UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

VIABILIDADE DO USO DO RESÍDUO DA FABRICAÇÃO DO PAPEL EM ARGAMASSAS

Vinícius Donizetti Lepri Lébeis

Orientador: Prof. Dr. Vladimir Antonio Paulon

Campinas, SP
2003

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
DEPARTAMENTO DE CONSTRUÇÃO CIVIL

VIABILIDADE DO USO DO RESÍDUO DA FABRICAÇÃO DO PAPEL EM ARGAMASSAS

Vinícius Donizetti Lepri Lébeis

Orientador: Prof. Dr. Vladimir Antonio Paulon

Dissertação de Mestrado apresentado à Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Edificações.

Campinas, SP

2003

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
DEPARTAMENTO DE CONSTRUÇÃO CIVIL

VIABILIDADE DO USO DO RESÍDUO DA FABRICAÇÃO DO PAPEL EM ARGAMASSAS

Vinícius Donizetti Lepri Lébeis

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

Prof. Dr. Vladimir Antonio Paulon
Presidente e Orientador/FEC-UNICAMP

Prof. Dr. Vítor Antonio Ducatti
FEC-UNICAMP

Pesq[a]. Dr[a]. Nádia Segre
IQ-UNICAMP

Campinas, 27 de Fevereiro de 2003

Dedicatória

Aos meus pais e às minhas irmãs, que com tanto amor, amizade e dedicação, fizeram desta família, não apenas um motivo de orgulho, mas um exemplo para os que aqui estão, e para os que ainda virão.

Agradecimentos

Ao amigo e companheiro, ***Prof. Vladimir Antonio Paulon****, que fez com que a orientação para este trabalho se tornasse uma extensão do vínculo afetivo que nos une. Alguns momentos difíceis ocorreram durante esta empreitada, e seus conhecimentos, sua ajuda e compreensão foram fundamentais para que este trabalho pudesse ser realizado.*

Aos ***demais professores*** *da FEC/UNICAMP, e aos amigos e companheiros de curso, pelos ensinamentos e apoio.*

Aos técnicos do laboratório de materiais da FEC/UNICAMP, ***Ademir e Marçal****, que não mediram esforços para que os ensaios necessários ao trabalho fossem realizados.*

Ao laboratório da ***Profa. Inês Joekes****, no IQ/UNICAMP, em especial à técnica* ***Dircilei de Fátima Maciel*** *e à* ***Nádia Segre****, que tanto ajudaram nos ensaios de caracterização do resíduo.*

Ao Engenheiro ***Alberto Orignella Lupetti*** *da MD PAPÉIS, pelo grande apoio e atenção dispensados.*

Aos que aqui não foram citados, mas que de alguma maneira colaboraram, ficam aqui meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

	Página
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xii
Lista de Abreviações	xiv
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Conteúdo	2
2 OBJETIVOS	4
3 OS RESÍDUOS SÓLIDOS	5
4 O RESÍDUO RESULTANTE DA PRODUÇÃO DE PAPEL	10
4.1 A Indústria do papel	10
4.2 O resíduo proveniente da fabricação do papel	14
5 O CAULIM	18
6 A CELULOSE	27
6.1 As fibras vegetais na indústria	29
6.2 As fibras vegetais em matrizes de cimento	34
7 METODOLOGIA	38
7.1 Caracterização do resíduo	42
7.1.1 Caracterização química	42
7.1.2 Caracterização física	42
7.2 Materiais e dosagem	43
7.3 Corpos-de-prova	44
7.3.1 Escolha dos traços	44

7.3.1.1 Compósito Tipo 1 (CPT1) – argamassa de cimento..... 44
7.3.1.2 Compósito Tipo 2 (CPT2) – argamassas de revestimento..... 45
7.4 Ensaio de resistência à compressão axial 46
7.5 Ensaio de resistência à tração na compressão diametral 47
7.6 Determinação da absorção de água por capilaridade 49
7.7 Determinação da resistência de aderência à tração..... 51
7.8 Verificação do comportamento da argamassa de revestimento em um painel de alvenaria..... 53
8 RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES..... 54
8.1 Caracterização química do resíduo..... 54
8.1.1 Observação da amostra..... 54
8.1.2 Teor de umidade da amostra..... 55
8.1.3 Calcinação da amostra..... 56
8.1.4 Caracterização por infravermelho..... 56
8.2 Caracterização física do resíduo..... 60
8.2.1 Determinação da umidade do resíduo..... 60
8.2.2 Determinação da massa específica pelo frasco de Chapman..... 62
8.3 Ensaios dos Compósitos Tipo 1 (CPT1) – Argamassa de cimento..... 63
8.3.1 Resistência à compressão simples..... 63
8.3.2 Resistência á tração na compressão diametral..... 69
8.3.3 Ensaio de absorção de água por capilaridade..... 71
8.4 Ensaios dos Compósitos Tipo 2 (CPT2) - Argamassa de revestimento..... 74
8.4.1 Resistência à compressão simples..... 74
8.4.2 Resistência à tração na compressão diametral..... 76
8.4.3 Resistência de aderência à tração..... 77
8.4.3.1 Seqüência 1 – Argamassa aplicada sem chapisco..... 78
8.4.3.2 Seqüência 2 – Argamassa aplicada com chapisco..... 80
8.5 Análise da argamassa de revestimento aplicada em painel de alvenaria..... 82
8.6 Considerações finais 86
9 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... 87
10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 90

11 ANEXOS 97

Anexo A – dosagens utilizadas nas argamassas de cimento 98

Anexo B – dosagens utilizadas nas argamassas de revestimento 99

Lista de Figuras

		Página
4.1	Desenho esquemático de uma máquina de papel Fourdrinnier... (Fonte: Fardim, 2002).....	12
4.2	Tanque de tratamento primário de flotação do resíduo resultante da fabricação do papel.....	14
4.3	Prensagem e forma final do resíduo resultante da fabricação do papel.....	15
5.1	Processo a seco para produção de caulim (Fonte: Lima, 1991).....	19
5.2	Processo a úmido de caulim para cobertura e carga (Fonte: Lima, 1991).....	20
5.3	Distribuição discreta de tamanho de partículas (Fonte: GEROTTO et al, 2000.....	24
5.4	Resistência à compressão axial em função da idade das amostras (Fonte: OSMANLIOGLU,2002).....	26
6.1	Forma estrutural da celulose (Fonte: SPROUSE COLLECTION OF INFRARED SPECTRA, 1987).....	28
6.2	Fibra de madeira; representação das paredes celulares (Fonte: PIRES et al, 1988).....	28
7.1	Esquema da solicitação de carga axial no corpo-de-prova.....	47
7.2	Disposição do corpo-de-prova no ensaio de tração.....	48
7.3	Esquema do ensaio de absorção de água por capilaridade.....	50
7.4	Esquema do ensaio da resistência de aderência à tração.....	51
7.5	Formas de ruptura na determinação da resistência de aderência à tração.....	52
8.1	Micrografias da amostra do resíduo.....	55

8.2 Espectro no infravermelho da amostra do resíduo, após seco em estufa à 100^{o} C..... 57
8.3 Espectro no infravermelho da alfa-celulose (pureza 99,5%) da literatura, obtido por pastilha de KBr. (Fonte: SPROUSE COLLECTION OF INFRARED SPECTRA, 1987)..... 57
8.4 Espectro no infravermelho da argila caulim da literatura (Fonte: NYQUIST R.A. & KAGEL R.O., 1971)..... 58
8.5 Espectro no infravermelho do resíduo, após calcinado à 300^{o} C..... 58
8.6 Espectro no infravermelho do resíduo, após calcinado à 400^{o} C..... 59
8.7 Espectro no infravermelho do resíduo, após calcina à 500^{o} C..... 59
8.8 Secador infravermelho IRP-150..... 60
8.9 Frascos de Chapman utilizados nos ensaios de determinação da massa específica..... 63
8.10 Resistência à compressão axial em função da idade da amostra (CPT1)..... 64
8.11 Resistência à compressão axial aos 28 dias em função da % de adição (CPT1)..... 64
8.12 Corpos-de-prova capeados para os ensaios de resistência à compressão axial. 68
8.13 Equipamento utilizado para a determinação da resistência à compressão axial 68
8.14 Resistência à tração na compressão em função da idade da amostra (CPT1)... 69
8.15 Resistência à tração na compressão aos 28 dias em função da % de adição(CPT1)..... 70
8.16 Absorção de água por capilaridade após 24 h, aos 28 dias de idade..... 71
8.17 Altura de ascensão capilar após 24 h, aos 28 dias de idade 72
8.18 Resistência à compressão axial aos 28 dias em função da % de adição (CPT2)..... 75
8.19 Resistência à tração na compressão aos 28 dias em função da % de adição (CPT2)..... 76
8.20 Corpos-de-prova para os ensaios de resistência de aderência à tração (CPT2) 78
8.21 Descolamento dos revestimentos nos blocos..... 79
8.22 Descolamento do revestimento antes dos ensaios..... 79
8.23 Descolamento do revestimento com a utilização da serra de copo..... 79

8.24 Desenho esquemático do método utilizado para o ensaio de aderência..... 80
8.25 Ruptura na interface revestimento/substrato..... 81
8.26 Ruptura na argamassa de revestimento..... 81
8.27 Momento da aplicação da argamassa de revestimento no painel de alvenaria. 83
8.28 Painel de alvenaria ao término da aplicação da argamassa de revestimento.... 83
8.29 Painel de alvenaria após 24 horas do término da aplicação da argamassa de revestimento..... 84
8.30 Painel de alvenaria após 53 dias da aplicação da argamassa de revestimento.. 85
8.31 Foto ampliada da argamassa de revestimento aos 53 dias..... 85

Lista de Tabelas

		Página
4.1	Dados da produção de papel e respectivo resíduo no Brasil (Fonte: BRACELPA, 2002)	15
5.1	Produção e reservas mundiais de caulim (Fonte: Sumário Mineral Brasileiro – DNPM, 2000).....	21
5.2	Análises típicas de caulins brasileiros para cobertura de papel (Fonte: LUZ, 2000).....	23
6.1	Dimensão das fibras (Fonte: KUAN et al, 1988).....	30
6.2	Tipo de fibra e processo empregado para obtenção das pastas (Fonte: KUAN et al, 1988).....	32
7.1	Traços experimentais dos compósitos Tipo 1	45
7.2	Seqüência, tempo e velocidade de mistura dos compósitos Tipo 1.....	45
7.3	Traços experimentais dos compósitos Tipo 2.....	46
7.4	Seqüência, tempo e velocidade de mistura dos compósitos Tipo 2.....	46
8.1	Ensaios do teor de umidade do resíduo.....	61
8.2	Determinação da massa específica do resíduo.....	62
8.3	Resultados dos ensaios da resistência à compressão axial aos 3 dias (CPT1).....	65
8.4	Resultados dos ensaios da resistência à compressão axial aos 7 dias (CPT1).....	66
8.5	Resultados dos ensaios da resistência à compressão axial aos 28 dias (CPT1)...	67
8.6	Resultados dos ensaios da resistência à tração na compressão aos 28 dias (CPT1).....	70
8.7	Resultados dos ensaios de absorção capilar aos 28 dias (M1).....	72
8.8	Resultados dos ensaios de absorção capilar aos 28 dias (M2).....	73

8.9 Resultados dos ensaios de absorção capilar aos 28 dias (M3)..... 73
8.10 Resultados dos ensaios de absorção capilar aos 28 dias (M4)..... 74
8.11 Resultados dos ensaios da resistência à compressão axial aos 28 dias (CPT2)... 75
8.12 Resultados dos ensaios da resistência à tração na compressão aos 28 dias (CPT2)..... 77
8.13 Médias das resistências obtidas nos ensaios de resistência de aderência à tração..... 81
8.14 Resultados dos ensaios da resistência à tração na compressão aos 28 dias (CPT2)..... 82

Lista de Abreviações

ABNT = Associação Brasileira de Normas Técnicas

a/c = relação água/cimento

a/g = relação água/aglomerante

Al_2O_3 = Alumina

BRACELPA = Associação Brasileira dos Produtores Brasileiros de Papel e Celulose

CPII-F = Cimento Portland composto com filler

Cps = Corpos-de-prova

CPT1 = compósitos tipo 1

CPT2 = compósitos tipo 2

H_2O = Água

PVA = Acetato de polivinila

SiO_2 = Sílica

RESUMO

LÉBEIS, Vinícius D. Lepri. **Viabilidade do Uso do Resíduo da Fabricação do Papel em Argamassas.** Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 99 p. Dissertação de Mestrado.

Este trabalho tem como objetivo avaliar a possibilidade de aproveitamento na construção civil do resíduo resultante do processo de produção do papel no Brasil, visando minimizar o impacto ambiental e diminuir os custos de acondicionamento do resíduo através da sua utilização como adição em argamassas de cimento e de revestimento.

Para isso, foram desenvolvidos experimentos para caracterizar o resíduo e determinar as propriedades mecânicas dos compósitos com a sua adição, através de ensaios de resistência à compressão simples, de resistência à de tração por compressão diametral, e ensaios de absorção de água por capilaridade nas argamassas de cimento. Além disso, também foram realizados ensaios para determinar a resistência de aderência à tração das argamassas de revestimento e uma avaliação geral da sua aplicação em um painel de alvenaria de vedação.

Os resultados obtidos indicaram que a adição de 5% a 10 % de resíduo, para as relações água/aglomerante utilizadas, promove melhorias ou manutenção das propriedades mecânicas dos compósitos, e a absorção de água por capilaridade na argamassa de cimento sofre um pequeno acréscimo. Assim, os resultados obtidos permitem concluir que existe viabilidade técnica da utilização do resíduo da fabricação do papel em argamassas.

Palavras-Chave: resíduos, celulose, argamassa, caulim, adição.

ABSTRACT

LÉBEIS, Vinícius D. Lepri. **Viability of the use of residue from a paper-mill in mortars.** Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 99 p. Dissertação de Mestrado.

The purpose of this work was to evaluate the use of the residue resulting from a paper-mill in Brazil as addition in mortars, in order to minimize the environmental impact and to reduces the residue discard costs.

Experiments were performed to characterize the residue and to determine the mechanical properties of the composite. Simple compression, tensile strength for diametrical compression, and water absorption were made in the cement mortars containing the residue. Besides, experimental tests were also accomplished to determine the adherence tensile strength and to obtain a general evaluation of the application of this composite as a coating material.

The results indicated that the use of 5% to 10% of the residue as addition, increases or preserves the mechanical properties of the composites. The water absorption in the cement mortar showed a small increment. The overall results allows to conclude that the use of this residue as addition is promising for civil engineering applications.

Key words: residues, cellulose, mortar, kaolin, addition.

1 INTRODUÇÃO

A legislação ambiental tem se tornado mais restritiva dia após dia, tornando cada vez mais onerosos os custos de tratamento e de descarte dos resíduos industriais que, posteriormente, são repassados indiretamente ao consumidor através de impostos ou diretamente nos preços dos produtos.

Além disso, como o atendimento a padrões rígidos de controle ambiental se tornou item obrigatório nas certificações de qualidade, que por sua vez são exigidas como condição para a exportação dos seus produtos, as indústrias buscam soluções que atendam as legislações ambientais e, ao mesmo tempo tornem seus produtos competitivos no mercado.

Portanto, a utilização dos resíduos sólidos industriais como matéria-prima e sua transformação em produtos que possam ser comercializados ou que se mostrem economicamente viáveis, se apresenta como uma opção interessante tanto para as empresas que deles se descartam, como para o meio ambiente.

Diante dessas considerações, busca-se neste trabalho de pesquisa uma opção para a utilização do resíduo sólido industrial resultante da produção do papel como adição em argamassas, em função das suas características químicas, físicas e toxicológicas.

