é tipicamente acima de 400% (SAVASTANO Jr., 2000);
- A pressão negativa aplicada durante a produção dos corpos-de-prova para a retirada do excesso de água, permite a formação de canais, provavelmente conduzindo a uma maior quantidade de poros.

Tabela 5-1 – **Valores médios (6 exemplares) das propriedades físicas dos compósitos aos 28 dias. Desvio padrão entre parêntesis.**

Matriz	% de fibra	Absorção (%)	γ^{34} (g/cm³)	Porosidade (%)
EGCH	2%	14,2 (0,8)	1,54 (0,04)	38,5 (0,9)
	12%	35,7 (0,8)	1,26 (0,02)	44,8 (0,4)
ECP	2%	16,5 (0,5)	1,70 (0,02)	28,2 (0,5)
	12%	25,2 (1,1)	1,42 (0,03)	35,6 (0,9)

As matrizes EGCH apresentaram massa específica inferior à ECP com mesmo teor de fibras. Uma explicação para isso poderia ser a presença de produtos hidratados menos densos na matriz EGCH, possivelmente etringita e gipsita, em detrimento do C-S-H, fato que necessita de maiores estudos para confirmação.

5.1.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS

A **Figura 5.1** apresenta curvas típicas carga *versus* deformação dos compósitos. São apresentadas curvas dos compósitos com diferentes teores de fibras: teor mínimo de 2% e o teor ótimo de 12%, obtido de SAVASTANO Jr. (2000).

A adição de 12% de fibras de celulose aumentou a carga máxima de ruptura dos compósitos para valores superiores ao de ruptura da matriz, caracterizada pela tensão limite de proporcionalidade. Estes resultados estão de acordo com a teoria de AVESTON, COOPER e KELLY (1971 e 1973) de múltipla fratura que afirma que quando a matriz atinge

³⁴ γ - Simbologia adotada para massa específica do compósito

a deformação limite, toda carga é transferida da matriz para as fibras, que a transfere parcialmente aos trechos não danificados da matriz. O teor de 2% de fibras não é suficiente para absorver os esforços transferidos pela matriz que se rompe, provocando rápida queda da capacidade de carga após a ruptura da matriz.

Em consequência, as deformações na ruptura (redução de 50% na carga) dos compósitos com 12% de fibras foram até 8 vezes maiores que as matrizes com teor de reforço de 2%, saindo de 0,33mm-0,35mm para 1,19mm-1,54mm (**Tabela 5-2**).

Figura 5.1 – **Curvas típicas carga *versus* deformação em ensaio de flexão dos compósitos reforçados com 2% e 12% de fibras de celulose e de cimento-amianto aos 28 dias, após cura úmida em ambiente saturado (diferença de aproximadamente 2mm entre os corpos-de-prova com 2% e 12% de celulose).**

Assim, teores de 12% de celulose foram capazes de conferir um comportamento dúctil ao compósito.

Tabela 5-2 – Capacidade de deformação dos compósitos e relação com suas propriedades mecânicas.

Matriz	% fibra	MOR (Mpa)	Def _{cmáx} (mm)	Def _{rupt} (mm)	Rel (%) Def _{rup} /Def _{cmáx}	E _{específica} (kJ/m ²)	MOE (GPa)
EGCH	2	6,1 (0,7)	0,35	0,55	57	0,07 (0,01)	6,5 (2,5)
	12	8,7 (0,6)	1,54	3,48	126	0,94 (0,20)	3,8 (0,9)
ECP	2	5,0 (0,6)	0,33	0,94	185	0,12 (0,02)	-
	12	12,5 (1,2)	1,19	1,87	57	0,74 (0,17)	5,9 (1,6)
Cimento-amianto		17,6 (0,8)	0,73	1,24	70	0,36 (0,03)	13,9 (1,3)

O cimento-amianto apresentou curva *carga versus deformação* típica de materiais frágeis, com pouca capacidade de suporte de carga pós-fissuração e uma fase elástica bem definida. A tenacidade deste material foi inferior aos demais compósitos com 12%. O MOE, em torno de 13 GPa, foi superior aos compósitos reforçados com 12% de fibras de celulose, cujo valor variou entre 4-7 GPa. A explicação provavelmente está no alto módulo de elasticidade das fibras de amianto (em torno de 160 GPa), na grande aderência fibra-matriz e na sua baixa capacidade de alongamento (2% na ruptura), conforme descrito na **Tabela 1-2**. Devem-se observar, também, os valores reduzidos de deformação na carga máxima e de ruptura deste material, bastante inferiores aos compósitos com 12% de celulose. A somatória dessas características confere ao cimento-amianto uma tendência de ruptura mais frágil que os compósitos com volume suficiente de fibras de celulose.

A observação da **Figura 5.2** permite a visualização do efeito da variação do teor de fibras nas duas propriedades mecânicas mais relevantes avaliadas no trabalho: módulo de ruptura (MOR) e energia específica (EE) dos compósitos aos 28 dias.

Figura 5.2 – **Varição do módulo de ruptura e da energia específica dos compósitos aos 28 dias em relação ao aumento do teor de fibras.**

Os compósitos com 2% de fibras apresentaram menores resultados de resistência à flexão, situando-se em torno de 6 MPa. A elevação do teor de fibras de 2% para 12% proporcionou aumentos entre 40% e 150% no módulo de ruptura, chegando a 8,7 MPa na EGCH e 12,5 MPa a ECP. Os valores de tenacidade situaram-se entre 0,07-0,12 kJ/m² nos compósitos com 2%. Com 12% este valor foi elevado para 0,94 kJ/m² e 0,74 kJ/m² nos compósitos EGCH e ECP respectivamente.

As matrizes ECP e EGCH são significativamente diferentes na composição de produtos hidratados e no grau de hidratação nas primeiras idades, conforme demonstrado por OLIVEIRA (2000), que estudou matrizes de composição similar confeccionados com a mesma escória de alto-forno. Segundo a autora, matrizes de EGCH possuem água do poro com pH significativamente inferior a matrizes produzidas pela mistura de 10% de cimento Portland com escória de alto-forno, além de grau de hidratação, medido pela água combinada ou escória reagida, significativamente inferior. A matriz ECP apresentou valores de MOR superiores com 12%, possivelmente devido ao seu maior grau de hidratação que, além de diminuir a porosidade da matriz, melhorou também a aderência fibra-matriz, pela densificação da interface. O menor grau de hidratação da matriz EGCH aos 28 dias e o conseqüente prejuízo à aderência fibra-matriz, potencializou o arrancamento das fibras com esforços inferiores e levou a valores de MOR inferiores aos da matriz ECP. Entretanto, a baixa aderência propiciou ganho de tenacidade, dado que a energia necessária para o

arrancamento das fibras é superior à necessária para sua ruptura, sendo este fator o principal responsável pelo aumento da tenacidade (COUTTS; WARDEN, 1990). Os resultados se mostraram de acordo com publicações precedentes e confirmaram a teoria geral de que há uma compensação entre o aumento de tenacidade e a perda de resistência mecânica e vice versa (ZHU *et al.*, 1994).

O problema da baixa hidratação da matriz EGCH pode ser corrigido pela adoção de técnicas como cura úmida por período de tempo mais longo, aumento na finura da EAF e variação nos teores dos ativadores (cal hidratada e gesso). As técnicas devem ser avaliadas, sem, entretanto, deixar de levar em consideração seus custos.

A ordem de grandeza dos valores encontrados para o MOE está dentro da variação descrita em trabalho precedente (SAVASTANO Jr. *et al.*, 2001). A **Tabela 5-2** mostra que os valores médios do módulo de elasticidade do compósito EGCH apresentaram redução considerável com a incorporação de fibras. Este comportamento é justificado por dois motivos: porosidade elevada devido às fibras incorporadas e pelo fato das fibras apresentarem módulo de elasticidade inferior ao da matriz sem reforço (ZHU *et al.*, 1994), já que o MOE do compósito está diretamente relacionado ao teor e à elasticidade das fibras adicionadas. A alta variabilidade dos dados dos ensaios não permitiu distinção estatística entre resultados das duas matrizes, para o nível de significância adotado.

A análise da **Tabela 5-2** permite destacar que não há uma relação direta entre o aumento na resistência mecânica e o aumento do módulo de elasticidade do material. Os fatores principais que regem o MOE do material são diferentes, por exemplo, dos que influenciam o concreto, dado que o módulo deste último pode ser correlacionado à sua resistência mecânica. No caso dos CRFC outros fatores são determinantes, pois percebe-se a significativa influência do teor de fibras nesta propriedade.

5.2. ENVELHECIMENTO NATURAL

Os resultados do envelhecimento natural, apresentados na **Figura 5.3**, mostram significativa redução no desempenho mecânico dos compósitos EGCH, com redução significativa de MOR e EE com o decorrer do tempo. Já os compósitos ECP apresentaram MOR constante no período, porém com redução de EE. Foi constatado através de solução de fenolftaleína que os corpos-de-prova de ambas as formulações estavam totalmente carbonatados já aos 3 meses de exposição.