No Brasil, apesar da riqueza quantitativa e qualitativa de matérias-primas para a produção de materiais de construção, seus custos são elevados, o que pode ser explicado pelo alto consumo de energia na produção e no transporte, e também na forma oligopolista de parte de

parte do setor produtivo, contribuindo para que a população de baixa renda tenha dificuldade de acesso à moradia.

Dados do IBGE do ano 2000 apontam para um déficit aproximado de 6,5 milhões de moradias, das quais 87,8% referem-se à parcela da população com rendimentos de até 3 salários mínimos. No estado de São Paulo, o déficit está estimado em aproximadamente 700 mil unidades, sendo que 90% correspondem à parcela da população com rendimentos de até 3 salários mínimos. Essa ordem de grandeza do déficit habitacional brasileiro, mostra a necessidade da aplicação de recursos em pesquisas de materiais que possam contribuir para diminuir o custo da construção de habitações de interesse social e que ao mesmo tempo se apresentem como uma alternativa durável e tecnicamente compatível com essa parcela da população.

Portanto, visando minimizar o impacto ambiental, diminuir os custos do descarte do resíduo resultante do processo de fabricação do papel, este trabalho de pesquisa busca a geração de conhecimentos científicos com a finalidade do aproveitamento do resíduo como uma matéria-prima na construção de baixo custo.

1.1 Conteúdo

O capítulo 2º descreve o objetivo geral e os objetivos específicos que este trabalho de pesquisa buscou para verificar a viabilidade do uso do resíduo resultante do processo de fabricação do papel no Brasil.

A questão dos resíduos sólidos está se tornando cada vez mais problemático para as indústrias e para a sociedade como um todo, devido principalmente ao comprometimento do meio ambiente. Devido a isso, o capítulo 3º dá uma visão geral dos resíduos sólidos, suas definições, os mais perigosos e a classificação dos mesmos pela norma brasileira. Além disso o

capítulo discorre sobre o potencial da utilização dos resíduos na construção civil, e relata alguns resultados obtidos com a incorporação de resíduos sólidos em compósitos a base de cimento.

Mais especificamente, o capítulo 4º apresenta um resumo do processo de fabricação, as matérias-primas utilizadas na produção e em quais propriedades os componentes básicos influenciam para a obtenção de um papel que atenda as necessidades do mercado. Além disso é feita uma pequena síntese do processo de geração do resíduo.

No capítulo 5º, são apresentadas as principais características do caulim e a sua importância para a indústria no processo produtivo do papel. Além disso, são apresentados dados das reservas e da produção do caulim no Brasil e no mundo, e o potencial da sua utilização em compósitos de cimento.

O capítulo 6º discorre sobre a fibra de celulose, suas principais características e variações, a forma de obtenção da polpa, e sua utilização na indústria do papel. Neste capítulo é feita também uma revisão da literatura com relação ao uso de fibras vegetais em compósitos de cimento.

Passa-se então ao capítulo 7º, onde são apresentadas as metodologias para a verificação das características químicas e físicas do resíduo e o seu comportamento como adição em compósitos de cimento.

A seguir, no capítulo 8º, são apresentados os resultados obtidos nos experimentos e são feitas algumas considerações.

Por último, segue o capítulo 9º, com a conclusão e sugestões para o prosseguimento dos estudos.

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral verificar a viabilidade inicial da utilização do resíduo sólido resultante do processo de fabricação da indústria M.D. Papéis Ltda. em argamassas de cimento e de revestimento. Foram assim definidos os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar o resíduo em questão nos seus aspectos físico e químico;
- desenvolver compósitos formados pelo resíduo, cimento, areia média e superplastificante, designados como Tipo 1 (argamassas de cimento);
- desenvolver compósitos formados pelo resíduo, cimento, areia média e cal, designados como Tipo 2 (argamassas de revestimento);
- determinar as propriedades mecânicas nos compósitos Tipo 1, através dos ensaios de compressão simples e de tração na compressão diametral;
- determinar a absorção de água por capilaridade nos compósitos Tipo 1;
- determinar as propriedades mecânicas dos compósito Tipo 2, através dos ensaios de compressão simples e de tração na compressão diametral;
- determinar a propriedade mecânica com relação à resistência ao arrancamento dos compósitos Tipo 2;
- avaliar o comportamento de um dos compósitos Tipo 2, aplicando-o como argamassa de revestimento em um painel de alvenaria de vedação;

3 OS RESÍDUOS SÓLIDOS

Os resíduos sólidos podem ser definidos como os restos das atividades humanas, sejam elas domésticas, comerciais, industriais ou de serviços e que são considerados como inúteis, indesejáveis ou descartáveis. São os resíduos da manufatura, construção, preparo de alimentos, recreação, agricultura e outras atividades que usam os materiais e então deles se descartam. Normalmente apresentam-se sob estado sólido, semi-sólido ou semilíquido

SEWELL (1978) define os resíduos sólidos como o conjunto dos produtos indesejados e não aproveitados das atividades humanas, que não devem fluir diretamente para os rios ou se elevar imediatamente para o ar.

Face as constantes pesquisas e a evolução tecnológica, o momento em que algo modifica um material útil e o transforma realmente em um resíduo, é cada vez mais relativo. Por exemplo, um plástico que hoje é usado para produzir uma embalagem para alimentos, amanhã poderá se transformar num resíduo da sociedade de consumo ou ser reciclado e voltar a ter uma aplicação nobre. Esse momento está diretamente relacionado com os custos da reciclagem ou do reaproveitamento dos resíduos, contra os custos do descarte, que incluem os custos da mão-de-obra, transporte, energia e comprometimento do bem-estar e do meio-ambiente.

Os resíduos quando não tratados ou descartados na natureza adequadamente, podem ser vetores de transmissão de doenças e de comprometimento de mananciais, além da poluição do solo ou do ar. Geralmente, os descartes dos resíduos são feitos nos aterros em áreas próximas aos

centros urbanos, causando a deterioração do espaço, a degradação da paisagem urbana, e o comprometimento do valor das propriedades vizinhas.

Por tudo isso, existe uma dificuldade natural da sociedade em aceitar os aterros de resíduos sólidos nas proximidades dos seus lares, além do que os mesmos podem ocupar espaços valiosos nas áreas urbanas, onde o custo do solo tende a ser alto.

Normalmente, os resíduos são definidos segundo sua origem e classificados em resíduos urbanos e resíduos especiais de acordo com o seu risco em relação ao homem e ao meio ambiente.

Os resíduos urbanos, também conhecidos como lixo doméstico, são aqueles gerados nas residências, no comércio ou em outras atividades desenvolvidas nas cidades. Nestes resíduos encontram-se papéis, papelões, vidros, latas, plásticos, trapos, folhas, galhos e terra, restos de alimentos, madeira e todos os outros detritos apresentados à coleta nas portas das casas pelos habitantes das cidades ou lançados nas ruas.

Os resíduos especiais são aqueles gerados em indústrias ou em serviços de saúde, como hospitais, ambulatórios, farmácias e clínicas que, pelo perigo que representam à saúde pública e ao meio ambiente exigem cuidados especiais no seu acondicionamento, transporte, tratamento e destino final. Também se incluem nesta categoria os materiais radioativos, inflamáveis, corrosivos, reativos, tóxicos, alimentos ou medicamentos deteriorados, resíduos de matadouros e dos restos de embalagem de inseticidas e herbicidas empregados na área rural.

De acordo com a NBR 10.004, os resíduos sólidos são classificados em três classes:

- *Classe 1 (Resíduos Perigosos)* – são aqueles que apresentam riscos à saúde pública em função de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxidade e patogenicidade;

- *Classe 2 (Resíduos não Inertes)* – são os resíduos que não apresentam periculosidade, porém não são inertes; podem ter propriedades tais como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água; e,
- *Classe 3 (Resíduos Inertes)* – são aqueles que, ao serem submetidos aos testes de solubilização (NBR – 10.007 da ABNT) não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água. Isto significa que a água permanecerá potável quando em contato com o resíduo.

Os resíduos compreendidos nas *Classes 2* e *3* podem ser incinerados ou dispostos em aterros sanitários, desde que preparados para tal fim e que estejam submetidos aos controles e monitoramento ambientais. Os resíduos compreendidos na *Classe 1* somente podem ser dispostos em aterros construídos especialmente para tais fins, ou devem ser queimados em incineradores especiais. Nesta classe, inserem-se os resíduos da área rural, basicamente as embalagens de pesticidas ou de herbicidas e os resíduos gerados em indústrias químicas e farmacêuticas.

Os resíduos industriais são bem variados, podendo ser representados por cinzas, lodos, óleos, resíduos alcalinos ou ácidos, plásticos, papel, madeira, fibras, borracha, metal, escórias, vidros, cerâmicas, e outros. Nesta categoria, inclui-se a grande maioria dos resíduos considerados tóxicos.

Os resíduos das atividades agrícolas e da pecuária, como embalagens de adubos, defensivos agrícolas, ração, restos de colheita, e outros, já constituem uma preocupação crescente em várias regiões do mundo. Em geral, as embalagens de agro-químicos diversos, são altamente tóxicos e têm sido alvo de legislação específica, definindo os cuidados na sua destinação final e, por vezes, co-responsabilizando a própria indústria fabricante destes produtos.

Diversas pesquisas e estudos são desenvolvidos atualmente no sentido da reciclagem, do reuso e da busca pela minimização da geração dos resíduos, através da proposição de ações que promovam a redução de desperdícios, a conservação de recursos naturais, a redução ou eliminação de substâncias tóxicas presentes em matérias-primas ou produtos auxiliares, a redução

da quantidade de resíduos gerados por processos ou produtos, e conseqüentemente, a redução de poluentes lançados para o ar, solo e águas.

A preocupação neste sentido assume aspectos de ordem econômica e responsabilidade em relação ao meio ambiente. Para tanto, é preciso reorientar os atuais padrões de produção e consumo, promovendo a eficiência dos processos industriais e reduzindo os desperdícios.

A tendência para os próximos anos é que aumentem ainda mais os custos com o gerenciamento de resíduos, devido ao crescente controle exercido por setores organizados da sociedade e pelos órgãos oficiais, fazendo com que a demanda para novas soluções seja incrementada.

Nesse sentido, a construção civil poderá ter um papel relevante, pois de acordo com CINCOTTO (1988), é o setor que pelo volume de recursos naturais consumidos, parece ser o mais indicado a absorver os resíduos sólidos.

A indústria da construção civil, ao mesmo tempo em que é uma das mais importantes geradoras de emprego e riqueza no mundo, opera com grandes perdas em seu processo, gerando grandes desperdícios de matérias-primas provenientes de fontes naturais. Portanto, ao serem utilizados os resíduos sólidos como sub-produtos na construção civil, vários benefícios poderão ser obtidos, tais como a redução do volume de recursos naturais consumidos, a diminuição dos descartes em aterros que terão suas vidas úteis prolongadas, tendo como consequência um impacto ambiental menor.

Além disso, a própria característica da sua atividade, indica o potencial da utilização dos resíduos sólidos na construção civil. Como exemplo temos a técnica de solidificação que consiste na utilização de aditivos ou processos para alterar o estado físico do resíduo, facilitando o seu manuseio, o acondicionamento, o transporte e a disposição final do mesmo, tornando-o menos tóxico por imobilização física e/ou química dos seus constituintes. Portanto, a solidificação tem como objetivos melhorar as características físicas e de manuseio dos resíduos, diminuir a área através da qual possa ocorrer a transferência ou perda de poluentes e limitar a solubilidade de

constituintes perigosos contidos no resíduo. A técnica de solidificação em matrizes com cimento Portland, segundo MARAGNO et al (2001), é um método de tratamento viável e o mais utilizado para resíduos com elevadas concentrações de metais pesados.

Confirmando esse potencial, alguns estudos têm sido conduzidos no sentido do aproveitamento de resíduos sólidos industriais como componentes no processo de fabricação de produtos para a construção civil.

SILVA et al (2000) estudou a incorporação na produção de blocos cerâmicos do resíduo sólido inorgânico proveniente do processo produtivo do sulfato de alumínio férrico líquido, que é utilizado como defloculante de água para uso industrial, consumo público e para o tratamento de efluentes industriais. Este resíduo está classificado na *Classe 2* de acordo com a NBR10.004. Constatou-se que ao adicionar 10% do resíduo no processo de fabricação de blocos cerâmicos, os mesmos atenderam as especificações das normas brasileiras quantos às resistências mecânicas e comprovou-se não haver nenhum problema de impacto ambiental e nem de saúde a seus usuários.

Utilizando a técnica da solidificação com a finalidade de se verificar a possibilidade do uso do lodo ao cromo, resíduo sólido gerado em uma das linhas de tratamento de um curtume, na fabricação de bloquetes de pavimentação, MARAGNO et al (2001) desenvolveu um estudo em que os bloquetes foram submetidos ao ensaio de resistência mecânica à compressão de acordo com a NBR 9780 e ao ensaio de abrasão Los Angeles de acordo com a NBR 6465. Os resultados obtidos foram animadores, apesar das resistências à compressão dos bloquetes, próximos à 28 Mpa, se encontrarem abaixo da resistência característica estipulada pela NBR 9781, que é de 35 Mpa, enquanto os resultados obtidos com o ensaio de abrasão Los Angeles dos bloquetes confeccionados com o resíduo foram muito próximos aos dos bloquetes convencionais.

A técnica da solidificação em matrizes de cimento Portland de resíduos sólidos industriais inseridos na *Classe 1* pela NBR 10004, tem com objetivo principal a fixação dos metais pesados no sentido de evitar ou minimizar a solubilização destes para o meio circundante.

Portanto, o ensaio de lixiviação é um parâmetro importante para avaliar a eficiência do encapsulamento dos metais nas matrizes de cimento.

Utilizando este conceito, CASTILHOS JR. et al (2001) estudou a incorporação em matrizes de cimento de dois resíduos sólidos resultantes de duas indústrias localizadas na região da Grande Florianópolis, sendo um resíduo contendo cromo e o outro contendo zinco. Variando-se os teores de cimento/cal/resíduo, os resultados indicaram o potencial para a utilização do resíduo contendo zinco em blocos de cimento com ou sem função estrutural. Para o resíduo contendo cromo, os resultados indicaram a possibilidade de uso em tijolos maciços sem função estrutural. Os resultados de cromo e zinco apresentados após o ensaio de lixiviação foram bastante satisfatórios, apresentando uma eficiência superior a 99%.

4 O RESÍDUO RESULTANTE DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO PAPEL

4.1 A Indústria do papel

A invenção do papel é atribuída a um membro da corte imperial chinesa, chamado Ts'ai Lun, em 105 a.c. Desta época até 1798, ano em que a primeira máquina de papel foi construída, todo papel produzido no mundo foi feito manualmente. A máquina de papel foi inventada pelo francês Nicholas Louis Robert e aprimorada na Inglaterra por Bryan Donkin e John Gamble. O trabalho destes homens foi financiado pelos irmãos Fourdrinier e, por isso a máquina foi batizada como máquina de papel Fourdrinier (FARDIM, 2002).

Outros tipos de máquinas de papel foram criados posteriormente, seguindo arranjos similares a Fourdrinier, com exceção para a seção de formação da folha que pode apresentar diferentes formas e estruturações.

O conjunto de componentes que formam a máquina de papel consiste em caixa de entrada, seção de formação da folha, seção de prensagem, seção de secagem, seção de tratamento superficial (opcional) e seção de enrolamento (Fig. 4.1).

As etapas de alimentação da caixa de entrada, formação de folhas e prensagem formam a chamada parte úmida da máquina de papel, uma vez que grande quantidade de água é envolvida

nestas etapas. A etapa de prensagem tem a finalidade de remoção do excesso de água na folha formada através de contato físico. O conjunto formado pelas seções de secagem e enrolamento é chamado de parte seca da máquina.