Nos primeiros 3 meses, o MOR do EGCH foi constante (de 8,7 MPa para 8,1 MPa sem significância para o nível adotado). Neste período, no entanto, foi observado significativo crescimento na EE. Este período pode ter sido caracterizado pelo aumento do grau de hidratação com conseqüente densificação da interface, que permitiu um aumento da energia pós-pico. No entanto a presença de carbonatação, que resulta em aumento da porosidade, parece ter impedido o ganho da resistência, observação já realizada por JOHN *et al.* (1997) em ensaio de envelhecimento acelerado de compósitos com fibras de coco e este mesmo cimento.

Entre os 3 e os 9 meses, a formulação apresentou queda de aproximadamente 50% de sua resistência mecânica (4,4 MPa). A redução no MOR pode estar associada à lixiviação dos produtos, resultantes da carbonatação e que são solúveis, conforme descrito na equação do 3.3.3. Essa hipótese é confirmada pela observação da **Tabela 5-3**, que mostra aumento de porosidade entre 3 e 9 meses de envelhecimento de 44,8% para 47,4%. A tendência também foi observada por SAVASTANO Jr. (2001). Neste período a queda de resistência devido a carbonatação não foi compensada pelo aumento do grau de hidratação, provavelmente porque com a queda do pH a hidratação não prosseguiu. Além da perda de MOR, ele causou também uma queda de tenacidade (de 0,94 kJ/m² para 0,66 kJ/m²). A degradação da matriz pode ter comprometido o reforço, destruindo as ligações fibra-matriz. Estes fatores contribuíram para que o MOE também fosse reduzido à menos da metade após os 9 meses (variou de 3,8 GPa para 1,7 GPa).

Figura 5.3 – **Variação do módulo de ruptura e da energia específica dos compósitos reforçados com 12% de fibras em relação à idade de exposição ao meio ambiente.**

O compósito ECP não apresentou variação de MOR aos 3 meses para o nível de significância adotado (de 12,5 MPa para 14,2 MPa). A carbonatação da matriz reduziu sua porosidade conforme observado na **Tabela 5-3**. Entretanto, esta redução não foi suficiente para aumento significativo na resistência do material. No mesmo período, houve queda na tenacidade de 0,74 kJ/m² para 0,34 kJ/m², que pode ser explicada por dois motivos: a relação de compensação existente entre o aumento do MOR e a queda da energia ou a decomposição de fibras. Como o MOR se manteve constante, a redução foi provavelmente causada pelo ataque alcalino sofrido pelas fibras.

Tabela 5-3 – Variação das propriedades físicas dos compósitos com 12% sob a ação do envelhecimento natural

Código mistura	Idade	Absorção (%)	γ (g/cm³)	Porosidade (%)
EGCH	1 mês	35,7 (0,7)	1,26 (0,02)	44,8 (0,4)
	3 meses	36,1 (1,4)	1,25 (0,03)	45,0 (0,8)
	9 meses	38,6 (2,3)	1,23 (0,04)	47,4 (0,7)
ECP	1 mês	25,2 (1,1)	1,42 (0,03)	35,6 (0,9)
	3 meses	21,8 (0,4)	1,51 (0,01)	31,4 (0,7)
	9 meses	22,4 (1,3)	1,47 (0,03)	32,8 (1,3)

Corroborando as afirmações de JOHN *et al.* (1997), que em seu estudo com argamassas e fibras de coco observou que a velocidade de carbonatação de CRFV é rápida, ambos os compósitos carbonataram depois de 3 meses de exposição. A velocidade foi atribuída à alta porosidade do material. A partir deste momento onde a carbonatação cessou, não houve diferença nas propriedades físicas. Percebe-se que a partir desta redução da alcalinidade, proporcionada pela carbonatação, não há mais tendência de queda na tenacidade do compósito ECP, havendo inclusive ligeiro ganho, sem significância estatística, aos 9 meses de exposição.

5.3. ENVELHECIMENTO ACELERADO

5.3.1. EFEITOS DA CARBONATAÇÃO ACELERADA

A carbonatação atuou de forma diferente para cada matriz estudada. Os resultados da variação das propriedades mecânicas estão descritos na **Figura 5.4** e na **Figura 5.5**.

Figura 5.4 – **Efeito da carbonatação no MOR para diferentes composições de matrizes.**

Ela causou um aumento no MOR da matriz ECP de 12,5 MPa para 14,8 MPa, como resultado da densificação do material, pela transformação da portlandita em carbonatos, reduzindo sua porosidade em 15% (Tabela 5-4).

Tabela 5-4 – **Variação das propriedades físicas dos compósitos com 12% sob a ação da carbonatação.**

Código mistura	Carbonatação	Absorção (%)	γ (g/cm ³)	Porosidade (%)
EGCH	Sim	33,7 (1,4)	1,29 (0,02)	43,45 (0,4)
	Não	35,7 (0,7)	1,26 (0,04)	44,82 (0,9)
ECP	Sim	20,8 (1,1)	1,51 (0,03)	31,33 (0,9)
	Não	25,2 (0,3)	1,42 (0,01)	35,60 (0,3)

A carbonatação reduziu, de forma não significativa, a energia específica dos compósitos ECP de 0,74 kJ/m² para 0,64 kJ/m². A queda da tenacidade está possivelmente relacionada ao aumento da rigidez da interface, decorrente da densificação do material. Deve-se observar que o aumento do MOR juntamente com a redução da energia específica foi acompanhado de elevação no MOE do material (de 5,9 GPa para 7,3 GPa).

Figura 5.5 – **Efeito da carbonatação na tenacidade para diferentes composições de matrizes com 12%.**

Não houve efeito estatístico significativo da carbonatação acelerada sobre as propriedades mecânicas da matriz EGCH. Os valores não variaram significativamente para o nível de significância adotado (de 8,7 MPa para 9,7 MPa), contrariando trabalhos anteriores (MANN; WESCHE *apud* JOHN *et al.*, 1997) que reportaram a redução na resistência mecânica de matrizes de cimento de EAF com baixos teores de portlandita e altos teores de etringita em seus produtos hidratados.

5.3.2. CICLOS DE MOLHAGEM E SECAGEM

Os resultados das propriedades mecânicas e físicas estão apresentados respectivamente na **Figura 5.6** e na **Tabela 5-5**. Os ciclos atuaram de forma diferente em função da composição das matrizes.

O valor do MOR das matrizes EGCH com 12% dobrou após a aplicação dos ciclos, passando de 8,7 MPa para consideráveis 17 MPa, valor comparável aos reportados por outros pesquisadores (COUTTS; WARDEN, 1990; ZHU *et al.*, 1994). Deve-se destacar que ao contrário das polpas comerciais e cimento Portland empregados nos trabalhos citados, as fibras aqui são de origem residual e o cimento experimental à base de EAF.

A energia específica dessa formulação apresentou queda com o aumento da quantidade de ciclos, sendo reduzida à mais da metade (de 0,94 kJ/m² para 0,47 kJ/m²). Esta queda pode ser atribuída ao compromisso existente entre o aumento de uma das propriedades (MOR

ou tenacidade) em detrimento da outra. O valor do MOE passou de 3,8 GPa nos compósitos não envelhecidos para 5,8 GPa após os 40 ciclos.

Figura 5.6 – **Variação do módulo de ruptura e da energia específica dos compósitos com 12% não carbonatados em relação à quantidade de ciclos de envelhecimento aplicados.**

O aumento na resistência mecânica do compósito EGCH se deve, provavelmente, ao aumento do grau de hidratação propiciado pelos ciclos de elevada temperatura alternados com a exposição à umidade, especialmente porque a cura úmida durou apenas 7 dias.

O aumento no MOR não foi seguido de redução da porosidade da matriz (ver **Tabela 5-5**) e aumento da massa específica. Isto pode estar relacionado às dimensões de poros presentes no compósito EGCH e à distribuição percentual destas dimensões. São necessários estudos mais aprofundados sobre a estrutura interna desses compósitos.

Tabela 5-5 – **Variação das propriedades físicas dos compósitos 12% não carbonatados sob a ação dos ciclos molhagem e secagem**

Código mistura	Quantidade de ciclos	Absorção (%)	γ (g/cm³)	Porosidade (%)
EGCH	0	35,7 (0,7)	1,26 (0,02)	44,8 (0,4)
	10	35,8 (2,4)	1,21 (0,04)	43,4 (1,6)
	20	33,0 (3,3)	1,23 (0,04)	40,5 (3,0)
	40	36,3 (1,4)	1,23 (0,02)	44,7 (0,9)
ECP	0	25,2 (1,1)	1,42 (0,03)	35,6 (0,9)
	10	27,2 (0,9)	1,35 (0,03)	36,8 (0,7)
	20	25,8 (1,5)	1,38 (0,04)	35,4 (1,1)
	40	27,2 (0,9)	1,34 (0,01)	36,4 (0,8)

Na matriz ECP, a aplicação dos ciclos reduziu o MOR dos compósitos em 30% (de 12,5 MPa para 8,8 MPa). Esta redução no MOR foi seguida de redução considerável (0,74 kJ/m² para 0,13 kJ/m²) na energia específica do material. Observando a **Figura 5.7** percebe-se que ao contrário do ocorrido na matriz EGCH, onde a queda de tenacidade foi acompanhada do aumento do MOR, na ECP há uma relação direta entre a queda da resistência e de tenacidade, o que confirma que houve decomposição das fibras ou das interfaces. Houve manutenção dos valores de MOE (de 5,9 GPa para 6,1 GPa, dentro da variação do ensaio).

A redução de tenacidade observada pode ser atribuída ao ataque alcalino às fibras, indicando que a matriz ECP liberou hidróxido de cálcio em sua hidratação, o que possivelmente não ocorreu na matriz EGCH. A solubilização desses íons alcalinos durante os ciclos de imersão decompôs as fibras, reduzindo a sua capacidade de reforço, daí a redução simultânea das duas propriedades.

Figura 5.7 – **Relação entre a resistência à flexão e a tenacidade do compósito com 12% de fibras para diferentes níveis de hidratação.**

Pode-se concluir, então, que os ciclos se mostraram parcialmente eficientes sob o ponto de vista da tentativa de simular os agentes ambientais a que são submetidos os compósitos durante uso.

5.3.3. EFEITO CONJUNTO ENTRE A CABONATAÇÃO E OS CICLOS

Os resultados da variação do MOR e da tenacidade dos após os ciclos, para os compósitos carbonatados, estão apresentados na **Figura 5.8**.

Figura 5.8 – **Variação do módulo de ruptura e da energia específica dos compósitos com 12% carbonatados em relação à quantidades de ciclos de envelhecimento aplicados.**

Diferente do apresentado nos ciclos sem carbonatação, o compósito EGCH apresentou significativa queda na resistência mecânica de 9,7 MPa para 5,0 MPa, indicando que a carbonatação acelerada pode ter decomposto os produtos hidratados de forma similar ao ocorrido no envelhecimento natural. Da mesma forma, a tenacidade do material foi reduzida, passando de 1,05 kJ/m² para 0,83 kJ/m², indicando perda de capacidade de reforço das fibras.

Os resultados de porosidade, ao contrário do envelhecimento natural, não foram reduzidos. A explicação encontrada foi que não houve ação significativa de lixiviação do material carbonatado, uma vez que o pH da água de imersão registrou valores superiores a 12, limite de solubilidade do hidróxido de cálcio.

Tabela 5-6 – Variação das propriedades físicas dos compósitos 12% carbonatados sob a ação dos ciclos molhagem e secagem

Código mistura	Quantidade de ciclos	Absorção (%)	γ (g/cm ³)	Porosidade (%)	MOR (MPa)	Eesp (kJ/m ²)
EGCH	0	33,7 (1,4)	1,29 (0,04)	43,4 (1,0)	9,7	1,05
	10	31,9 (1,7)	1,30 (0,03)	41,4 (1,2)	5,0	0,71
	20	-	-	-	-	-
	40	34,1 (2,5)	1,26 (0,04)	42,8 (1,8)	5,4	0,83
ECP	0	20,8 (0,3)	1,51 (0,01)	31,3 (0,3)	14,8	0,64
	10	20,0 (0,6)	1,50 (0,02)	29,9 (0,5)	15,7	0,32
	20	19,9 (1,0)	1,48 (0,03)	29,3 (0,8)	14,9	0,33
	40	20,2 (1,3)	1,51 (0,04)	30,4 (1,4)	15,9	0,35

Os resultados do compósito ECP mostraram o efeito benéfico da carbonatação sobre os compósitos à base de matrizes mais alcalinas. Houve manutenção do MOR da formulação após a aplicação dos ciclos (ligeiro aumento de 14,8 MPa para 15,9 MPa, sem significância estatística), o que não ocorreu com os compósitos não carbonatados, que perderam resistência depois dos ciclos. Isto indica que a carbonatação pode ter estabilizado os álcalis presentes, não decompondo as fibras. A **Figura 5.9** resume os resultados.

Figura 5.9 – Comparação entre a variação do MOR dos compósitos 12% carbonatados e não carbonatados antes e após a aplicação dos ciclos.

Em relação à tenacidade do compósito ECP (**Figura 5.10**), os exemplares carbonatados mostraram uma redução menor na EE (em torno de 40%) quando comparados aos não

carbonatados (em torno de 80%), indicando a forte influência da integridade das fibras nesta propriedade, condicionada principalmente à alcalinidade do meio em que se encontra.

Figura 5.10 – **Comparação entre a variação da EE dos compósitos 12% carbonatados e não carbonatados antes e após a aplicação dos ciclos.**

Os resultados obtidos para carbonatação em conjunto com os ciclos são consistentes com os de envelhecimento natural, se mostrando mais eficiente e de acordo com as conclusões reportadas por AKERS; STUDINKA (1989). Também é evidente que os ciclos de envelhecimento devem iniciar após os compósitos atingirem um nível de hidratação que não interfira na avaliação final dos resultados.

5.4. COMPARAÇÃO DOS COMPOSITOS COM CIMENTO AMIANTO

O cimento amianto apresentou, na média, resultados melhores de resistência mecânica quando comparado às outras formulações com reforço de 12% de celulose (em torno de 22 MPa). Apenas no que tange à tenacidade, seus valores se situaram abaixo daqueles, pois as fibras de amianto possuem módulo de elasticidade superior às de celulose e menores capacidades de deformação, tornando o compósito mais frágil (MOE igual 15 GPa). Os resultados superiores aos do cimento-celulose também podem ser atribuídos à uniformidade na produção industrial e maior estágio de desenvolvimento do material.

Figura 5.11 – **MOR aos 28 dias dos compósitos de Cimento-amianto comparados ao cimento-celulose.**

Confirmando a tendência de produtos com cimento Portland convencional, a carbonatação provocou um aumento de até 20% (de 17,6 MPa para 21,6 MPa) no MOR desses compósitos, resultado similar ao observado na matriz ECP. A densificação da matriz foi confirmado pela redução de 30% na porosidade, com conseqüente aumento da massa específica e redução da absorção do material, conforme observado na **Tabela 5-7**.

Tabela 5-7 – **Variação das propriedades físicas do cimento-amianto sob a ação da carbonatação.**

Carbonatação	Absorção (%)	γ (g/cm ³)	Porosidade (%)
Não	21,1	1,66	34,9
Sim	13,6	1,84	25,1

O aumento no MOR, conseguido através do aumento na densificação da matriz também influenciou levemente a tenacidade do material, enrijecendo a interface fibra-matriz e conseqüentemente reduzindo a capacidade de deformação do compósito (**Figura 5.12**).

Figura 5.12 – Tenacidade aos 28 dias dos compósitos de Cimento-amianto comparados ao cimento-celulose.

Os valores de módulo de elasticidade do cimento-amianto também se mostraram acima dos resultados das matrizes com celulose, confirmando a maior rigidez do material. Os valores (em torno de 15 GPa) foram 2 vezes superiores às matrizes ECP e até 4 vezes acima da matriz EGCH.

Figura 5.13 – Tenacidade aos 28 dias dos compósitos de Cimento-amianto carbonatados e não carbonatados.

Não houve efeito do envelhecimento acelerado sobre as propriedades físicas e mecânicas do cimento-amianto. Os valores se mantiveram dentro da variabilidade dos ensaios e não houve significância estatística para o nível de confiabilidade adotado.

Tabela 5-8 – **Variação das propriedades físicas do cimento-amianto sob a ação dos ciclos molhagem e secagem**

Carbonatação	Quantidade de ciclos	Absorção (%)	γ (g/cm³)	Porosidade (%)
Não	0	21,1	1,66	34,9
	10	-	-	-
	20	23,3	1,57	36,7
	40	23,6	1,57	37,0
Sim	0	13,6	1,84	25,1
	10	14,9	1,83	27,0
	20	16,3	1,77	28,9
	40	17,3	1,74	30,0

5.5. RELAÇÃO ENTRE ENVELHECIMENTO NATURAL E ACELERADO

A **Figura 5.14** e **Figura 5.15** apresentam as tendências de variação nas propriedades mecânicas observadas nos compósitos após o envelhecimento natural e acelerado combinando carbonatação e ciclos de molhagem e secagem.

Confirmando as afirmações apresentadas no item 5.3.3 e as conclusões obtidas por AKERS; STUDINKA (1989), para ambos compósitos os ciclos combinados à carbonatação mostraram as mesmas tendências de variação no MOR observadas para o envelhecimento natural, indicando sua maior eficiência se comparado aos ciclos sem carbonatação.

Figura 5.14 – **Comparação entre as tendências observadas no MOR após o envelhecimento natural e acelerado com carbonatação para compósitos com 12% de fibras.**

No compósito ECP, no envelhecimento acelerado como no natural, o MOR se manteve constante, não apresentando variação significativa para o nível de significância adotado. Este comportamento diverge do observado no envelhecimento acelerado sem carbonatação, onde houve queda de MOR pela decomposição de fibras ou interface, indicando a importância do efeito da carbonatação acelerada na simulação dos efeitos naturais.