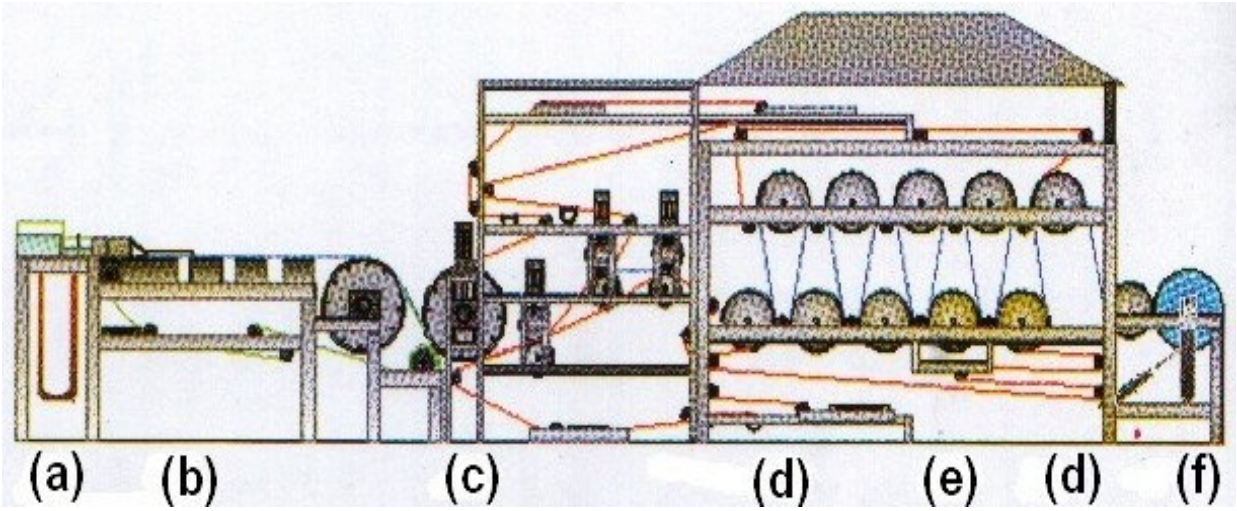

Fig. 4.1 –Desenho esquemático de uma máquina de papel Fourdrinier. (a) Caixa de entrada; (b) Mesa de formação de folha; (c) Cilindros de Prensagem; (d) Cilindros secadores; (e) Tratamento superficial; (f) Bobina de enrolamento. (Fonte: FARDIM, 2002)

O fluxo da produção do papel consiste inicialmente no refino da polpa celulósica e a posterior adição de componentes não fibrosos, como por exemplo, cargas minerais, agentes de retenção, branqueadores óticos e outros, seguido pela diluição com água e a alimentação da massa na caixa de entrada. Nesta seqüência ocorre o processo de floculação, em que fibras celulósicas, minerais, partículas coloidais e substâncias dissolvidas são agregadas em flocos macroscópicos. O fluxo segue da caixa de entrada para a seção de formação da folha, onde grandes quantidades de água são removidas dos flocos e, posteriormente, para as seções de prensagem, secagem e enrolamento.

As etapas de fabricação e conversão do papel envolvem várias interações de química de superfície. Refino, preparação de massa, revestimento e interações são importantes para a consolidação e desempenho do produto. Interações entre fibras e partículas coloidais, polímeros, minerais e corantes são fundamentais para a fabricação do papel.

As matérias-primas utilizadas para a fabricação do papel podem ser resumidas em matérias-primas fibrosas e matérias-primas não fibrosas.

As matérias-primas fibrosas podem ser de origem vegetal, animal, mineral e artificial. As fibras usadas na fabricação de pasta celulósica para papel são obtidas, quase que exclusivamente, a partir de matérias-primas vegetais, sendo várias as fibras vegetais usadas na fabricação de pasta celulósica para papel, desde a sua invenção. Inicialmente, foram utilizadas fibras que necessitavam de menor processamento, como, por exemplo, trapos, fibras provenientes de linho e de algodão. O aumento do consumo de papel ao longo dos anos, levou à procura de novas fontes de fibras vegetais, encontrando-se na madeira uma excelente matéria-prima. Segundo KUAN et al (1988), na seleção de uma dessas matérias-primas fibrosas de origem vegetal, deve-se considerar os seguintes fatores:

- ser disponível em grande quantidade o ano todo;
- possibilitar uma exploração econômica;
- ser facilmente renovável; e,
- fornecer ao produto final as características desejadas.

Uma folha contendo exclusivamente fibras celulósicas não possui as características do papel que geralmente são desejadas e adequadas para o uso normal. Uma folha produzida exclusivamente de fibras de celulose é porosa, sendo sua superfície pouco lisa e pouco resistente; quando umedecida, as propriedades mecânicas decaem a valores muito baixos e a opacidade é insatisfatória. Para conseguir as características comuns aos papéis atualmente existentes no mercado, a indústria adiciona matérias-primas não fibrosas, ou seja, produtos inorgânicos para dar ou melhorar certas propriedades do papel.

Dentre esses produtos inorgânicos, destacam-se os que são chamados de cargas. Essas cargas, que são materiais minerais de baixa granulometria, devem ser quimicamente inertes, evitando reações com outros materiais usados na fabricação do papel. As cargas são incorporadas à suspensão de fibras celulósicas durante a formação do papel e tem como finalidade básica propiciar maior uniformidade à superfície e melhorar certas características, tais como a alvura, a

lisura e a opacidade, fornecendo ainda melhores condições para uma boa impressão. Entre os principais produtos inorgânicos usados como carga, o caulim é o predominante, podendo ser empregado sozinho ou em combinação com os demais.

4.2 O resíduo proveniente da fabricação do papel

Logo após ser descartado do processo de fabricação do papel, o resíduo se encontra em forma líquida com alto teor de sólidos em suspensão. Esse efluente líquido é submetido a um tratamento primário de flotação (Fig. 4.2) e prensagem (Fig. 4.3), obtendo-se assim a forma sólida para a descarga em aterro, que é o principal método ainda utilizado. Essa descarga gera um custo alto com o transporte, além do problema ambiental que essa forma de destinação do resíduo produz.

Fig. 4.2 –Tanque de tratamento primário de flotação do resíduo resultante da fabricação do papel.

Fig. 4.3 –Prensagem e forma final do resíduo resultante da fabricação do papel.

Segundo FOELKEL et al (1975), as indústrias de papel e celulose são grandes fontes de poluição do ar e dos recursos hídricos, mas a maioria dos processos de tratamento em uso permite o controle eficaz dos agentes poluentes, se bem que às custas de elevados investimentos.

O resíduo resultante do processo de fabricação do papel, não é considerado tóxico para a manipulação, e está inserido na *Classe 2* da NBR 10.004. Este resíduo é composto basicamente de caulim, celulose, traços não significativos de substâncias químicas e água. Sua produção segundo dados da industria geradora e da literatura consultada, equivale a aproximadamente 1% da produção do papel.

Tab. 4.1 – Dados da produção de papel no Brasil (Fonte:BRACELPA, 2002)

Ano	Produção de Papel (ton)	Produção de resíduo (ton)
1991	4.914.113	49.141,13
2001	7.437.767	74.377,67
Jan-Set/2002	5.674.925	56.749,25

OBS: as quantidades referentes à produção do resíduo, são estimativas em função de dados coletados e consultados.

A umidade do resíduo de acordo com dados fornecidos pela indústria geradora em questão, varia de 65% a 70% e sua composição média aproximada é de:

- 60 % de caulim; e,
- 40 % de celulose.

Essa porcentagem pode variar em alguns momentos em função do processo produtivo, fazendo com que a quantidade de celulose alcance até 60 % na composição do resíduo.

De acordo com VAZ et al (1989), as soluções de aterro e incineração são, até agora, os processos mais largamente usados no mundo, não só para a indústria de celulose e papel, como também para lixos e biomassas residuais em geral.

Devido ao alto teor de umidade e baixo poder calorífico, a incineração deste resíduo torna-se dispendiosa, sendo necessário adicionar líquido combustível ao material (NOLASCO, 1993).

Segundo ainda NOLASCO (1993), alguns estudos já buscaram desenvolver tecnologia para o uso do resíduo da indústria de papel, entre eles o de desenvolvimento de corretivo para solos e biomassa para a agricultura através de compostagem, servindo de substrato para a produção de cogumelos. No entanto essas práticas estão absorvendo apenas um pequeno volume, e em locais pontuais, necessitando de outras alternativas que consumam o maior volume de resíduo.

Em 1995, foi desenvolvido um estudo para o aproveitamento do resíduo em material cerâmico para a construção civil. Foram testados diferentes traços, incorporando várias quantidades diferentes de resíduos no processo de fabricação de blocos cerâmicos para se chegar à quantidade ideal. Conclui-se que é possível incorporar entre 10 a 30 % de resíduo na produção do bloco. Posteriormente, a resistência dos blocos produzidos foi testada, e ficou comprovado que a resistência era a mesma que a do material convencional. Foram ainda realizados testes com

o resíduo que indicaram não haver riscos para a saúde humana, tanto para o usuário final, como para os trabalhadores envolvidos no processo de produção dos blocos ou na própria construção civil (IPEF, 2000).

NOLASCO (1993) conduziu um estudo para a utilização do resíduo em pastas de cimento, em que foram utilizados os traços 1:2 , 1:3 e 1:4 (cimento : resíduo). Os ensaios de resistência à compressão aos 28 dias, apresentaram valores de 2,03 MPa (traço 1:4), 2,98 MPa (traço 1:3) e 2,03 MPa, o que segundo a autora, atendem os requisitos de resistência à compressão para bloco de concreto para vedação. O trabalho também indicou que os compósitos estudados possuem um excelente desempenho enquanto isolante acústico e aparentam possuir boas propriedades como dissipador de calor.

5 O CAULIM

O caulim é o nome comercial dado a uma argila branca ou quase branca, constituída essencialmente de caulinita. Há mais de três mil anos, os chineses já usavam o caulim para fazer porcelana. GRIM (1958) define caulim como sendo uma rocha constituída de material argiloso, com baixo teor de ferro e cor branca. Os caulins são silicatos de alumínio hidratado, cuja composição química aproxima-se de $Al_2O_3.2SiO_2.2H_2O$ (LUZ, 2000). A caulinita, mineral predominante dos caulins, é um silicato hidratado de alumínio, cuja célula unitária é expressa pela fórmula $Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8$.

Geralmente, nas jazidas de caulim de valor econômico, são os minerais chamados de feldspatos que, predominantemente dão origem à caulinita e à haloisita em qualquer das formas, quer por intemperismo, quer por ação hidrotérmica (KIYOHARA, 1984).

De acordo ainda com KIYOHARA (1984), normalmente o caulim ocorre associado a diversas impurezas (haloisita, quartzo, feldspato, mica muscovita e outros) , não atendendo, assim, às especificações de mercado.

Portanto, para o aproveitamento do caulim "bruto", é necessário o seu beneficiamento, que pode ser pelo processo a seco (Fig. 5.1) ou pelo processo a úmido (Fig. 5.2). O beneficiamento a seco é usado para caulins que já possuem qualidades desejadas de alvura, pouco quartzo e distribuição granulométrica adequada de partículas. Como a maioria dos caulins não atende essas especificações, o seu beneficiamento é feito a úmido.

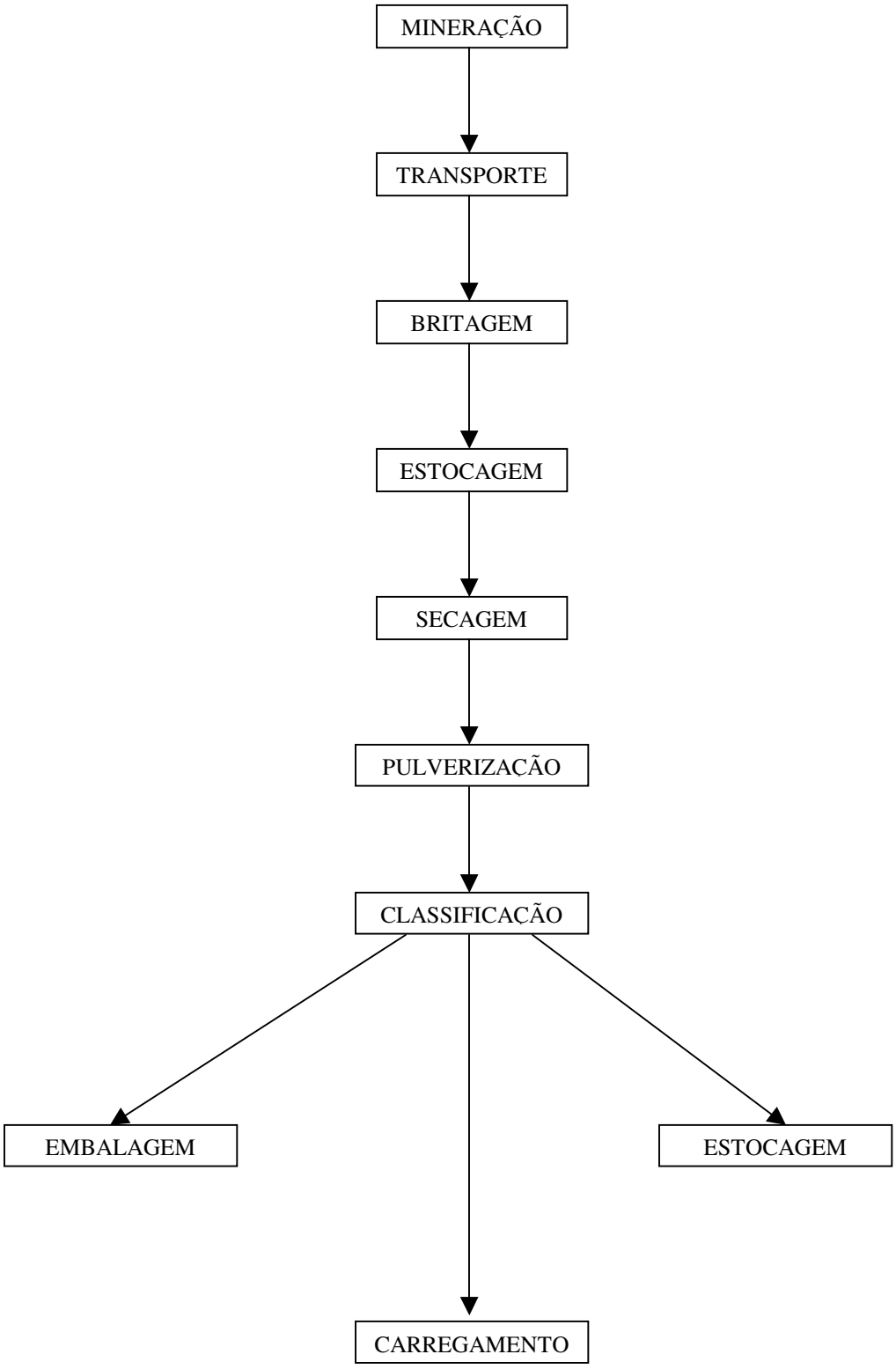

Fig. 5.1 –Processo a seco para produção de caulim (Fonte: LIMA, 1991)

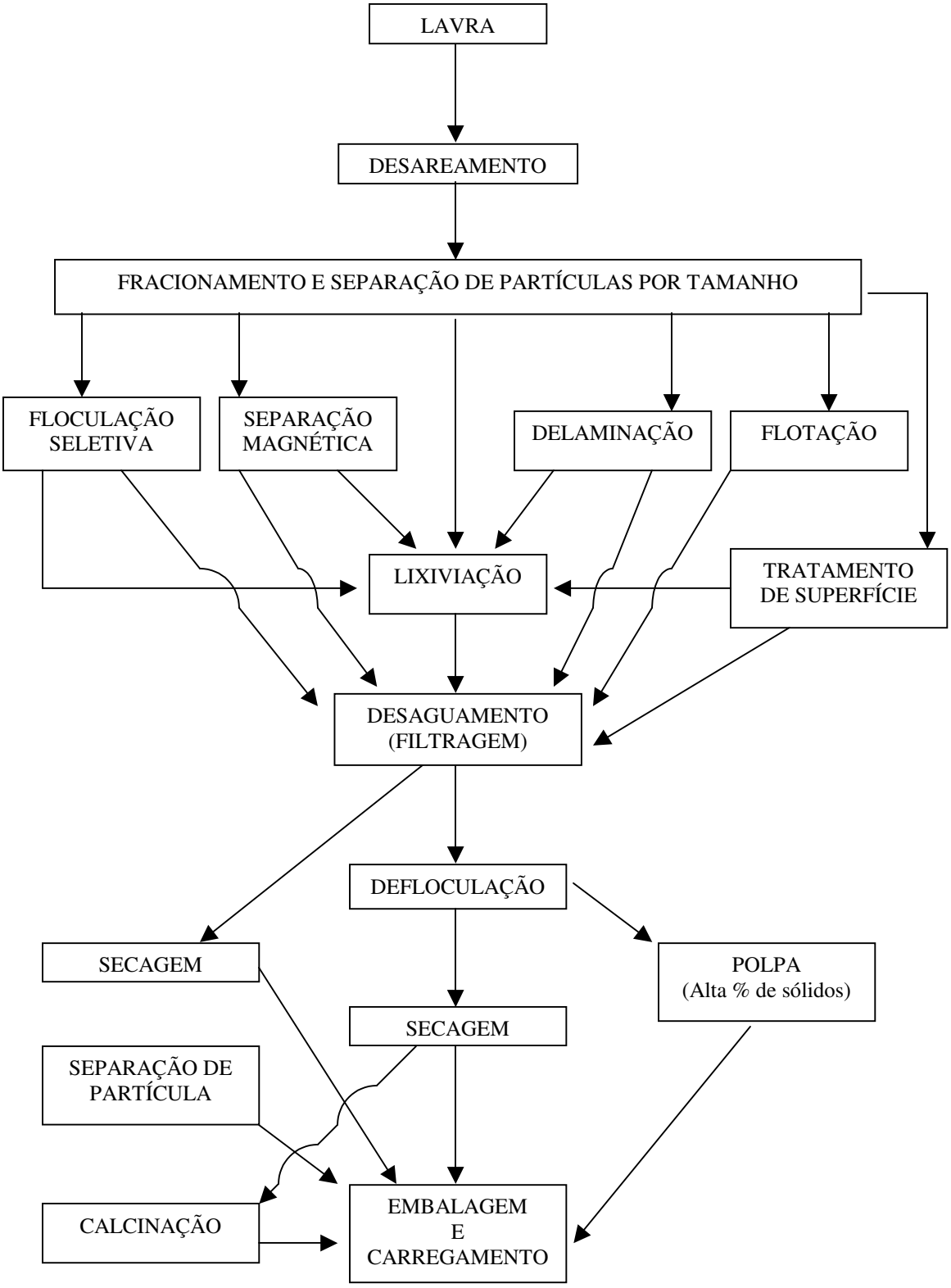

Fig. 5.2 –Processo a úmido de caulim para cobertura e carga (Fonte: LIMA, 1991)

O caulim é amplamente utilizado em diversos setores industriais, destacando-se o de papel que consome grande parte da produção.

Existem depósitos de caulim em vários países do mundo, mas são poucas as jazidas de boa qualidade e com volume adequado para suportar uma escala de produção competitiva (LUZ , 1993).

A reservas de caulim estão concentradas principalmente nos Estados Unidos, China, Brasil, Reino Unido e Ucrania. A produção mundial de caulim beneficiado é dominada pelos Estados Unidos e Reino Unido, vindo a seguir o Brasil (Tab. 5.1).

Tab. 5.1 –Produção e reservas mundiais de caulim (Fonte:Sumário Mineral Brasileiro – DNPM, 2000)

Países	**(1) Reservas (1999)**		**(2) Produção (10^3ton)**		
	(10^3ton)	(%)	1998(R)	1999	1999(%)
Brasil	4.000.000	28,2	1.374	1.517	6,7
Estados Unidos	8.300.000	58,4	9.450	9.710	43
Reino Unido	260.000	1,8	2.600	2.500	11
Ucrânia	980.000	6,9	1.000	1.000	4,4
China	180.000	1,3	950	950	4,2
Outros Países	480.000	3,4	4.162	6.923	30,7

Notas: (1) Reservas totais (no mundo, estimadas em 1999), no Brasil, 1997
(R) Revisado (apenas Brasil e Estados Unidos; o restante, estimado)
(2) Caulim Beneficiado

De acordo com LUZ (2000), o vasto campo de aplicação industrial do caulim deve-se às suas seguintes características tecnológicas:

- quimicamente inerte;
- branco ou quase branco;
- tem capacidade de cobertura quando usado como pigmento e reforçados para aplicações como carga;
- possui baixa condutividade térmica e elétrica;

- macio e pouco abrasivo; e,
- competitivo com os materiais alternativos.

A rigidez nas especificações dos caulins depende do uso a que se destinam. Na indústria do papel, por exemplo, requerem-se especificações rígidas quanto à granulometria, alvura e viscosidade. Para a indústria de cimento as especificações são menos rígidas, sendo a composição química importante. Para as aplicações em cerâmica, a plasticidade, a cor, o ponto de vitrificação, a retração linear e a resistência mecânica à deformação é que são relevantes (LUZ, 1993).

Como produto inorgânico, o caulim é adicionado à massa de celulose com função de carga que age no sentido de melhorar certas propriedades do papel, tais como a textura, impressão, gramatura, opacidade e alvura (NOLASCO, 1993).

A alvura é uma propriedade que está relacionada com a cor, e é definida como o quociente (em %) entre as intensidades da luz refletida por um material branco (objeto de análise) e a luz refletida por uma superfície de óxido de magnésio, preparada em condições pradonizadas.

Segundo JEPSON (1984) e PRASADA et al (1991), a forma e a distribuição de tamanho das partículas do caulim são fatores da maior importância no controle das suas propriedades, especialmente na alvura, viscosidade, opacidade e brilho.

Os caulins mais adequados para cobertura de papel são aqueles constituídos de caulinita de placas hexagonais e contorno regular (LUZ et al, 2000).

Na indústria de papel, o caulim é usado como um extensor, diminuindo assim o uso de materiais mais caros do tipo dióxido de titânio ou como cobertura para tornar a superfície do papel macia. É também usado como carga funcional, visando melhorar a aparência do papel, opacidade, receptividade à tinta e impermeabilidade (LOUGHBROUGH, 1993).

A tabela 5.2 apresenta algumas análises típicas de caulim utilizados como carga e cobertura na indústria de papel.

Tab. 5.2 – Análises Típicas de Caulins Brasileiros para Cobertura de Papel (Fonte: LUZ, 2000)

Propriedades	Caulim A	Caulim B	Caulim C
Alvura ISSO	89,4	89,4	88
Amarelidez (yellowness)	-	5,8	-
PH	6,0 – 7,5	7,4	4,6
Resíduo	14 ppm (> 44 μm)	5 ppm (> 37 μm)	50 ppm (> 45 μm)
% Partículas < 2 μm	80	89	97
% Sólidos	67	71	71
Visc. Brookfield 10 rpm	< 390 mPa.s	505 mPa.s	400 mPa.s
Visc Brookfield 100 rpm	100 mPa.s	160 mPa.s	130 mPa.s
Viscosidade Hércules ou Haake	1050 rpm	1100 rpm 66 mPa.s	35 mPa.s
Umidade (%)	< 6,0	4,6	6,0

Nota: Os caulins foram codificados para evitar problemas com as empresas

Nos últimos anos, na busca por um melhor desempenho dos compósitos de cimento, principalmente na resistência mecânica e na durabilidade, os materiais de granulometria micrométrica têm tido destaque, principalmente a sílica ativa. Isso se deve ao fechamento do pacote granulométrico que a sílica ativa proporciona ao compósito, ou seja, atuando de forma a preencher os espaços vazios existentes entre as partículas maiores, aumentando a densidade de empacotamento e diminuindo assim a porosidade que interfere substancialmente na resistência mecânica e na durabilidade.

As granulometrias do caulim e da sílica ativa, conforme mostra a literatura existente, são semelhantes. A sílica ativa apresenta partículas com diâmetro variando de menos de 0,1 a 2 μm (Aïtcin, 2000), enquanto o caulim brasileiro utilizado para a cobertura do papel apresenta de 80 a 97 % de partículas menores que 2 μm (Luz, 2000). Observa-se na Figura 5.3 a similaridade da granulometria do Caulim Amazon – 88 Lump e da Microsílica 971 D (GEROTTO et al, 2000).

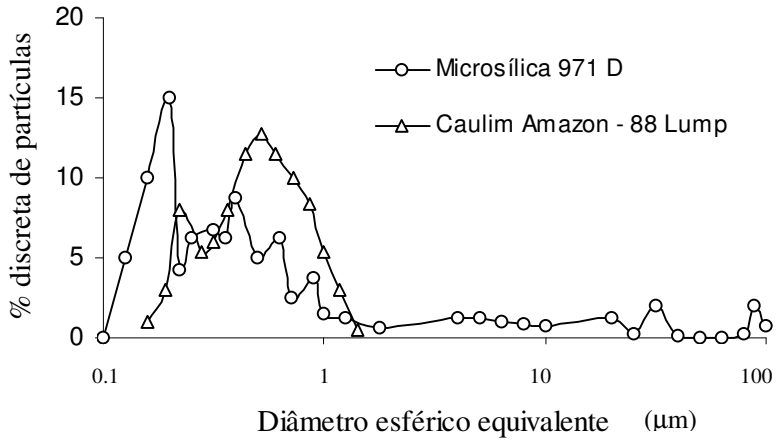

Fig. 5.3 –Distribuição discreta de tamanho de partículas (Fonte: GEROTTO et al, 2000)

De acordo ainda com GEROTTO et al (2000), estudos demonstram que a utilização do caulim em concretos refratários, promove características de fluidez e empacotamento muito similares às dos concretos com sílica ativa.

Em compósitos de cimento, alguns estudos têm sido realizados com a adição de caulim termicamente ativado, ou seja, após calcinação na faixa de 700 a 850ºC, o que confere ao mesmo, propriedades pozolânicas. O caulim calcinado é denominado de metacaulim e é composto tipicamente de SiO_2 (50-55%) e Al_2O_3 (40-45%).

Os avanços na tecnologia do concreto têm mostrado que o uso de adições minerais, tais como a sílica ativa e a cinza volante, é importante para produzir concretos de elevado desempenho. Recentemente, tem havido um interesse crescente no uso do metacaulim para este propósito. Estudos têm mostrado que a substituição de cimento entre 5 e 15% por metacaulim, resulta em acréscimos significativos na resistência à compressão em concretos de elevado desempenho e em argamassas, particularmente nas idades iniciais. A substituição por metacaulim também promove melhoria em algumas propriedades relacionadas à durabilidade do concreto, tais como, a resistência à penetração do íon cloreto e ao gelo e degelo (POON, 2001).

Com relação ao uso do caulim em estado natural e purificado nos compósitos de cimento, a literatura consultada não indicou trabalhos diretamente relacionados com o assunto,

exceção feita ao estudo conduzido por OSMANLIOGLU (2002) para determinar o desempenho do encapsulamento em compósitos de cimento de um resíduo radioativo de baixa intensidade que continha o Cs-137, o Cs-134 e o Co-60.

Os resíduos líquidos radioativos de baixa intensidade são precipitados usando-se métodos químicos, e em seguida são submetidos ao encapsulamento por solidificação cimentícia em tambores. O grau de lixiviação dos radionuclideos é usado como indicador de desempenho do encapsulamento dos resíduos solidificados.

Em seu trabalho, OSMANLIOGLU (2002) além de avaliar os efeitos do caulim nas propriedades lixiviantes dos resíduos solidificados, investigou também o efeito da substituição de parte do cimento por caulim purificado na resistência dos corpos-de-prova.

A relação água/cimento foi fixada em 0,43 e a relação lama residual radioativa/cimento foi fixada em 0,36. Corpos cilíndricos foram preparados com substituição de 0, 5, 10, 15 e 20% de cimento por caulim purificado. Os corpos-de-prova com 50mm x 100 mm foram testados com idades de 1, 3, 7, 21, 28 e 90 dias.

O teste de lixiviação mostrou que a substituição de 5% do cimento por caulim purificado reduz o grau de lixiviação dos radionuclideos em aproximadamente 50%. Porém, substituições maiores que 15 % indicaram uma diminuição significativa na estabilidade hidrolítica dos corpos-de-prova. Foi verificado que o melhor isolamento do resíduo radioativo, sem causar uma perda na resistência mecânica, é obtido quando a substituição de cimento por caulim for de 5%. A resistência à compressão axial foi determinada seguindo-se os procedimentos da ASTM (1986).

Os resultados obtidos com relação à compressão axial são apresentados na Fig. 5.4, onde cada ponto do gráfico representa a média de 5 corpos-de-prova.

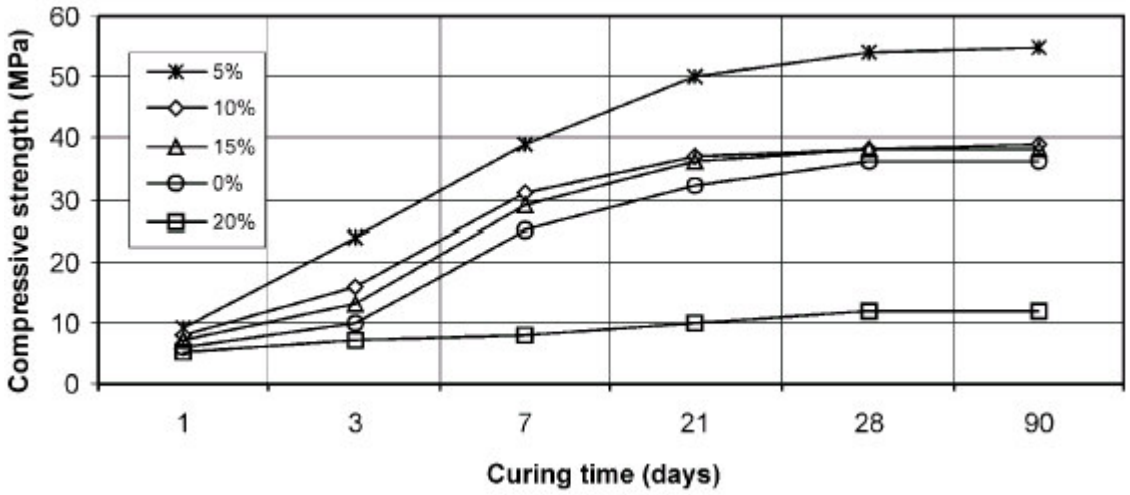

Fig. 5.4 – Resistência à compressão axial em função da idade das amostras (Fonte: OSMANLIOGLU, 2002)

6 A CELULOSE

A celulose é um composto natural existente nos vegetais, de onde é extraída, podendo ser encontrada nas raízes, tronco, folhas, frutos e sementes.

A celulose é o principal componente das fibras vegetais, e é constituída de dois núcleos químicos bastante similares entre si, que se reúnem formando pares. Esses pares se repetem por "n" vezes, formando cadeias (Fig. 6.1) cujo tamanho varia em função da origem da celulose, da idade e de fatores ambientais. É possível encontrar cadeias de 200 até 10.000 unidades repetitivas, sendo comuns os valores de 600 a 2.000 (NOLASCO, 1993).