No compósito EGCH, o envelhecimento acelerado causou uma redução de aproximadamente 45% no MOR contra 49% de redução para o envelhecimento natural. Mais uma vez, a tendência observada foi divergente dos ciclos sem carbonatação, onde houve aumento de MOR pela hidratação progressiva do compósito.

Figura 5.15 – **Comparação entre as tendências observadas na tenacidade após o envelhecimento natural e acelerado com carbonatação para compósitos com 12% de fibras.**

A energia específica do compósito EGCH apresentou queda de 21% após o envelhecimento acelerado com carbonatação, contra 29% de redução após o natural. Como no caso do envelhecimento acelerado os corpos-de-prova já estão carbonatados no início do ensaio, a energia cai mais rapidamente que no natural, onde a carbonatação é mais lenta. No envelhecimento acelerado sem carbonatação, também houve queda de tenacidade. Entretanto esta tendência foi creditada à compensação pelo aumento do MOR.

No ECP, a energia reduziu 45% para o envelhecimento acelerado que combina molhagem e secagem com carbonatação, contra 30% no natural, valores mais próximos que a queda apresentada pelo envelhecimento acelerado sem carbonatação, de 82%.

Os 40 ciclos foram suficientes para simular os 9 meses de envelhecimento natural. No entanto, como a vida útil esperada para estes compósitos é significativamente superior, maiores números de ciclos devem ser empregados para estimação do comportamento a prazos mais extensos.

Capítulo VI

Conclusões e considerações finais

O estudo sistemático de fibras alternativas, destinadas à produção de compósitos reforçados em substituição ao cimento-amianto, se intensificou nos últimos anos, sobretudo nos países em desenvolvimento. As tecnologias avaliadas para substituição do cimento-amianto devem se concentrar em matérias-primas e processos adequados, pois precisam aliar custos da mesma ordem de grandeza dos empregados atualmente a soluções técnicas viáveis, para que não haja sucateamento da indústria nacional e para que os produtos desenvolvidos sejam compatíveis em durabilidade aos usados hoje em dia.

6.1. MÉTODO DE ENVELHECIMENTO ACELERADO

O método de envelhecimento acelerado, que combina ciclos de molhagem e secagem precedidos de carbonatação, simulou de forma eficiente os efeitos do ambiente externo sobre as propriedades dos compósitos. Os resultados se mostraram bastante similares aos observados no envelhecimento natural.

A carbonatação dos compósitos ocorreu de forma rápida devido à alta porosidade do material, constatando-se que aos 3 meses a carbonatação já estava completa. Estudos futuros poderiam contemplar medidas com mais frequência.

Juntamente com a evolução da carbonatação, a porosidade deve ser acompanhada, avaliando o efeito global da degradação na porosidade.

A carbonatação da matriz menos alcalina (EGCH) causou queda na resistência do compósito, pois decompôs produtos hidratados. A porosidade não aumenta como sugerido em trabalhos anteriores (MANN; WESCHE *apud* JOHN *et al.*, 1997), pois provavelmente o efeito da lixiviação não foi significativo devido à saturação do pH do meio, que não permitiu a completa solubilização dos produtos decompostos.

Na matriz mais alcalina ECP, a carbonatação preveniu a degradação por ataque alcalino, reduzindo o pH da matriz e conseqüentemente a decomposição de fibras. Ela não impediu a redução da tenacidade, entretanto minimizou esta conseqüência.

A quantidade de ciclos empregada foi suficiente para simular os efeitos da exposição natural de 9 meses de envelhecimento, período aquém da vida útil esperada para compósitos desta natureza, o que demandaria mais estudos, empregando maiores quantidades de ciclos e correlacionando-os a idades mais avançadas.

Os resultados obtidos pelo método foram negativamente influenciados pela baixa hidratação dos compósitos, devido ao pouco tempo de cura úmida empregado, o que, em especial para o EGCH, mascarou os resultados. Pesquisas futuras devem iniciar os ciclos após cura adequada a cada tipo de matriz.

6.2. FIBRAS DE CELULOSE

Os resultados das propriedades mecânicas obtidos com a adição de celulose foram compatíveis com reportados por outros pesquisadores da área. A adição de 2% de fibras mostrou pouco efeito na melhora do compósito. Os resultados apresentaram uma variabilidade grande, provavelmente devido à fragilidade do material e às micro-fissuras presentes, decorrentes do processo de produção.

A adição de 12 % de fibras elevou o MOR acima da tensão de ruptura da matriz, com grande incremento na tenacidade do compósito. No entanto, o módulo de elasticidade dos compósitos foi significativamente inferior ao do compósito com apenas 2% de fibras.

Mesmo após 9 meses de envelhecimento, o efeito das fibras permanece, sendo, entretanto, reduzido pela degradação da fibra e/ou da interface fibra-matriz.

As fibras alteraram as propriedades físicas da matriz, elevando significativamente a porosidade. O emprego de materiais de enchimento, inertes (pó calcário) ou ativos (microsílica), podem contribuir para a melhora nestas propriedades.

6.3. MATRIZES À BASE DE CIMENTO DE EAF

O uso de cimentos à base de EAF se mostrou viável para a produção de compósitos reforçados com fibras sensíveis à álcalis. Sua alcalinidade inferior à do cimento Portland o

credenciou para o desenvolvimento de fibrocimentos de desempenho adequado, pois o ataque às fibras foi menor que os reportados quando do emprego de cimento Portland.

A matriz EGCH é menos alcalina e seu desempenho em relação à degradação das fibras foi melhor. Sua hidratação, entretanto, é mais lenta, o que afetou a resistência mecânica às primeiras idades e também o envelhecimento acelerado. Ela apresentou queda de resistência devido a carbonatação e decomposição de seus produtos hidratados com posterior lixiviação. O elevado teor de gipsita pode ter influenciado nesta perda, sugerindo que menores teores devem ser empregados nos próximos estudos. A redução no teor de gipsita, provavelmente, acarretará menor velocidade de hidratação, demandando o emprego de cura especial.

A matriz ECP apresentou melhores resultados de resistência mecânica às primeiras idades, pois sua velocidade de hidratação foi maior. No ensaio acelerado sem carbonatação, sua alcalinidade decompôs as fibras e causou redução nas propriedades mecânicas. A carbonatação aumentou sua resistência mecânica com redução significativa da porosidade, diminuindo também sua alcalinidade e decompondo menos as fibras.

6.4. COMPARAÇÃO COM O CIMENTO-AMIANTO

O cimento-amianto apresentou resistência mecânica e módulo de elasticidade superiores ao cimento-celulose. Entretanto, os valores de tenacidade foram bastante inferiores, denotando seu comportamento frágil.

Ele não se mostrou sensível aos efeitos do envelhecimento acelerado, mantendo seu desempenho inalterado, como comprova a larga experiência no uso real do produto.

Os compósitos de cimento-celulose demonstraram potencialidades que os credenciam como alternativa à produção de fibrocimentos. Suas vantagens podem se traduzir em produtos com maior capacidade de deformação, maior absorção de impactos, menores custos estruturais (pela menor carga decorrente de materiais menos densos) e produtos finais com custo inferior.

6.5. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

O desenvolvimento do tema suscita dúvidas relativas a aspectos não abordados na pesquisa e que são importantes ao desenvolvimento dos produtos aqui estudados. Abaixo

são sugeridos assuntos, considerados relevantes para um melhor entendimento do comportamento físico e mecânico dos compósitos reforçados com celulose e para o desenvolvimento de uma metodologia de curto prazo que possa avaliar o desempenho ao longo do tempo destes materiais.

- Avaliação da influência da porosidade e da distribuição dos tamanhos dos poros nas propriedades físicas e mecânicas dos CRFC moldados pelo processo Hatscheck em escala laboratorial;
- Influência da carbonatação na microestrutura dos CRFC à base de matrizes EGCH;
- Aperfeiçoamento da metodologia para avaliação da durabilidade de CRFC através de ensaios acelerados baseada nas sugestões descritas na literatura;
- Avaliação de ativadores e teores adequados (como menor teor de gipsita) para matrizes de EAF destinadas à produção de CRFC;
- Estudo da influência do período e do tipo de cura no desempenho de CRFC;
- Emprego de maiores números de ciclos e exposição a períodos mais longos do material para avaliação da durabilidade do material em períodos compatíveis à sua vida útil.

Anexo A – Documentação fotográfica

Foto 01 - Fibra bruta como recebida da Aracruz Celulose.

Foto 02 - Fibra bruta pesada em sacos com 50g previamente à hidratação.

Foto 03 – Liquidificador usado para dispersão e hidratação das fibras.

Foto 04 – Vista superior da hidratação das fibras no liquidificador.

Foto 05 – Pasta após saída do liquidificador e antes de drenada.

Foto 06 – Vista da central intermediária de vácuo.

Foto 07 – Motor da bomba de vácuo.