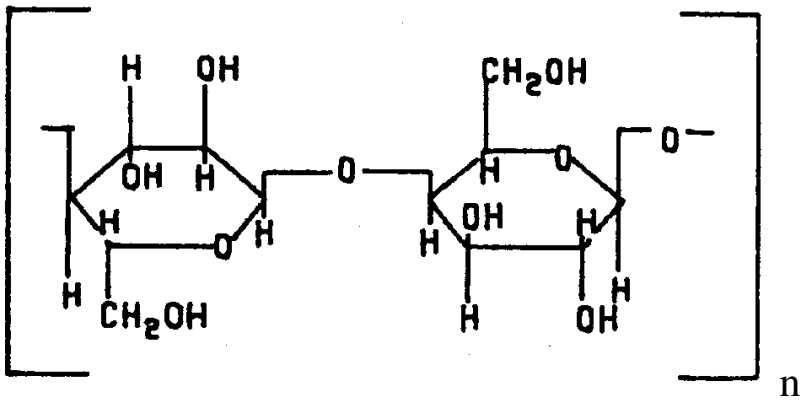

Fig. 6.1 –Forma estrutural da celulose (Fonte: SPROUSE COLLECTION OF INFRARED SPECTRA, 1987)

As células vegetais, por terem forma alongada e de pequeno diâmetro (finas), são freqüentemente chamadas "fibras", sendo que a celulose é um dos seus principais componentes. A lignina e a hemicelulose são outros componentes relevantes encontrados nas células vegetais.

As fibras podem ser consideradas cilindros ocos. Conforme o tipo de madeira, podem variar em largura, diâmetro, resistência e flexibilidade, e, dependendo do tipo de cozimento a que foram submetidas, variam também em rigidez e resistência ao tratamento mecânico.

A Fig. 6.2 ilustra, de modo idealizado, a estrutura celular em uma fibra de madeira. De acordo com PIRES et al (1988), a parede primária (Pr) é a camada externa da fibra e é muito fina, possuindo fibrilas entrelaçadas e em disposição irregular. A parede secundária (S1) está em contato com a parede primária e consiste em dois sistemas de fibrilas paralelas, dispostas simetricamente em relação à direção axial, que formam um angulo com cerca de 90º entre si. A parede secundária média (S2) contém a maior parte da celulose da fibra e sua espessura varia de acordo com a sua localização na árvore. A parede secundária interna (S3) é muito fina, do tipo da parede primária, e suas fibrilas estão dispostas em espiral.

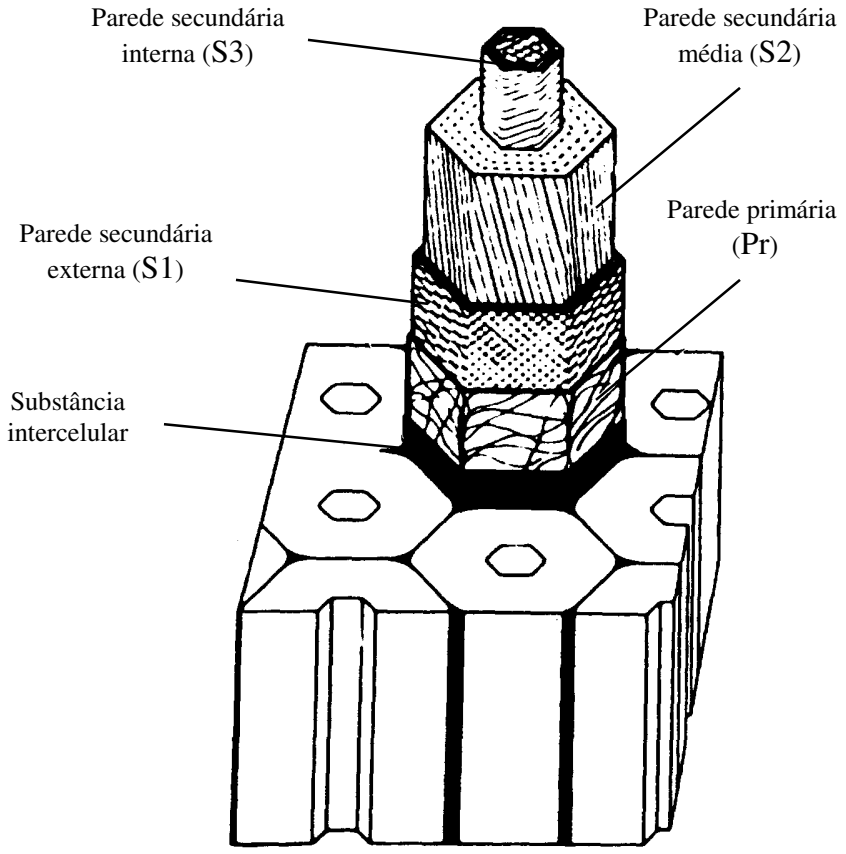

Fig. 6.2 –Fibra de madeira; representação das paredes celulares (Fonte: PIRES et al, 1988)

6.1 As fibras vegetais na indústria

A madeira é composta basicamente de fibras que são suportadas pela lignina, ligando as células entre si. O objetivo da indústria de celulose, é separar a lignina da celulose de forma eficiente, sem prejuízo da celulose.

É a partir da madeira que se obtém a quase totalidade das pastas de celulose, sendo uma pequena parte proveniente de outras fontes, tais como, o bagaço da cana, o algodão, o linho, o bambu, e o sisal. No algodão, a celulose está na forma praticamente pura (99%).

Portanto, existem várias fontes diferentes e processos distintos de preparação de pastas celulósicas, conseqüentemente produzindo pastas com características diversas.

As fibras vegetais, do ponto de vista da indústria do papel, são geralmente classificadas em fibras longas e fibras curtas. Normalmente, as fibras longas variam de um comprimento médio de 2 a 5 mm, enquanto que as fibras curtas variam, em média, de 0,5 a 1,5 mm (KUAN et al, 1988).

As madeiras integrantes do grupo denominadas *coníferas*, onde se incluem o pinho e a araucária, possuem fibras longas. Já as madeiras conhecidas como *folhosas*, onde encontramos o eucalipto e a acácia, possuem fibras mais curtas e finas.

A celulose que se apresenta no resíduo objeto de estudo neste trabalho, é proveniente de madeiras folhosas do gênero *Eucalyptus* e de coníferas do gênero *Pinus*.

As fibras celulósicas que não são extraídas da madeira, como no caso do algodão, do linho, da juta e do sisal, são muito longas e por isso são denominadas "fibras têxteis", amplamente utilizadas na indústria de tecelagem. Já as fibras extraídas do bambu e do bagaço de

cana, que também não são extraídas da madeira, apresentam fibras de menor comprimento. A tabela 6.1 apresenta um resumo das dimensões de algumas fibras vegetais.

Tab. 6.1 –Dimensão das fibras (Fonte:KUAN et al, 1988)

Fibra	**Comprimento (mm)**	**Largura (μm)**	**Espessura de parede (μm)**
Araucária	2,00 – 5,37	23,0 – 41,2	3,25 – 18,5
Pinus elliottii	1,55 – 4,68	21,5 – 42,8	2,80 – 19,6
Bambu	1,16 – 6,16	7,5 – 29,2	2,75 – 13,2
Sisal	1,15 – 4,15	11,2 – 30,0	2,25 – 8,38
Eucalipto	0,70 – 1,40	11,0 – 24,8	2,00 – 8,00
Gmelina	0,72 – 1,79	16,5 – 41,2	1,25 – 5,38
Bagaço de cana	0,82 – 3,91	11,3 – 45,6	1,43 – 15,6

A polpação é o processo da modificação da estrutura da madeira de forma a se obter a polpa de celulose através de processos mecânicos, termomecânicos, semiquímicos ou químicos, nos quais a madeira é tratada com vários produtos, sob pressão e ação de calor para dissolver a lignina.

Esses processos apresentam as seguintes características (MARCONDES, 1999):

- *Processo Mecânico* – as toras de madeira são prensadas a úmido contra um rolo giratório cuja superfície é coberta por um material abrasivo, reduzindo-as a uma pasta fibrosa denominada "pasta mecânica". Neste processo não ocorre uma separação completa das fibras dos demais constituintes do vegetal, e por isso possui uma aplicação limitada, pois o papel produzido através deste processo tende a escurecer com certa rapidez, mesmo após passar pela etapa de branqueamento, devido a oxidação da lignina residual. A pasta obtida através do processo mecânico

puro ou em composição com outra, é largamente utilizada na fabricação de papel para jornal, revistas, embrulhos e higiene;

- *Processo Termo-mecânico*– a madeira em forma de cavacos, sofre um aquecimento com vapor provocando uma transição do estado rígido para o estado plástico, seguindo para o processo de desfibramento em refinador. Apesar de apresentar um rendimento um pouco menor que no processo mecânico, a pasta obtida desta forma resulta em celulose para a produção de papes de melhor qualidade, pois resulta em melhor resistência mecânica e melhor imprimabilidade, entre outras;

- *Processo Semi-químico* – neste processo são acrescentados produtos químicos em baixas porcentagens para facilitar ainda mais o desfibramento;

- *Processo Químico-Kraft* – a madeira neste caso, também em forma de cavacos, é tratada em vasos de pressão denominados digestores, com sulfeto de sódio e soda caustica. Este processo visa dissolver a lignina, preservando a resistência das fibras, obtendo-se dessa maneira uma pasta forte (*Kraft* significa forte em alemão). É largamente utilizada para a fabricação de papéis cuja resistência seja a principal propriedade, como as sacolas de supermercado e sacos de cimento;

- *Processo Químico-Sulfito* – É um processo onde os cavacos são cozidos em digestores com um licor ácido, preparado com compostos de enxofre (SO_2) e uma base $Ca(OH)_2$, NaOH ou NH_4OH entre outras. A pasta obtida neste processo é de branqueamento muito fácil, apresentando uma coloração clara que permite o seu uso mesmo sem ser branqueada. Muito utilizado para a confecção de papeis para imprimir e escrever, este processo tem sido substituído pelo processo químico-sulfato (principalmente após a introdução do dióxido de cloro no branqueamento) devido a dificuldade de regeneração dos produtos químicos e os conseqüentes problemas com a poluição das águas; e,

- *Processo Químico-Sulfato* – Neste caso, são utilizados os mesmos produtos químicos do processo *Kraft*, mas emprega-se maior quantidade de sulfeto e de soda, além do cozimento ser feito por mais tempo e com temperaturas mais elevadas. É o processo mais usado no Brasil, principalmente para a obtenção de pastas químicas com eucalipto, devido à preservação da resistência das fibras e a boa dissolução da lignina, formando uma pasta branqueável e forte. As pastas de celulose obtidas por esse processo não apresentam nenhuma restrição de uso.

A tabela 6.2 apresenta um resumo de algumas fibras e os respectivos processos para a obtenção das pastas.

Tab. 6.2 –Tipo de fibra e processo empregado para obtenção das pastas (Fonte:KUAN et al, 1988)

Fibra	**Matéria-Prima**	**Espécie**	**Tipo de pasta**
LONGA	Madeira	Pinheiro	Química Semiquímica Mecânica
	Não-madeira	Bambu	Química Semiquímica
		Sisal	Química
		Palha de linhaça e estopa de linho	Química
		Linters	Química
CURTA	Madeira	Eucalipto	Química Semiquímica
		Gmelina	Química
		Acácia	Semiquímica
	Não-Madeira	Bagaço-de-cana	Química Semiquímica

A celulose presente no resíduo objeto deste estudo é oriunda de alguns dos métodos descritos, pois depende do tipo de papel produzido na indústria.

Quando a madeira já está transformada em polpa, ela tem a cor marrom e já pode ser utilizada para a produção do papel ou ser branqueada.

Com o processo de modificação da estrutura da madeira, a lignina é solubilizada no meio de cozimento e adquire uma coloração mais escura que a original.

O objetivo do branqueamento é remover a lignina ou pelo menos a coloração característica desta, de forma a atingir a polpa de celulose branqueada.

O processo de branqueamento ocorre em diversos estágios, de forma a preservar ao máximo as características de resistência da celulose para a produção do papel.

Ao final do branqueamento, a polpa passa por uma depuração fina para remover impurezas que existam em pequena quantidade na celulose e garantir sua limpeza.

Normalmente, o branqueamento começa com um tratamento da pasta com cloro, seguido por uma extração alcalina com soda caustica, sendo aplicado, depois disso, uma série de combinações ou seqüências em que se alternam o dióxido de cloro, o hipoclorito e a soda caustica.

Já se encontra bem desenvolvida uma técnica de branqueamento em que se emprega oxigênio. Mas nesse caso, visa-se também o combate à poluição causada pelos produtos derivados do cloro.

6.2 As fibras vegetais em matrizes de cimento

O reforço de matrizes frágeis com fibras, tem como principais finalidades, o aumento da resistência à tração e ao impacto, a maior capacidade de absorção de energia e a possibilidade do uso no estágio pós-fissurado, além de conferir um isolamento termo-acústico aceitável (AGOPYAN et al, 1997).

As fibras vegetais têm sido muito estudadas, principalmente para reforço de componentes para construções de interesse social, em virtude do seu baixo custo, ao serem empregadas na própria região de origem, ou como rejeitos de outras aplicações (SAVASTANO JR., 1992).

A celulose é considerada uma matéria-prima particularmente importante devido a sua ocorrência natural e abundante, e por ser largamente utilizada na produção de papel e como reforço em materiais de construção, seja na forma de madeira, serragem ou polpa de madeira.

Com relação às fibras artificiais, o custo da celulose é muito baixo, mas o seu baixo módulo de elasticidade e a baixa durabilidade são os dois principais fatores restritivos à sua aplicação como reforço em matrizes de cimento (NOLASCO, 1993).

As fibras vegetais sofrem grande influência das intempéries e da alcalinidade do meio a que estão expostas (RAMASWAMY et al, 1983). A água capilar, com elevada alcalinidade, dissolve a lignina e a hemicelulose, que são os elementos responsáveis pelo suporte das fibras na madeira.

SAVASTANO JR. (1992) cita como alternativa para se evitar a deterioração das fibras vegetais, em conseqüência da alcalinidade ou da umidade do meio a que estão expostas, a substituição parcial ou total do cimento Portland por outros aglomerantes alternativos, menos alcalinos, tais como a escória e a cinza de casca de arroz.

De acordo com JOHN & AGOPYAN (1993), outras alternativas, tais como a impermeabilização da matriz e o emprego dos compósitos em locais permanentemente secos, se apresentam como soluções possíveis para controlar a degradação das fibras vegetais nas matrizes de cimento.

Outro procedimento que tem se mostrado promissor é o tratamento das fibras vegetais como forma de protegê-las das agressões do meio. BENTUR et al (1989) empregaram o autoclave para tratamento de compósitos a base de cimento com fibras de celulose incorporadas, e a deterioração, tanto para a situação de envelhecimento natural como acelerado, foi considerada baixa. O aspecto negativo obtido foi a redução da tenacidade e o aumento do módulo de elasticidade do compósito submetido a esse tratamento. PIRIE et al (1990) obtiveram resultados semelhantes.

AGOPYAN et al (1990) realizaram a construção de um protótipo de habitação que está sendo ocupada por usuários de um conjunto habitacional do Município de São Paulo desde 1989. Nessa construção, os painéis de vedação vertical foram feitos com matrizes a base de escória de alto-forno, reforçadas com fibras de coco. De acordo com os pesquisadores responsáveis, o desempenho tem sido satisfatório até o momento.

JOHN et al (1990) estudaram um aglomerante composto por mais de 80 % de escória de alto-forno, além de cal hidratada e gipsita. Os resultados obtidos foram considerados bons e demonstraram a viabilidade de argamassas á base de escória reforçadas com fibras de coco, para produção de painéis.

OLIVEIRA (1989) conseguiu melhoria da durabilidade de argamassa de cimento reforçada com fibras de malva, nos casos em que essas fibras eram previamente lavadas com detergente comum.

GUIMARÃES (1990) submeteu fibras de sisal à impregnação com acetato de polivinila (PVA) e obteve melhoria sensível do desempenho do compósito resultante, após envelhecimento acelerado.

A literatura existente indica que as fibras vegetais geralmente apresentam propriedades mecânicas pobres quando comparadas com a alta performance das fibras industrializadas. No entanto, apresentam vantagens tais como a baixa densidade, baixo custo e baixa demanda de energia na extração, que podem viabilizar sua utilização.

SWAMY (1990) considera que as fibras vegetais em matrizes de cimento contribuem para uma melhor distribuição das tensões, o que implica na melhora do comportamento pós-fissuração. A dutibilidade e a capacidade de absorção de energia também apresentam melhora com a incorporação de fibras vegetais nas matrizes.

Segundo FORDOS (1988), geralmente a adição de fibras a matrizes de cimento resulta em melhorias na resistência ao impacto, à flexão, dutibilidade, durabilidade e tem efeito inibidor de fissuras. Com relação às fibras de celulose, a água tem um efeito prejudicial no módulo de elasticidade e na resistência à tração.

O uso de fibras vegetais em matrizes de cimento constitui uma área promissora cientificamente. Seu uso pode reduzir o consumo de energia, conservar recursos escassos e gerar alternativas para o problema habitacional, melhorando as condições locais. A fragilidade dessas fibras pode ser superada por estudos microestruturais e micromecânicos (SWAMY, 1990).

DEVITO et al (2002) estudaram o uso da polpa celulósica residual de eucalipto como reforço de diferentes formulações de matrizes cimentícias para a produção de placas delgadas com espessura aproximada de 8mm. Foram produzidos compósitos reforçados com 5% de fibra de celulose de *Eucalyptus grandis* e pastas com diversos tipos e porcentagens de aglomerantes. Os compósitos apresentaram propriedades físicas e mecânicas aceitáveis para a produção de peças delgadas, tais como painéis de vedação vertical e telhas de cobertura. Os resultados mais promissores foram atingidos por compósitos à base de escória de alto-forno, com ou sem adição de sílica ativa, bem como de compósitos com cimento CP III RS com adição pozolânica, sendo que em todos os casos foram utilizados aditivos superplastificantes e relação água/aglomerante de 0,50.

PADILHA et al (2001) avaliaram a potencialidade de uma argamassa leve contendo vermiculita e polpa de sisal como material de alto isolamento térmico para utilização nas edificações rurais. Foram ensaiados diferentes traços contendo cimento, areia, vermiculita e polpa de sisal. Os resultados obtidos indicaram que a introdução da vermiculita e polpa de sisal na argamassa provocou um aumento no índice de vazios e na absorção de água do material, e como conseqüência, uma diminuição na densidade aparente e na resistência mecânica das misturas, mas dentro dos valores práticos recomendados para uso como material isolante ou estrutural. Apesar da diminuição da resistência mecânica, o estudo indicou que a adição de polpa de sisal aumentou a tenacidade das matrizes que deixaram de apresentar comportamento frágil. Com relação às propriedades isolantes, a adição de polpa de sisal reduziu significativamente a condutividade térmica. De acordo com os autores, os resultados indicaram que o compósito obtido pode ser utilizado tanto como material isolante quanto estrutural, sendo uma alternativa segura, ecológica e de baixo custo para a fabricação de blocos, painéis de alvenaria e de placas planas e corrugadas para uso nas edificações rurais.

7 METODOLOGIA

Qualquer material para ser utilizado, deve ser comercialmente viável. Portanto, para a questão da viabilidade econômica do emprego de resíduos na construção civil, CINCOTTO (1988) propõe, baseados nos estudos do OECD – Organization for Economic Cooperation and Development – e da RILEM – Reunion International dês Laboratories d'Essais et Materiaux, os seguintes critérios:

- a quantidade de resíduo disponível em um local deve ser suficientemente grande para justificar o desenvolvimento de sistemas de manuseio, processamento e transporte;

- as distâncias de transporte envolvidas devem ser competitivas com os materiais convencionais; e,

- o material não deve ser potencialmente nocivo durante a construção ou posteriormente à sua incorporação na estrutura.

De acordo ainda com CINCOTTO (1988), constatada a viabilidade técnica da utilização do resíduo, o mesmo pode ser classificado de acordo com as seguintes classes:

- *Classe 1*: materiais com potencial de aplicação máxima. Possuem as melhores propriedades tanto na sua ocorrência natural, na forma processada ou combinada, ou quando já registrado um desempenho satisfatório;

- *Classe 2*: materiais que requerem um processamento mais extensivo e/ou quando as suas propriedades não são tão adequadas quanto às da classe 1;

- *Classe 3*: materiais que se mostram menos promissores do que os das classes 1 e 2, recomendados somente para casos isolados; e,

- *Classe 4*: materiais que se mostram muito pouco promissores como material para construção civil.

Seguindo os critérios anteriormente descritos, a quantidade disponível de resíduo deve ser avaliada regionalmente e nacionalmente, e em seguida estabelecer-se uma relação entre a produção de papel e produção de resíduo, o que possibilitará uma estimativa do volume produzido em diferentes regiões.

De acordo ainda com esses critérios, a avaliação das distâncias de transporte e da competitividade com materiais convencionais, deve ser realizada considerando-se o preço do metro cúbico do material produzido e o consumo regionalizado do mesmo, isto é, distâncias inferiores a 100 km.

Segundo informações obtidas com a indústria geradora do resíduo neste estudo, a produção mínima mensal do mesmo é da ordem de 500 toneladas/mês, e o custo envolvendo o transporte e principalmente o descarte em aterro sanitário, é de aproximadamente R$ 70,00 por tonelada.

Portanto para a empresa, o fornecimento do resíduo gratuitamente já implicaria em uma economia financeira anual significante, pois eliminaria os gastos com o transporte e com a disposição do resíduo no aterro sanitário.

Considerando ainda que a indústria está localizada na cidade de Caieiras-SP, limítrofe ao município de São Paulo, existe um contingente imenso de população de baixa renda, no raio de

distância apropriado, e que poderia ser contemplada com uma política habitacional que promovesse a utilização do resíduo nas construções.

Isso tudo indica que, caso se constate viabilidade técnica da utilização do resíduo, existe potencial econômico para o aproveitamento do resíduo na construção civil.

AGOPYAN et al (1990) sugerem haver uma tendência a não se dar aos materiais para fechamento e acabamento a mesma importância técnica conferida aos utilizados para estruturas. Apesar das falhas estruturais ocasionarem maiores riscos à vida humana, o comportamento inadequado dos materiais e componentes de vedação e acabamento provoca a ocorrência das manifestações patológicas mais comuns nos edifícios, com transtornos aos usuários e altas despesas de manutenção.

Com base neste fato, a metodologia proposta procura caracterizar o resíduo resultante da produção de papel para utilização em argamassas, nos seus aspectos físicos e químicos, gerando conhecimento para verificar a viabilidade técnica da sua utilização.

Com relação às argamassas, foram desenvolvidos dois tipos: a de cimento e a de revestimento.

A primeira, denominada *Tipo 1*, cujo objetivo é a utilização em regularizações de pisos e enchimentos de lajes entre outros, é composta por *cimento, areia média, resíduo e superplastificante*.

A segunda, denominada *Tipo 2*, cujo objetivo é a utilização como revestimento em alvenarias de vedação e para assentamento de blocos de alvenaria sem função estrutural, é composta por *cimento, cal, areia média e resíduo*.

As propriedades mecânicas das argamassas de cimento são desenvolvidas a partir das reações de hidratação do cimento, enquanto que nas argamassas de revestimento com cal

incorporado, as propriedades mecânicas resultam principalmente do processo de carbonatação do hidróxido de cálcio.

De acordo com SELMO (1989), a resistência mecânica é a propriedade das argamassas de possuírem um estado de consolidação interna, capaz de suportar ações mecânicas das mais diversas naturezas, que se traduz em geral, por tensões simultâneas de tração, compressão e cisalhamento.

Portanto, as argamassas devem ter a capacidade de resistir a essas tensões, que geralmente são geradas por atrito, impacto e alterações volumétricas oriundas de variações térmicas.

A permeabilidade à água, é uma propriedade importante para as argamassas de cimento, pois ela identifica a possibilidade de passagem de água através do material, que pode ocorrer através de infiltração por pressão, por capilaridade ou ainda por difusão de vapor d'água através dos condutos capilares. Portanto, é a permeabilidade à água que relaciona o nível de proteção que as argamassas de cimento podem oferecer contra a ação das intempéries.

Outra propriedade relevante para as argamassas, é a capacidade de aderência. Essa propriedade permite à camada de revestimento resistir às tensões normais ou tangenciais atuantes na interface com o substrato. Nas argamassas de revestimento, a capacidade de aderência é feita através de ensaios de arrancamento por tração em corpos-de-prova cortados transversalmente ao revestimento.

Em função dessas propriedades descritas, foram então conduzidos para os compósitos *Tipo 1 (argamassas de cimento)*, três ensaios independentes, sendo que nos dois ensaios iniciais, de compressão simples e de tração na compressão diametral, foram determinadas as propriedades mecânicas dos compósitos. No terceiro ensaio, foi determinada a absorção de água por capilaridade.

Para os compósitos *Tipo 2 (argamassas de revestimento)*, foram realizados ensaios iniciais de compressão simples e de tração na compressão diametral para determinação das propriedades mecânicas. Foi também realizado o ensaio da resistência de aderência à tração. Finalmente, uma argamassa de revestimento foi aplicada em um painel de alvenaria para verificar as condições de aplicação e o seu comportamento ao longo do tempo.

7.1 Caracterização do resíduo

A caracterização do resíduo em seus aspectos químicos e físicos foi feita para avaliar a viabilidade técnica do seu uso como material incorporado nas argamassas, fornecendo subsídios prévios para os ensaios realizados posteriormente.

7.1.1 Caracterização química

No laboratório do Instituto de Química da Unicamp, foram feitos os ensaios de caracterização e quantificação de materiais orgânicos e inorgânicos presentes no resíduo em questão.

7.1.2 Caracterização física

A caracterização física do resíduo foi assim determinada:

- *teor de umidade*: obtida através do uso do secador infravermelho IRP-150, a 110º C, evitando-se a combustão da matéria orgânica presente no resíduo em temperaturas mais elevadas;

- *massa específica*: de acordo a NBR 9776 (Determinação da Massa Específica de Agregados Miúdos por Meio do Frasco de Chapman).

7.2 Materiais e dosagem

Em função da alta absorção de água pela celulose, a presença de finos no resíduo, e também em função de uma avaliação prévia, a relação água/cimento (a/c) foi fixada em 0,65 para os compósitos de argamassa *Tipo 1*, sendo que um superplastificante foi utilizado para a dispersão das partículas.

Com relação aos compósitos de argamassa *Tipo 2*, a relação água/aglomerante (a/g) foi a necessária para a obtenção de consistência plástica e da trabalhabilidade adequada para utilização em revestimentos. Avaliações anteriores mostraram que para essa argamassa, a relação água/aglomerante não deveria ser inferior a 0,98 quando incorporado 5% de resíduo.

O cimento utilizado nas moldagens dos compósitos, foi o CPII-E 32 (cimento Portland composto com escória – classe 32), pois este é um produto usualmente empregado na construção civil e a cal hidrata utilizada nos compósitos foi a do tipo CH-III e de acordo com a NBR-7175. O superplastificante utilizado era isento de cloretos, com massa específica de 1,16 ± 0,02 g/cm^3 a 25º C, com teor de 31,0% ± 1,55 de sólidos.

O resíduo foi utilizado nas condições em que se encontrava no momento do descarte, ou seja, sem secagem. A umidade presente no resíduo foi corrigida na água de amassamento, e as porcentagens de adição de resíduo, referem-se à massa de resíduo descontando-se a água.

7.3 Corpos-de-prova

Os corpos-de-prova foram moldados em formato cilíndrico e com as dimensões de 5x10 cm, através de uma adaptação das especificações da norma NBR 7215 para argamassas. Essa adaptação, relação água/aglomerante > 0.48, foi necessária em função da grande absorção de água por parte do resíduo. Os corpos-de-prova, para os dois tipos de argamassa, foram utilizados nos ensaios de resistência mecânica à compressão, nos ensaios de resistência mecânica à tração na compressão diametral e nos ensaios de determinação da absorção de água por capilaridade.

7.3.1 Escolha dos traços

7.3.1.1 Compósito *Tipo 1* (CPT1) - argamassa de cimento

Para os compósitos *Tipo 1*, com relação a/c= 0,65, os corpos-de-prova foram moldados conforme o descrito na Tabela 7.1:

Tab.7.1 – Traços experimentais dos compósitos Tipo 1

NOME	CIMENTO (em massa)	AREIA MÉDIA (em massa)	RESÍDUO (% de adição em relação à massa de cimento)[1]
M1	1	3	0 %
M2	1	3	5 %
M3	1	3	10 %
M4	1	3	15 %
M5	1	3	20 %

Obs: relação a/c=0,65 para todos.
[1] descontada a umidade presente no resíduo

Em função da característica pastosa do resíduo, foi necessário um tempo de mistura maior que o estabelecido pela NBR 7215, para que houvesse uma homogeneização adequada nos compósitos. As seqüências de mistura, com os respectivos tempos e velocidade de agitação, são apresentadas na Tabela 7.2.

Tab. 7.2 – Seqüência, tempo e velocidade de mistura dos compósitos Tipo 1

MISTURA	COMPONENTES	TEMPO DA MISTURA	VELOCIDADE
A	Água + superplastificante		
B	A + resíduo	2 minutos	Baixa
C	B + cimento	2 minutos	Baixa
D	C + areia	2 minutos	Baixa
D		2 minutos	Alta

7.3.1.2 Compósito *Tipo 2* (CPT2) - argamassas de revestimento

Para os compósitos *Tipo 2*, com relação a/g= 0,98, os corpos-de-prova foram moldados conforme a Tabela 7.3.

Tab. 7.3 – Traços experimentais dos compósitos Tipo 2

NOME	CIMENTO (em massa)	CAL (em massa)	AREIA MÉDIA (em massa)	RESÍDUO (% de adição em relação à massa de aglomerante)[1]
M6	1	2	9	0 %
M7	1	2	9	5 %
M8	1	2	9	10 %
M9	1	2	9	15 %

Obs: relação a/g=0,98 para todos.
[1] descontada a umidade presente no resíduo

As seqüências da mistura, com os respectivos tempos e velocidade de agitação, são apresentadas na Tabela 7.4.

Tab. 7.4 – Seqüência, tempo e velocidade de mistura dos compósitos Tipo 2

MISTURA	COMPONENTES	TEMPO DA MISTURA	VELOCIDADE
E	Água + resíduo	2 minutos	Baixa
F	E + cimento + cal	2 minutos	Baixa
G	F + areia	2 minutos	Baixa
G		2 minutos	Alta

7.4 Ensaio de resistência à compressão axial

Para os ensaios de resistência à compressão axial, foram utilizados quatro corpos-de-prova para cada traço, confeccionados a partir dos moldes recomendados pela ABNT para argamassa, nas dimensões 5x10 cm. Os ensaios, para os compósitos *Tipo 1*, foram realizados aos 3, 7 e 28 dias a partir da data de moldagem dos corpos-de-prova. Para os compósitos *Tipo 2*, os ensaios foram realizados aos 28 dias a partir da data de moldagem dos corpos-de-prova.

Para a determinação dos valores da resistência à compressão axial, foi empregado o método normalizado de acordo com a NBR 7215. Neste método, os esforços de compressão axial são exercidos até que ocorra a ruptura do corpo-de-prova (Fig. 7.1).