Foto 08 – Detalhe da Pasta durante drenagem do excesso de água.

Foto 09 – Pasta celulósica depois de torcida.

Foto 10 – Pasta celulósica na argamassadeira para refino.

Foto 11 – Detalhe do refino das fibras na argamassadeira.

Foto 12 – Fibra úmida refinada e pronta para uso.

Foto 13 – Detalhe da fibra úmida refinada antes do uso.

Foto 14 – Escória de alto-forno granulada como recebida.

Foto 15 – Detalhe da escória de alto-forno granulada.

Foto 16 – Moinho de bolas usado para moagem da escória.

Foto 17 – Detalhe interno do moinho mostrando as esferas.

Foto 18 – Escória moída na finura de uso, 500 m²/kg.

Foto 19 – Detalhe da escória moída na finura desejada.

Foto 20 – Fibra já pesada no béquer com adição da água para mistura.

Foto 21 – Misturador de alta-rotação usada para mistura das matérias primas.

Foto 22 – Mistura dos materiais logo após adição do cimento.

Foto 23 – Detalhe da mistura fluída antes de transferida ao molde.

Foto 24 – Transferência da mistura para o molde já com papel filtro no fundo.

Foto 25 – Mistura fluída e com brilho na superfície antes do vácuo.

Foto 26 – Mistura com superfície opaca após primeiros 2 min de vácuo.

Foto 27 – Adensamento manual com soquete padronizado.

Foto 28 – Detalhe do adensamento manual observando a deflexão na placa.

Foto 29 – Placas empilhadas após retirada do molde e antes da prensagem.

Foto 30 – Equipamento empregado para prensagem das placas.

Foto 31 – Prensagem observando o detalhe da intercalação das chapas metálicas.

Foto 32 – Selagem dos sacos plásticos usados para cura úmida em ar saturado.

Foto 33 – Detalhe dos sacos selados para cura saturada dos CPs.

Foto 34 – Corte dos CPs após 7 dias de cura.

Foto 35 – Detalhe do corte dos CPs.

Foto 36 – Suporte usado para os CPs após o corte. Cura de mais 7 dias.

Foto 37 – Câmara usada para carbonatação dos corpos-de-prova.

Foto 38 – Banho-maria usado para simulação do envelhecimento dos CPs.

Foto 39 – Detalhe dos CPs dentro do banho-maria.

Foto 40 – CPs dentro da estufa usada para simulação do envelhecimento.

Foto 41 – Suportes para os CPs deixados no envelhecimento natural.

Foto 42 - Bancadas com inclinação de 30° e voltadas para o Norte

Foto 43 – Detalhe da exposição dos CPs ao envelhecimento natural.

Foto 44 – CPs dentro do dessecador antes dos ensaios físicos.

Foto 45 – Medição dos CPs para realização dos ensaios mecânicos.

Foto 46 – Ensaio de flexão dos CPs.

Foto 47 – Detalhe do ensaio de flexão. Vista do deflectômetro acoplado.

Foto 48 – Programa usado para aquisição dos dados. Vista das curvas.

Anexo B – Resultados e análise estatística

O anexo B apresenta, em tabelas, os resultados gerais do programa experimental, mostrando as médias, o desvio-padrão entre as amostras. A análise estatística é empregada como ferramenta para subsidiar as comparações entre as diversas médias. São feitas comparações múltiplas entre grupos de resultados, empregando o teste de Tukey.

A análise de variância (ANOVA) foi utilizada para aceitar ou não a hipótese de igualdade entre resultados ensaiados. O nível de significância adotada foi de 5%, indicando que são considerados diferentes os grupos cuja significância seja menor inferior a este valor.

Nas tabelas a seguir, são considerados pertencentes a um mesmo grupo homogêneo, aqueles resultados cujos asteriscos indicativos estejam na mesma vertical.

Tabela I – Fatores que influenciaram o MOR.

Anova
MOR

	Entre grupos			Dentro grupos			F	valor-p
	SQ	gl	MQ	SQ	gl	MQ		
IDADE	5,08E+05	17	2,99E+04	1,33E+06	305	4,35E+03	6,87160	0,00000
MATRIZ	1,86E+01	17	1,09E+00	6,19E+01	305	2,03E-01	5,39246	0,00000
%FIBRA	3,79E+03	17	2,23E+02	4,24E+03	305	1,39E+01	16,01288	0,00000
CARB	3,20E+01	17	1,88E+00	1,54E+02	305	5,04E-01	3,73578	0,00000
CICLOS	7,14E+03	17	4,20E+02	6,33E+04	305	2,08E+02	2,02212	0,01014

Tabela J – Fatores que influenciaram a tenacidade.

Anova
Tenacidade

	Entre grupos			Dentro grupos			F	valor-p
	SQ	gl	MQ	SQ	gl	MQ		
IDADE	2,99E+03	1	2,99E+03	1,83E+06	323	5,68E+03	0,52603	0,46881
MATRIZ	4,58E+00	1	4,58E+00	7,64E+01	323	2,37E-01	19,37078	0,00001
%FIBRA	5,13E+02	1	5,13E+02	7,55E+03	323	2,34E+01	21,96787	0,00000
CARB	3,18E+00	1	3,18E+00	1,84E+02	323	5,69E-01	5,59303	0,01862
CICLOS	1,35E+03	1	1,35E+03	6,98E+04	323	2,16E+02	6,25340	0,01289

Tabela K – Fatores que influenciaram o MOE.

Anova
MOE

	Entre grupos			Dentro grupos			F	valor-p
	SQ	gl	MQ	SQ	gl	MQ		
IDADE	1,28E+06	254	5,04E+03	5,86E+04	5	1,17E+04	0,43007	0,95659
MATRIZ	6,33E+01	254	2,49E-01	1,50E+00	5	3,00E-01	0,83086	0,69209
%FIBRA	6,01E+03	254	2,36E+01	1,00E+02	5	2,00E+01	1,18231	0,48164
CARB	1,36E+02	254	5,35E-01	5,00E+00	5	1,00E+00	0,53542	0,89957
CICLOS	5,52E+04	254	2,17E+02	1,30E+03	5	2,60E+02	0,83525	0,68904

Tabela L – Fatores que influenciaram a absorção.

Anova
Absorcao

	Entre grupos			Dentro grupos			F	valor-p
	SQ	gl	MQ	SQ	gl	MQ		
IDADE	1,39E+05	29	4,80E+03	1,76E+06	312	5,63E+03	0,85196	0,68902
MATRIZ	3,89E+01	29	1,34E+00	4,65E+01	312	1,49E-01	8,99523	0,00000
%FIBRA	5,33E+03	29	1,84E+02	3,20E+03	312	1,03E+01	17,89691	0,00000
CARB	3,58E+01	29	1,23E+00	1,60E+02	312	5,14E-01	2,40015	0,00012
CICLOS	8,71E+03	29	3,00E+02	6,55E+04	312	2,10E+02	1,43146	0,07417

Tabela M – Fatores que influenciaram a porosidade.

Anova
Porosidade

	Entre grupos			Dentro grupos			F	valor-p
	SQ	gl	MQ	SQ	gl	MQ		
IDADE	2,26E+05	27	8,36E+03	1,67E+06	314	5,32E+03	1,57022	0,03834
MATRIZ	4,17E+01	27	1,55E+00	4,37E+01	314	1,39E-01	11,09970	0,00000
%FIBRA	4,45E+03	27	1,65E+02	4,08E+03	314	1,30E+01	12,68827	0,00000
CARB	3,42E+01	27	1,27E+00	1,62E+02	314	5,15E-01	2,45933	0,00012
CICLOS	8,58E+03	27	3,18E+02	6,56E+04	314	2,09E+02	1,51983	0,05041

Tabela N – Influência do teor de fibras no MOR dos compósitos aos 28 dias.

Matriz	% de fibras	Média (MPa)	Desv padrão (MPa)	Grupos homogêneos ¹
EGCH	2	6,1	0,65	*
	12	8,7	0,57	*
ECP	2	5,0	0,6	*
	12	12,5	1,2	*

¹ : Asteriscos na mesma vertical indicam séries que compõem um único grupo homogêneo

Tabela O – Influência do teor de fibras na tenacidade dos compósitos aos 28 dias.

Matriz	% de fibras	Média (kJ/m2)	Desv padrão (kJ/m2)	Grupos homogêneos ¹
EGCH	2	0,07	0,01	*
	12	0,94	0,20	*
ECP	2	0,12	0,02	*
	12	0,94	0,18	*

¹ : Asteriscos na mesma vertical indicam séries que compõem um único grupo homogêneo

Tabela P – Influência do teor de fibras na porosidade dos compósitos aos 28 dias.