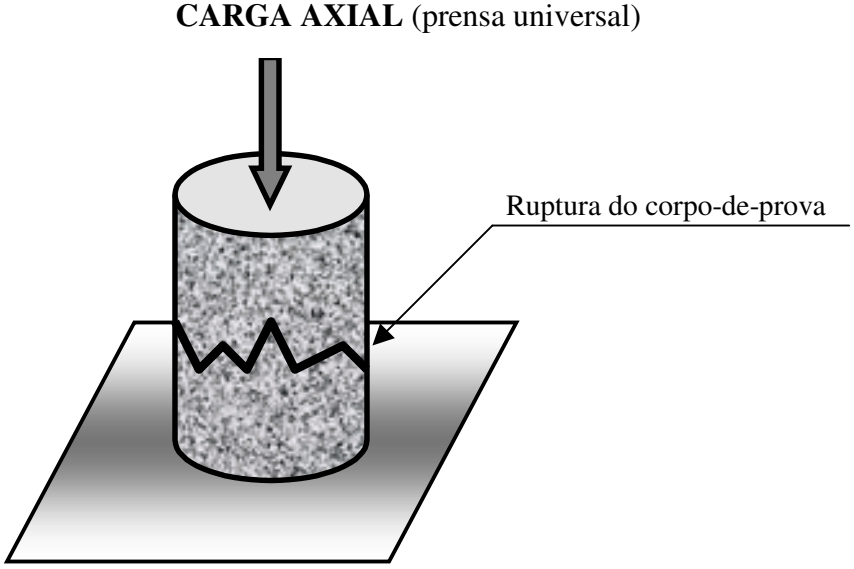

Fig. 7.1 –Esquema da solicitação de carga axial no corpo-de-prova

O equipamento utilizado para o ensaio foi a prensa do Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção da Faculdade de Engenharia Civil da Unicamp, marca Versa-Test, e foram seguidas as especificações da norma NBR 6156.

7.5 Ensaio de resistência à tração na compressão diametral

Para a determinação dos valores da resistência à tração na compressão diametral, foi empregado o método normalizado de acordo com a NBR 7222. Neste método, o corpo-de-prova é submetido a um esforço de compressão no sentido transversal, sendo que para cada incremento

de esforço ocorrerá uma tensão de tração diametral correspondente, até que se provoque a ruptura diametral. Neste ponto, o esforço de compressão é tal que produz tensão de tração que excede a resistência à tração característica da amostra.

O contato entre o corpo-de-prova e os pratos da prensa universal deu-se somente ao longo de duas geratrizes diametralmente opostas do corpo-de-prova. Admite-se a colocação, entre os pratos e o corpo-de-prova, de duas tiras de fibra de madeira, conforme especificado na norma NBR 10024 (Fig. 7.2).

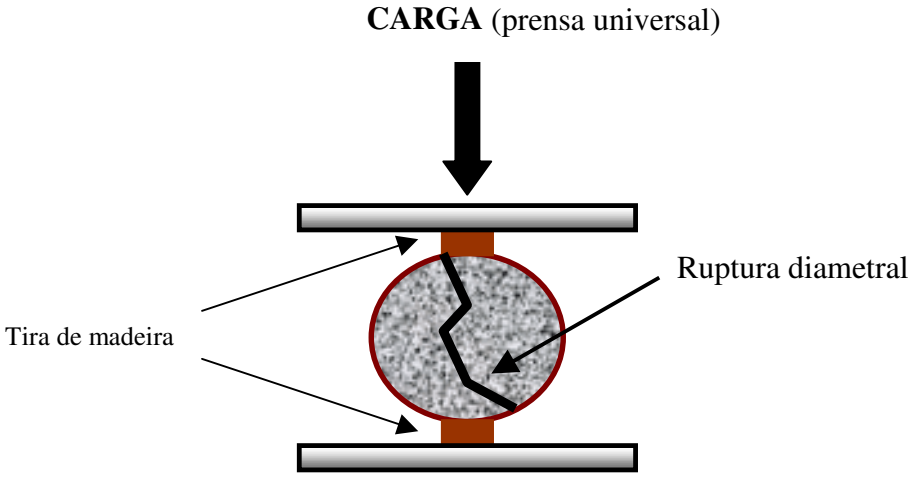

Fig. 7.2 –Disposição do corpo-de-prova no ensaio de tração

A resistência à tração por compressão diametral foi calculada pela seguinte expressão:

$$f_{t,D} = \frac{2 . F}{\pi . d . \lambda} \qquad (7.1)$$

onde,

$f_{t,D}$ = resistência à tração por compressão diametral (Mpa);

F = carga máxima de ruptura obtida no ensaio (kN);

d = diâmetro do corpo-de-prova (mm); e,

λ = altura do corpo-de-prova (mm).

7.6 Determinação da absorção de água por capilaridade

A porosidade em compósitos de cimento, geralmente expressa em porcentagem, é a medida da proporção do volume total ocupado pelos poros. O volume de poros é um fator preponderante para a capacidade do compósito em resistir a carga, enquanto que a permeabilidade é afetada pelo intercomunicabilidade dos poros. Ou seja, caso o volume de poros seja grande e os poros estejam interligados, a permeabilidade é alta. Por outro lado, se os poros forem descontínuos, a permeabilidade será baixa, mesmo com um elevado volume de poros (NEVILLE, 1997).

Para a análise da microestrutura e da porosidade dos materiais, a determinação da absorção de água é um ensaio usualmente utilizado. Em materiais compostos com cimento, a permeabilidade influencia diretamente na durabilidade.

Define-se a absorção de água por capilaridade como sendo a massa de água por unidade de área que pode ser absorvida pelos capilares quando a amostra se encontra em contato com a água. No procedimento do ensaio, essa quantidade é medida pelo ganho de massa da amostra em água.

No ensaio, os corpos-de-prova foram colocados em uma camada de água, com nível constante de 0,5 cm.

As faces laterais das amostras foram protegidas com a aplicação de uma película de parafina, para evitar tanto a evaporação como a penetração de água, direcionando o fluxo em um único sentido (Fig. 7.3).

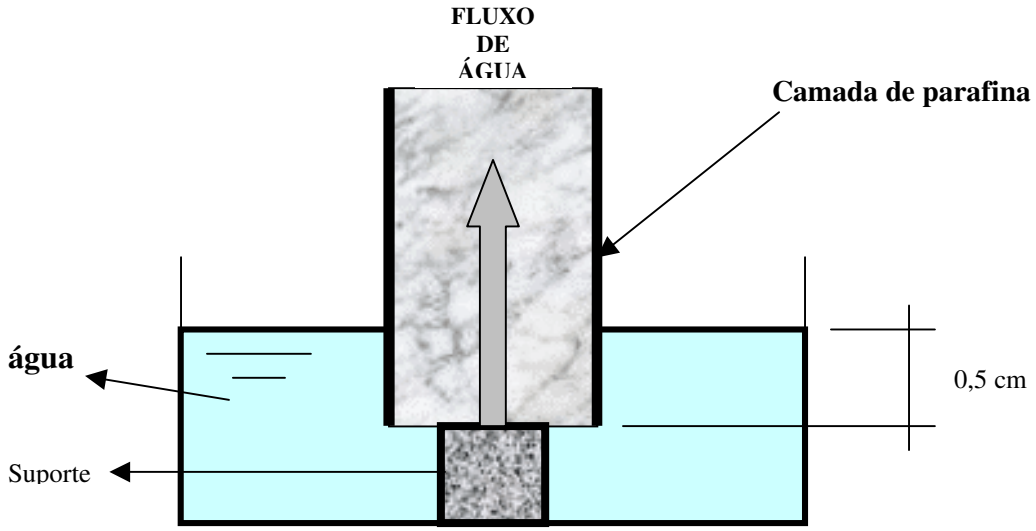

Fig. 7.3 –Esquema do ensaio de absorção de água por capilaridade

Posteriormente, a massa de água absorvida por amostra foi obtida através de sucessivas pesagens, eliminando-se a película de água retida na superfície inferior da amostra através de um pano úmido.

Em sala apropriadamente climatizada a 20^{o}C, os ensaios aos 28 dias, para os compósitos M1, M2, M3 e M4, tiveram a duração de 24 horas, com pesagens efetuadas seqüencialmente, após decorridos 1/12 h, 1/6 h, 1/4 h, 1/2 h, 1 h, 2 h, 4 h, 6 h, 8h e 24 h.

Após o ensaio de absorção, os corpos-de-prova foram rompidos à tração na compressão diametral, observando-se a altura de penetração da água após 24 horas.

7.7 Determinação da resistência de aderência à tração

A aderência é a propriedade do revestimento de resistir a tensões normais ou tangenciais atuantes na interface com o substrato. A resistência de aderência à tração é definida como a tensão máxima suportada por um corpo-de-prova de revestimento, na interface em avaliação, quando submetido a um esforço normal de tração. Para a determinação dos valores da resistência de aderência à tração, foi empregado o método normalizado de acordo com a NBR 13528

Para a realização dos ensaios, foram utilizados blocos de concreto (19 x 19 x 19 cm) revestidos com as argamassas do *Tipo 2*. Os revestimentos foram moldados em quatro blocos para cada traço desenvolvido, com e sem chapisco, sendo que não foi utilizado adesivo acrílico. No procedimento, para a definição da área de 50 mm de diâmetro dos corpos-de-prova a serem ensaiados, os revestimentos foram cortados com uma serra de copo circular. Em seguida foram coladas placas metálicas não deformáveis com os mesmos diâmetros dos corpos-de-prova (50 mm), e com dispositivos articulados nos centros para o acoplamento do equipamento de tração. As articulações são necessárias para garantir a aplicação do esforço de tração simples (Fig. 7.4).

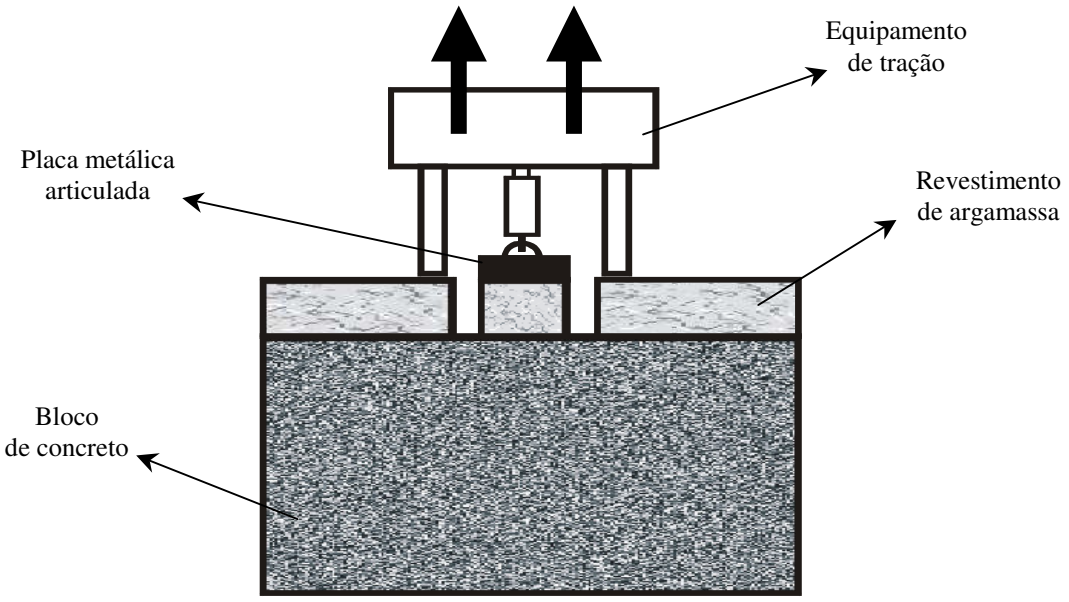

Fig. 7.4 –Esquema do ensaio da resistência de aderência à tração

A resistência de aderência à tração foi calculada pela seguinte expressão:

$$Ra = \frac{P}{A} \qquad (7.2)$$

onde,

Ra = resistência de aderência à tração (Mpa);

P = carga máxima de ruptura obtida no ensaio (N); e,

A = área da placa metálica (mm^2)

A ruptura nem sempre ocorre na interface entre o revestimento e o substrato. A Figura 7.5 apresenta as formas de ruptura possíveis, com suas denominações.

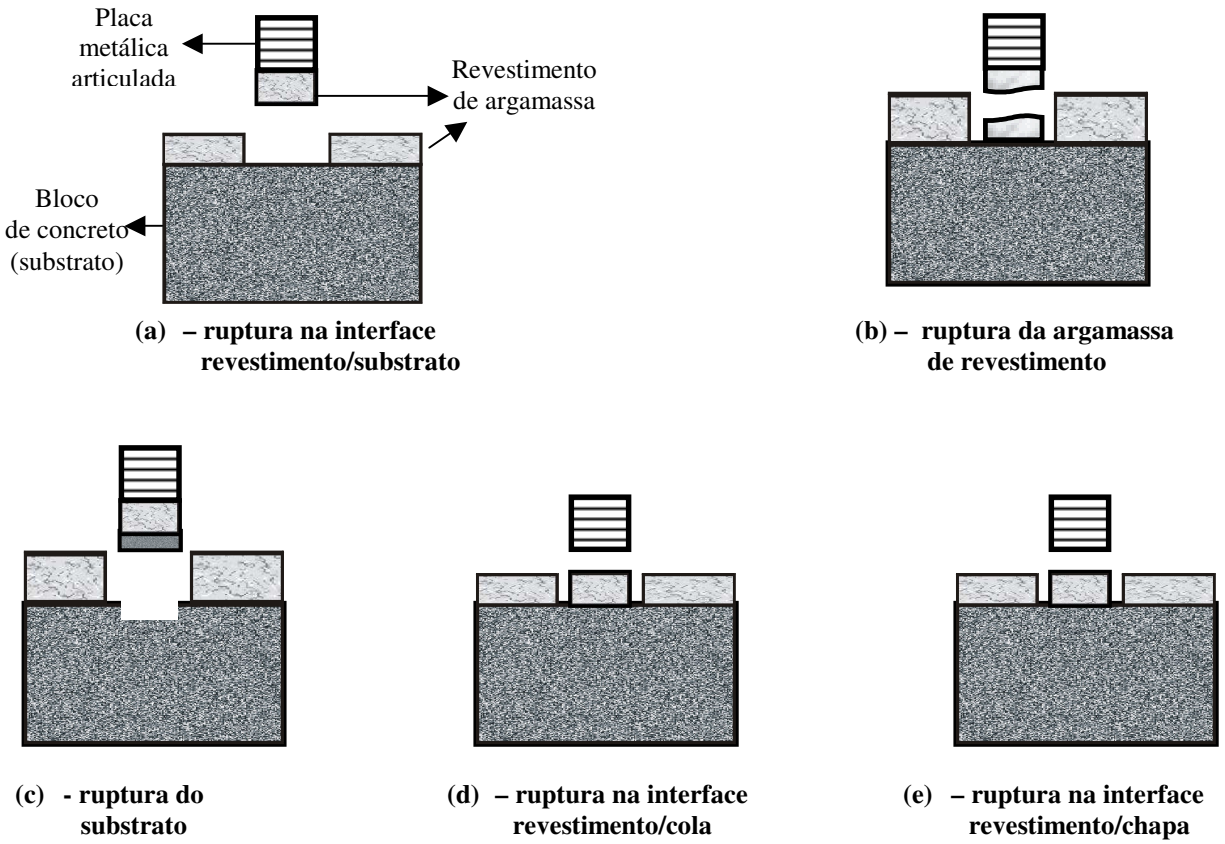

Fig. 7.5 – Formas de ruptura na determinação da resistência de aderência à tração.