Matriz	% de fibras	Média	Desv padrão	Grupos homogêneos ¹
EGCH	2	38,4	0,9	*
	12	44,8	0,4	*
ECP	2	28,1	0,5	*
	12	35,6	0,9	*

¹ : Asteriscos na mesma vertical indicam séries que compõem um único grupo homogêneo

Tabela Q – **Influência do envelhecimento natural no MOR dos compósitos a diferentes idades.**

Matriz	Idade (meses)	Média (MPa)	Desv padrão (MPa)	Grupos homogêneos¹
EGCH	1	8,7	0,6	*
	3	8,1	0,7	*
	9	4,4	0,4	*
ECP	1	12,5	1,2	*
	3	14,2	2,8	*
	9	12,4	0,9	*

¹ : Asteriscos na mesma vertical indicam séries que compõem um único grupo homogêneo

Tabela R – **Influência do envelhecimento natural na tenacidade dos compósitos a diferentes idades.**

Matriz	Idade (meses)	Média (kJ/m2)	Desv padrão (kJ/m2)	Grupos homogêneos¹
EGCH	1	0,94	0,2	*
	3	-	-	
	9	0,66	0,08	*
ECP	1	0,74	0,18	*
	3	0,34	0,08	*
	9	0,52	0,05	*

¹ : Asteriscos na mesma vertical indicam séries que compõem um único grupo homogêneo

Tabela S – **Influência do envelhecimento natural no MOE dos compósitos a diferentes idades.**

Matriz	Idade (meses)	Média (GPa)	Desv padrão (Gpa)	Grupos homogêneos¹	
EGCH	1	3,8	0,9	*	
	3	3,1	0,8	*	*
	9	1,7	0,5		*
ECP	1	5,9	1,7	*	
	3	8,3	2,2		*
	9	5,1	0,5	*	*

¹ : Asteriscos na mesma vertical indicam séries que compõem um único grupo homogêneo

Tabela T – **Influência do envelhecimento natural na porosidade dos compósitos a diferentes idades.**

Matriz	Idade (meses)	Média	Desv padrão	Grupos homogêneos¹	
EGCH	1	44,8	0,4	*	
	3	45,0	0,8	*	
	9	47,4	2,0		*
ECP	1	35,6	0,9		*
	3	31,4	0,7		*
	9	32,8	1,6		*

¹ : Asteriscos na mesma vertical indicam séries que compõem um único grupo homogêneo

Tabela U – **Influência da carbonatação no MOR dos compósitos.**

Matriz	Carbonatado	Média (MPa)	Desv padrão (MPa)	Grupos homogêneos¹
EGCH	Não	8,7	0,6	*
	Sim	9,7	1,0	*
ECP	Não	12,5	1,2	*
	Sim	14,8	0,5	*

¹ : Asteriscos na mesma vertical indicam séries que compõem um único grupo homogêneo

Tabela V – **Influência da carbonatação na tenacidade dos compósitos.**

Matriz	Carbonatado	Média (kJ/m2)	Desv padrão (kJ/m2)	Grupos homogêneos¹
EGCH	Não	0,94	0,20	*
	Sim	1,05	0,20	*
ECP	Não	0,74	0,18	*
	Sim	0,64	0,06	*

¹ : Asteriscos na mesma vertical indicam séries que compõem um único grupo homogêneo

Tabela W – **Influência da carbonatação no MOE dos compósitos.**

Matriz	Carbonatado	Média (GPa)	Desv padrão (GPa)	Grupos homogêneos¹
EGCH	Não	3,8	0,9	*
	Sim	3,0	0,3	*
ECP	Não	5,9	1,7	*
	Sim	7,3	1,8	*

¹ : Asteriscos na mesma vertical indicam séries que compõem um único grupo homogêneo

Tabela X – **Influência da carbonatação na porosidade dos compósitos.**

Matriz	Carbonatado	Média	Desv padrão	Grupos homogêneos¹
EGCH	Não	44,8	0,4	*
	Sim	43,4	1,0	*
ECP	Não	35,6	0,9	*
	Sim	31,3	0,6	*

¹ : Asteriscos na mesma vertical indicam séries que compõem um único grupo homogêneo

Tabela Y – **Influência dos ciclos de envelhecimento acelerado no MOR dos compósitos não carbonatados.**

Matriz	Ciclos	Média (MPa)	Desv padrão (MPa)	Grupos homogêneos¹
EGCH	0	8,7	0,6	*
	10	16,5	1,3	*
	20	15,5	1,5	*
	40	17,0	1,3	*
ECP	0	12,5	1,2	*
	10	9,5	0,6	*
	20	10,7	1,5	*
	40	8,8	0,6	*

¹ : Asteriscos na mesma vertical indicam séries que compõem um único grupo homogêneo

Tabela Z – **Influência dos ciclos de envelhecimento acelerado na tenacidade dos compósitos não carbonatados.**

Matriz	Ciclos	Média (kJ/m2)	Desv padrão (kJ/m2)	Grupos homogêneos¹
EGCH	0	0,94	0,2	*
	10	0,59	0,1	*
	20	0,50	0,05	*
	40	0,47	0,05	*
ECP	0	0,74	0,18	*
	10	0,26	0,04	*
	20	0,17	0,03	*
	40	0,13	0,03	*

¹ : Asteriscos na mesma vertical indicam séries que compõem um único grupo homogêneo

Tabela AA – **Influência dos ciclos de envelhecimento acelerado no MOE dos compósitos não carbonatados.**

Matriz	Ciclos	Média (GPa)	Desv padrão (GPa)	Grupos homogêneos¹
EGCH	0	3,8	0,9	*
	10	5,4	0,5	*
	20	5,1	1,3	*
	40	5,8	0,9	*
ECP	0	5,9	1,7	*
	10	6,0	1,3	*
	20	6,7	1,0	*
	40	6,1	1,0	*

¹ : Asteriscos na mesma vertical indicam séries que compõem um único grupo homogêneo

Tabela BB – **Influência dos ciclos de envelhecimento acelerado na porosidade dos compósitos não carbonatados.**

Matriz	Ciclos	Média	Desv padrão	Grupos homogêneos¹
EGCH	0	44,8	0,4	*
	10	43,4	1,6	*
	20	40,5	3,0	*
	40	44,8	0,9	*
ECP	0	35,6	0,9	*
	10	36,8	0,7	*
	20	35,4	1,1	*
	40	36,4	0,8	*

¹ : Asteriscos na mesma vertical indicam séries que compõem um único grupo homogêneo

Tabela CC – **Influência dos ciclos de envelhecimento acelerado no MOR dos compósitos carbonatados.**

Matriz	Ciclos	Média (MPa)	Desv padrão (MPa)	Grupos homogêneos¹
EGCH	0	9,7	1,0	*
	10	5,0	0,8	*
	20	-	-	
	40	5,4	0,8	*
ECP	0	14,8	0,5	*
	10	15,7	0,7	*
	20	14,9	1,3	*
	40	15,9	1,6	*

¹ : Asteriscos na mesma vertical indicam séries que compõem um único grupo homogêneo

Tabela DD – **Influência dos ciclos de envelhecimento acelerado na tenacidade dos compósitos carbonatados.**

Matriz	Ciclos	Média (kJ/m2)	Desv padrão (kJ/m2)	Grupos homogêneos¹
EGCH	0	1,05	0,20	*
	10	0,71	0,19	*
	20	-	-	
	40	0,83	0,16	*
ECP	0	0,64	0,06	*
	10	0,32	0,05	*
	20	0,33	0,04	*
	40	0,35	0,05	*

¹ : Asteriscos na mesma vertical indicam séries que compõem um único grupo homogêneo

Tabela EE – **Influência dos ciclos de envelhecimento acelerado no MOE dos compósitos carbonatados.**

Matriz	Ciclos	Média (GPa)	Desv padrão (GPa)	Grupos homogêneos¹
EGCH	0	3,0	0,3	*
	10	2,8	0,8	*
	20	3,3	0,3	*
	40	2,02	0,7	*
ECP	0	7,3	1,8	*
	10	7,9	0,4	*
	20	6,7	1,0	*
	40	7,2	1,3	*

¹ : Asteriscos na mesma vertical indicam séries que compõem um único grupo homogêneo

Tabela FF – **Influência dos ciclos de envelhecimento acelerado na porosidade dos compósitos carbonatados.**

Matriz	Ciclos	Média	Desv padrão	Grupos homogêneos¹	
EGCH	0	43,4	1,0	*	
	10	41,4	1,2		*
	20	37,4	0,8		*
	40	42,8	1,8	*	*
ECP	0	31,3	0,3		*
	10	29,9	0,5		*
	20	29,3	0,8		*
	40	30,4	1,4		*

¹ : Asteriscos na mesma vertical indicam séries que compõem um único grupo homogêneo

Tabela GG – **Influência da carbonatação no MOR dos compósitos de cimento-amianto aos 28 dias.**

Carbonatação	Média (MPa)	Desv padrão (MPa)	Grupos homogêneos¹	
Não	17,62	0,82	*	
Sim	21,6	0,4		*

¹ : Asteriscos na mesma vertical indicam séries que compõem um único grupo homogêneo

Tabela HH – **Influência da carbonatação na tenacidade dos compósitos de cimento-amianto aos 28 dias.**

Carbonatação	Média (kJ/m²)	Desv padrão (kJ/m²)	Grupos homogêneos¹	
Não	0,36	0,03	*	
Sim	0,33	0,02	*	

¹ : Asteriscos na mesma vertical indicam séries que compõem um único grupo homogêneo

Tabela II – **Influência dos ciclos de envelhecimento acelerado no MOR dos compósitos de cimento-amianto não carbonatados.**

Ciclos	Média (MPa)	Desv padrão (MPa)	Grupos homogêneos¹	
0	17,6	0,8	*	
10	17,9	0,2	*	
20	19,2	0,9		*
40	20,4	0,7		*

¹ : Asteriscos na mesma vertical indicam séries que compõem um único grupo homogêneo

Tabela JJ – **Influência dos ciclos de envelhecimento acelerado na tenacidade dos compósitos de cimento-amianto não carbonatados.**

Ciclos	Média (kJ/m2)	Desv padrão (kJ/m2)	Grupos homogêneos¹	
0	0,36	0,03	*	
10	0,37	0,01	*	*
20	0,37	0,02	*	*
40	0,40	0,01		*

¹ : Asteriscos na mesma vertical indicam séries que compõem um único grupo homogêneo

Tabela KK – **Influência dos ciclos de envelhecimento acelerado no MOE dos compósitos de cimento-amianto não carbonatados.**

Ciclos	Média (GPa)	Desv padrão (Gpa)	Grupos homogêneos¹
0	13,9	1,4	*
10	12,7	2,6	*
20	12,7	1,0	*
40	13,3	1,0	*

¹ : Asteriscos na mesma vertical indicam séries que compõem um único grupo homogêneo

Tabela LL – **Influência dos ciclos de envelhecimento acelerado na porosidade dos compósitos de cimento-amianto não carbonatados.**

Ciclos	Média	Desv padrão	Grupos homogêneos¹
0	34,9	0,3	*
10	27,9	4,9	*
20	36,6	0,4	*
40	37,0	0,3	*

¹ : Asteriscos na mesma vertical indicam séries que compõem um único grupo homogêneo

Tabela MM – **Influência dos ciclos de envelhecimento acelerado no MOR dos compósitos de cimento-amianto carbonatados.**

Ciclos	Média (MPa)	Desv padrão (MPa)	Grupos homogêneos¹
0	21,6	0,4	*
10	22,0	1,3	*
20	21,5	0,8	*
40	20,7	1,3	*

¹ : Asteriscos na mesma vertical indicam séries que compõem um único grupo homogêneo

Tabela NN – **Influência dos ciclos de envelhecimento acelerado na tenacidade dos compósitos de cimento-amianto carbonatados.**

Ciclos	Média (kJ/m2)	Desv padrão (kJ/m2)	Grupos homogêneos¹
0	0,33	0,02	*
10	0,31	0,02	*
20	0,30	0,03	*
40	0,29	0,02	*

¹ : Asteriscos na mesma vertical indicam séries que compõem um único grupo homogêneo

Tabela OO – **Influência dos ciclos de envelhecimento acelerado no MOE dos compósitos de cimento-amianto carbonatados.**

Ciclos	Média (GPa)	Desv padrão (Gpa)	Grupos homogêneos¹
0	15,1	1,4	*
10	16,1	1,5	*
20	15,3	0,6	*
40	17,1	3,4	*

¹ : Asteriscos na mesma vertical indicam séries que compõem um único grupo homogêneo

Tabela PP – **Influência dos ciclos de envelhecimento acelerado na porosidade dos compósitos de cimento-amianto carbonatados.**

Ciclos	Média	Desv padrão	Grupos homogêneos¹
0	25,07	0,63	*
10	26,99	4,65	*
20	28,94	0,18	*
40	29,97	0,37	*

¹ : Asteriscos na mesma vertical indicam séries que compõem um único grupo homogêneo

Referências bibliográficas

AGÊNCIA ESTADO. **Amianto deve ser banido país até 2003**. São Paulo, 2001. (informação on-line obtida em: <http://www.estadao.com.br/ciencia//noticias/2001/mar/10/26.htm> no dia 10/03/2001)

AGOPYAN, V. Vegetable fibre reinforced building materials – developments in Brazil and other Latin American countries. **In:** Swamy, R. N., ed. **Natural fibre reinforced cement and concrete**. Glasgow, 1988.

_____. **Materiais reforçados com fibras para a construção civil nos países em desenvolvimento: o uso de fibras vegetais**. Tese (Livre docência). EPUSP, São Paulo, 1991.

AGOPYAN, V.; DEROLLE, A. Materiais de construção reforçados com fibras: uso do papel imprensa. **In:** Tecnologia de edificações. Divisão de edificações do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. São Paulo, 1988.

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. Durability evaluation of vegetable fibre reinforced materials. **Building research and information**. v. 20, n. 4, 1992.

AGOPYAN, V.; SAVASTANO Jr., H. Uso de materiais alternativos a base de fibras vegetais na construção civil: experiência brasileira. **In:** Seminário Iberoamericano de materiales fibrorreforzados, 1., y reunión proyecto PIP VIII.5 Cyted, 3., Cali. Universidade del Valle, Cali, 1997.

AKERS, S. A. S.; STUDINKA, J. B. Ageing behaviour of cellulose fibre cement composites in natural weathering and accelerated tests. **The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, v. 11, n. 2, p. 93-7, May 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland**– Determinação da massa específica. – NBR 6474, Rio de Janeiro, 1984.

_____. **Cimento Portland**– Determinação da resistência à compressão. – NBR 7215, Rio de Janeiro, 1991.

_____. **Cimento Portland e outros materiais em pó** -Determinação da área específica. – NBR 7224, Rio de Janeiro, 1984.

BAHIA. Centro de pesquisas e desenvolvimento (1982). **Utilização de fibras vegetais no fibrocimento e no concreto**. BNH, Rio de Janeiro, 1982.

BATTAGIN, A. F.; ESPER, M. W. **Contribuição ao conhecimento das propriedades do cimento Portland de alto-forno**. ABCP, São Paulo, 1988.

BENTUR, A.; AKERS, S. A. S. The microstructure and ageing of cellulose fibre reinforced cement composites cured in a normal environment. **The international journal of cement composites and lightweight concrete**, v. 11, n.2, May, 1989. p. 99-109.

CALDAS, A.; MELO NETO, A. A.; JOHN, V. M.; PIRES SOBRINHO, C. W. A. Tecnologias alternativas para habitação: o uso de cinzas residuais para produção de novos materiais e componentes construtivos. **In:** IV Congresso Internacional de gestão da qualidade na construção civil. GEQUACIL/POLI, Recife-PE, 2000.

CINCOTTO, M. A. Utilização de sub-produtos e resíduos na indústria da construção civil. **In: Tecnologia de edificações**. São Paulo, 1988.

CINCOTTO, M. A.; BATTAGIN, A. F.; AGOPYAN, V. **Caracterização de escória granulada de alto forno e seu emprego com aglomerante e agregado**. IPT, São Paulo, 1992.

CLINTON, W. J. **Federal acquisition, recycling and waste prevention** (Executive order 12873 of october 20, 1993).Federal regsiter, v. 58 n. 203, october 22, 1993.

COUTTS, R. S. P. High yield wood pulps as reinforcement for cement products. **Appita**, v. 39, n. 1, 1986a.

_____. "Sticks and stones...!!" **Forest products newsletter, CSIRO division of chemical and wood technology**, v. 2, n.1, 1986b.

_____. Wood fibre cement composites. **In:** Swamy, R.N., ed., Natural fibre reinforced cement and concrete. Glasgow, Blackie, 1988. p. 1-62.

_____. From forest to factory to fabrication. **In:** International Symposium on fibre reinforced cement and concrete, 4. E e FN Spon, London, 1992.

COUTTS, R. S. P.; NI, Y. Autoclaved bamboo pulp fibre reinforced cement. **Cement and concrete composites**, 1995.

COUTTS, R. S. P.; RIDIKAS, V. Refined wood fibre-cement products. **Appita**, v.35, n.5, march, 1982. p.395-400.

COUTTS, R. S. P.; WARDEN, P. G. Effect of compaction on the properties of air-cured wood fibre reinforced cement. **Cement and concrete composites**, v. 12, 1990. p. 151-6.

CURWELL, S.; COOPER, I. The implications of urban sustainability. **Building research and information**. v. 26, n. 1, 1998.

DELVASTO, S. A.; GUTIERREZ, R.; LOPEZ, M.M. **Como hacer tejas con fibra de fique**. Departamento de materiales de ingeniería – Universidad del Valle, 1995.

ENBRI. **Development of a framework for environmental assesement of building materials and components**. Mimeo, 1994.

EU (European Union). **Construction and demolition waste management practices and their economics impacts**. Report to DGXI European Comission, 1999.

FLAUZINO, V. D. **Durabilidade de materiais e componentes das edificações – Metodologias e suas aplicações no caso de pinturas externas e chapas onduladas de plástico**. Dissertação (Mestrado). EPUSP, São Paulo, 1983.

FIESP – FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DOS ESTADO DE SÃO PAULO. **CONSTRUBUSINESS - Habitação, Infra-estrutura e Geração de empregos**. São Paulo, 1999.

FOLHA DE SÃO PAULO. **Marta proíbe uso de amianto na construção civil em SP**. São Paulo, 2001. (informação on-line obtida em: <http://www.uol.com.br/folha/cotidiano/ult95u24638.shl> no dia 16/03/2001)

FORDOS, Z. Natural or modified cellulose fibres as reinforcement in cement composites. **In**: Swamy, R. N., ed. Natural fibre reinforced cement and concrete. Glasgow, Blackie, 1988.

GIANNASI, F.; THEBÁUD-MONY, A. Occupation exposures to asbestos in Brazil. **International journal of occupational and environmental health**. Philadelphia, 1997.

GRAM, H. E. Durability of natural fibres in concrete. **In:** Swamy, R.N., ed., Natural fibre reinforced cement and concrete. Glasgow, Blackie, 1988. p. 143-72

GRAM, H. E.; GUT, P. **Directives pour le controle de qualite**. St. Gallen, 1994.

GUIMARÃES, S. S. Vegetable fiber-cement composites **In:** International symposium on vegetable plants and their fibres as building materials, 2., Salvador. London, Chapman and Hall, 1990. p.98-107

HEINRICKS, H.; BERKENKAMP, R.; LEMPFER, K.; FERCHLAND, H. Global review of technologies and markets for building materials. **In:** Inorganic-bonded wood and fiber composite materials, Proceedings. Moscow, University of Idaho, 2000.

HERNÁNDEZ, J. F. M.; MIDDENDORF, B; GEHRKE, M.; BUDELMANN, H. Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: study of the reaction. Cement and Concrete Research, v. 28 n. 11. 1998.

HIGGINS, H. G. **Papers physics in Australia**. CSIRO Division of forestry and forest products, Melbourne, 1996.

ILLSTON, J. M. **Construction materials: their nature and behaviour**. Chapman & Hall, London, 1994.

JOHN, V. M. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. Tese (Doutorado). EPUSP, São Paulo, 1995.

_____. Pesquisa e desenvolvimento de mercado para resíduos. **In:** WORKSHOP: Reciclagem de resíduos como materiais de construção civil. **Anais**. São Paulo, 1996.

_____. Panorama sobre a reciclagem de resíduos na construção civil. **In:** Desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil. **Anais**. IBRACON, São Paulo, 1999.

_____. **Durabilidade de materiais, componentes e edifícios**. Dissertação (Mestrado). CPGEC/UFRGS, Porto Alegre/RS, 1987.

_____. Construção e desenvolvimento sustentável. **Qualidade na construção**. São Paulo, 2000a.

_____. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento.** Tese (Livre docência). EPUSP, São Paulo, 2000b.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. Materiais reforçados com fibras vegetais. **In:** Simpósio internacional sobre materiais reforçados com fibras para construção civil. EPUSP, São Paulo, 1993. p. 29-38.

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.

JOLICOEUR, C.; SIMARD, M. A.; TO, T. C.; SHARMAN, J.; ZAMOJSKA, R.; DUPUIS, M.; SPIRATOS, N.; DOUGLAS, E.; MALHOTRA, V. M. Chemical activation of blast-furnace slag: na overview and systematic experimental investigation. **Nd.**

JORNAL DA TARDE. **Marta deve decidir hoje se proíbe amianto.** São Paulo, 2001. (informação on-line obtida em: <http://www.jt.com.br/editorias/2001/03/16/ger784.html> no dia 16/03/2001)

LEACH, M. A.; BAUEN, A.; LUCAS, N. J. D. A systems approach to materials flow in sustainable cities: a case study of paper. **J. Environmental Planning and Management.** v. 40, n 6, p 705-723, 1997.

LEE, A. **O impacto da substituição do telhado de fibrocimento.** Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

MACHADO, A. T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria.** Dissertação (Mestrado). EPUSP, 2000.

MacVICAR, R.; MATUANA, L. M.; BALATINECZ, J. J. Aging mechanisms in cellulose fiber reinforced cement composites. **Cement and concrete composites,** v. 21, 1999. p. 189-96.

McKENZIE, A. W. **A guide to pulp evaluation.** CSIRO, 1994.

McKINSEY & COMPANY,; LEITÃO, M. **Produtividade no Brasil: a chave do desenvolvimento acelerado.** Campus, Rio de Janeiro, 1999.

MARCIANO, E.; KIHARA, Y. Looking green. **World cement.** 1997.

MARIKUNTE, S.; SOUROSHIAN, P. Statistical evaluation of long-term durability characteristics of cellulose fiber reinforced cement composites. **ACI materials journal**, v.91, n.6, nov-dec, 1994. p.607-16.

NEVES, C. M. M. **Comportamento de argamassa celulósica e avaliação de seus efeitos na qualidade ambiental**. Dissertação (mestrado). UFBA. Salvador, 2000.

NOLASCO, A. M.; SOFFNER, M. L. A. P.; NOLASCO, A. C. Physical-mechanical characterization of banana fiber – *Musa cavendishii*, cultivar nanicão. **In:** International symposium on natural polymers and composites – ISNaPol 98. Unesp/EMBRAPA/USP, São Carlos, 1998.

OLIVEIRA, C. T. A. **Água do poro de pastas cimento de escória**. Tese (Doutorado). EPUSP, São Paulo, 2000.

RONGXI, S. Current status, trends of world fibre-cement industry and its impact on China fibre-cement industry. **In:** National fibre-cement technology, standards and information conference. Proceedings, Beijing, 1995.

SAVASTANO Jr., H. **Fibras de coco em argamassas de cimento Portland para produção de componentes de construção civil**. Dissertação (Mestrado). EPUSP, São Paulo, 1987.

_____. **Zona de transição entre fibras pasta de cimento Portland: caracterização e inter-relação com as propriedades mecânicas do compósito**. Tese (Doutorado). EPUSP, São Paulo, 1992.

_____. **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.

SAVASTANO Jr, H.; JOHN, V. M.; FERREIRA, O. P. Weathering of vegetable fibre-clinker free cement composites. **In:** Materials and structures. RILEM, 2002. v. 35, p. 64-68.

SAVASTANO Jr., H.; MABE, I.; DEVITO, R. A. Fiber cement based composites for civil construction. **In:** International symposium on natural polymers and composites – ISNaPol 98. Unesp/EMBRAPA/USP, São Carlos, 1998.

SAVASTANO Jr., H.; WARDEN, P. G.; COUTTS, R. S. P. Ground iron blast furnace slag as a matrix for cellulose-cement materials. **Cement and concrete composites**, v. 23, 2001a. p. 389-397.

SAVASTANO Jr., H.; WARDEN, P. G.; COUTTS, R. S. P. Performance of low-cost vegetable fibre-cement composites under weathering. **In:** CIB World building congress. Wellington, New Zealand, 2001b.

SAXENA, M.; MORCHALE, R. K.; MESHRAM, A. N.; KHAZANCHI, A. C. Development of sisal cement composites as substitute for asbestos cement components for roofing. **In:** International symposium on fibre reinforced cement and concrete, Sheffield, 1992.

SOUROSHIAN, P.; SHA, Z.; WON, J. P.; HSU, J.W. Durability and moisture sensitivity of recycled wastepaper-fiber-cement composites. **Cement and concrete composites**, v. 16, 1994. p. 111-28.

SOUROSHIAN, P.; MARINKUTE, S.; WON, J. P. Statistical evaluation of mechanical and physical properties of cellulose fiber reinforced cement composites. **ACI Materials journal**, v. 92, n.2, 1995.

SOUROSHIAN, P.; SHA, Z.; WON, J. P. Aging effects on the structure and properties of recycled wastepaper-fiber-cement composites. **Materials and structures/Materiaux et constructions**, 29, 1996.

SOUZA, R. **A contribuição do conceito de desempenho para a avaliação do edifício e suas partes: aplicação às janelas de uso habitacional**. Dissertação (Mestrado). EPUSP, São Paulo, 1983.

SILVA, M. G. **Influência da cura térmica em pastas e argamassas de cimentos de escória de alto-forno**. Tese (Doutorado). EPUSP, São Paulo, 1998.

SWAMY, R. N. Vegetable fibre reinforced cement composites- a false dream or a potential reality? **In:** International symposium on vegetable plants and their fibres as building materials, 2., Salvador. London, Chapman and Hall, 1990.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. London. Thomas Telford, 2ed, 1997.

THE ECONOMIST. **All that remains – A survey of wastes and enviroment.** May, 29th, 1993.

VALLE, C. E. **Qualidade ambiental: o desafio de ser competitivo protegendo o meio ambiente.** São Paulo, 1995.

VAN VLACK, L. H. **Princípios de ciência dos materiais.** Editora Edgard Blücher, São Paulo, 1970.

ZHU, W. H. **Utilisation of banana fibre in composite materials.** Dissertation (Master Thesis). Victoria University of technology, Melbourne, 1993.