7.8 Verificação do comportamento da argamassa de revestimento em um painel de alvenaria

Esta verificação teve por objetivo avaliar o comportamento de uma argamassa de revestimento (compósito *Tipo 2*) em um painel de alvenaria, tais como a dificuldade de aplicação, possibilidade de se conseguir um acabamento homogêneo, liso, e possível aparecimento de alguma patologia (fissuras, gretamento, desprendimento ou empolamentos) nos 28 dias subseqüentes à sua aplicação.

Especialmente neste ensaio, foi utilizada uma relação água / aglomerante de 1,20 no traço M8.

A análise pós-aplicação do revestimento no painel de alvenaria foi realizada por meio de observação visual (com lente de aumento) e tátil ao longo do tempo.

No momento da aplicação da argamassa de revestimento, foi verificada também a capacidade de retenção da argamassa na alvenaria.

8 RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES

Para evitar a introdução de uma variável que pudesse interferir nos resultados, já que a quantidade de material orgânico e inorgânico no resíduo da fabricação do papel pode sofrer alteração em função da produção, em todos os ensaios realizados, os resíduos utilizados foram de uma mesma amostra.

8.1 Caracterização química do resíduo

8.1.1 Observação da amostra

A Figura 8.1 apresenta micrografias da amostra do resíduo, em aumentos diferentes, após imersão em água e posterior secagem sobre lâmina de vidro, em estufa, à temperatura de 100º C. As observações foram realizadas em um estéreomicroscópio Leica, modelo MZ 12,5 e o registro das observações foi feito por meio de uma câmera de vídeo colorida Sony SSC-C374, acoplada ao estéreomicroscópio.

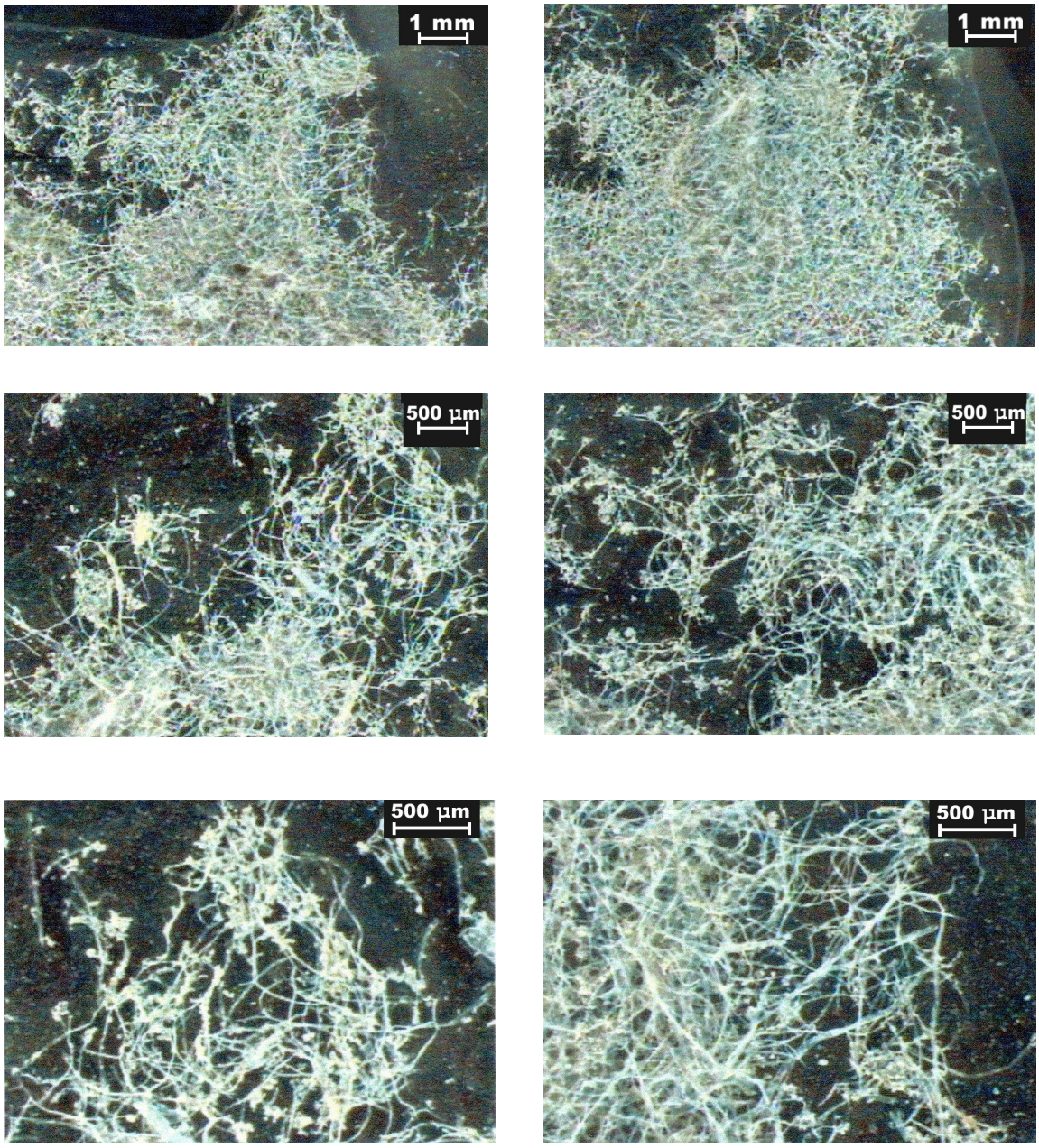

Fig. 8.1 –Micrografias da amostra do resíduo

8.1.2 Teor de umidade da amostra

A amostra foi seca em estufa à temperatura de 100º C por 24 horas. O teor de umidade, obtido gravimetricamente, foi de 68% em massa.

8.1.3 Calcinação da amostra

A amostra foi calcinada em forno mufla à temperatura de 300 a 500º C por aproximadamente 3 horas. O ensaio foi realizado em duplicata de amostras e ambas as amostras apresentaram uma massa residual de 46 % após 300º C e 43 % após 500º C, em massa.

8.1.4 Caracterização por infravermelho

A amostra, após seca em estufa a 100º C, e amostras residuais da calcinação foram analisados por espectroscopia no infravermelho. A técnica de preparação de amostra utilizada foi a pastilha de KBr (a amostra foi macerada juntamente com KBr e depois prensada para obtenção de uma pastilha circular com 13 mm de diâmetro). Utilizou-se um espectofotômetro FT-IR, marca Perkin Elmer, modelo 16 PC. A Figura 8.2 apresenta o espectro obtido da amostra. Sugere-se que a amostra seja uma mistura de celulose e caulim. As Figuras 8.3 e 8.4 apresentam os espectros de celulose e caulim da literatura, para comparação. As Figuras 8.5 a 8.7 apresentam os espectros dos resíduos da calcinação após 300, 400 e 500º C, respectivamente. Após 300º C vê-se que praticamente toda a celulose foi removida e o espectro assemelha-se ao do caulim encontrado na literatura.

Fig. 8.2 –Espectro no infravermelho da amostra do resíduo, após seco em estufa à 100º C

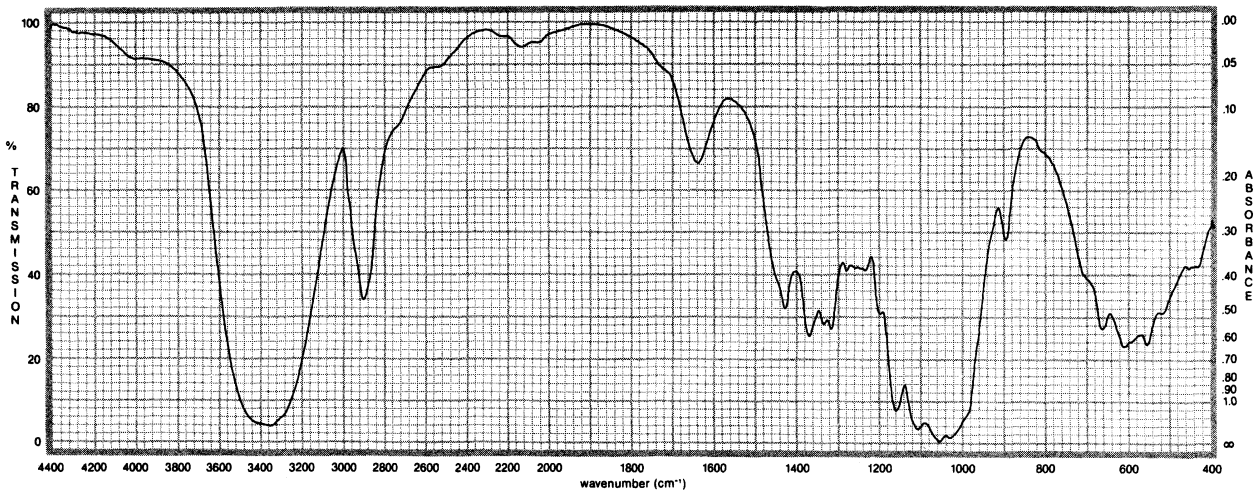

Fig. 8.3 –Espectro no infravermelho da alfa-celulose (pureza 99,5%) da literatura, obtido por pastilha de KBr. (Fonte: SPROUSE COLLECTION OF INFRARED SPECTRA, 1987)

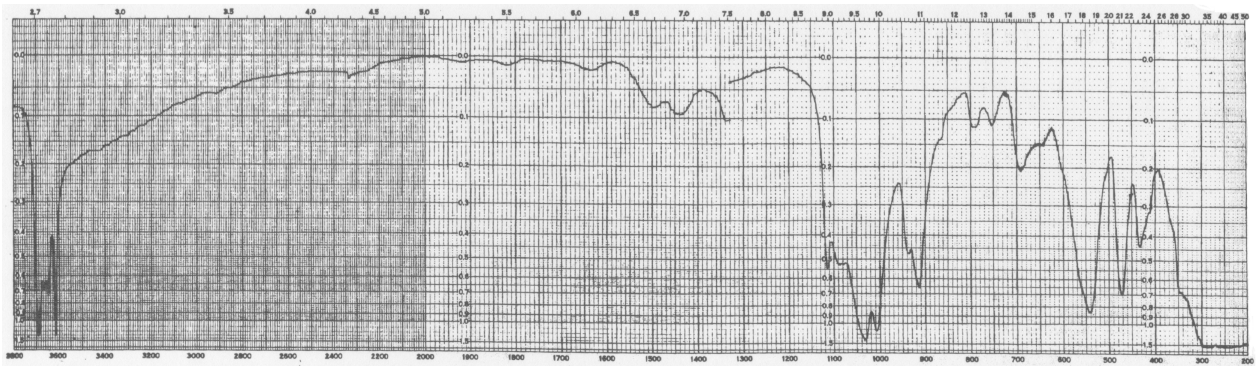

Fig. 8.4 –Espectro no infravermelho da argila caulim da literatura (Fonte: NYQUIST R.A. & KAGEL R.O., 1971)

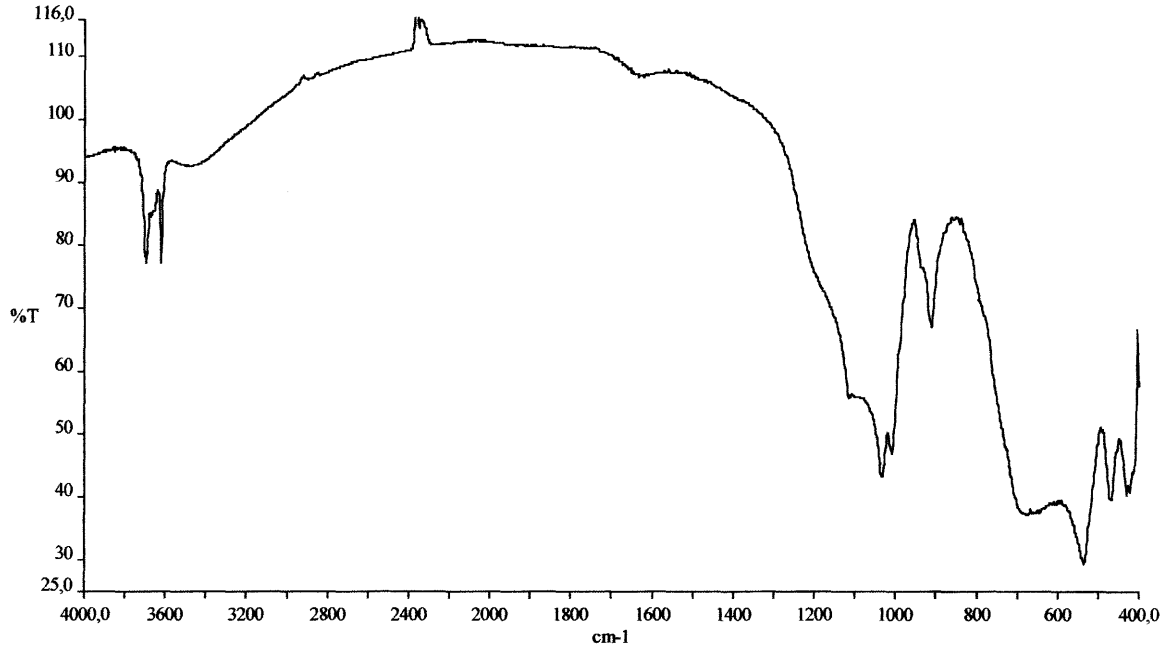

Fig. 8.5 –Espectro no infravermelho do resíduo, após calcinado à 300º C.

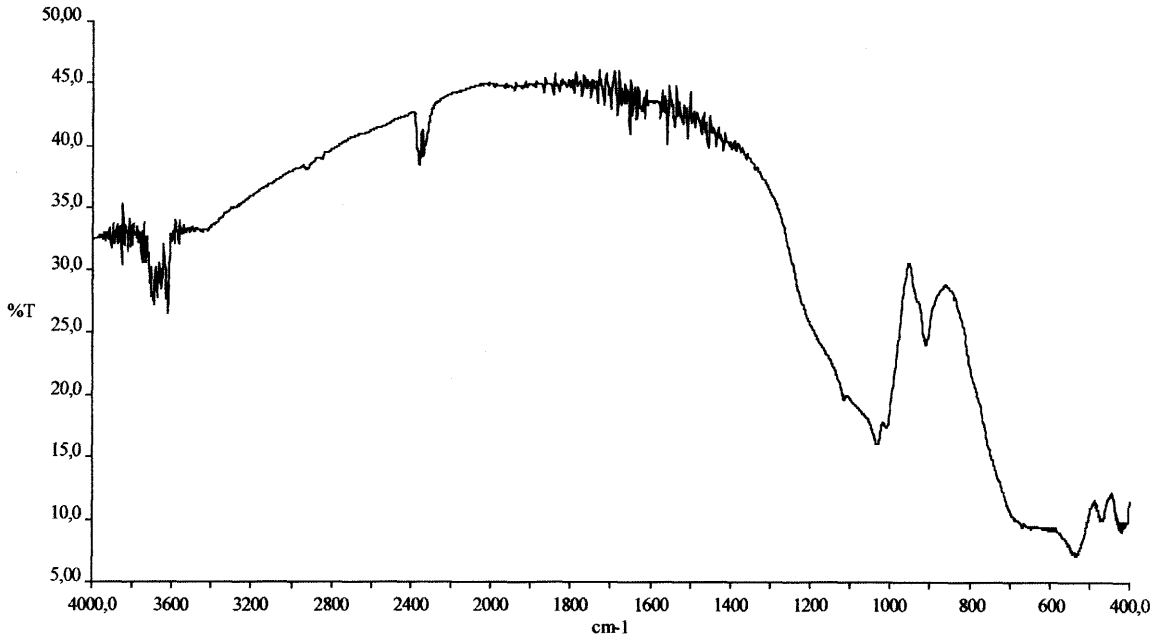

Fig. 8.6 –Espectro no infravermelho do resíduo, após calcinado à 400º C.

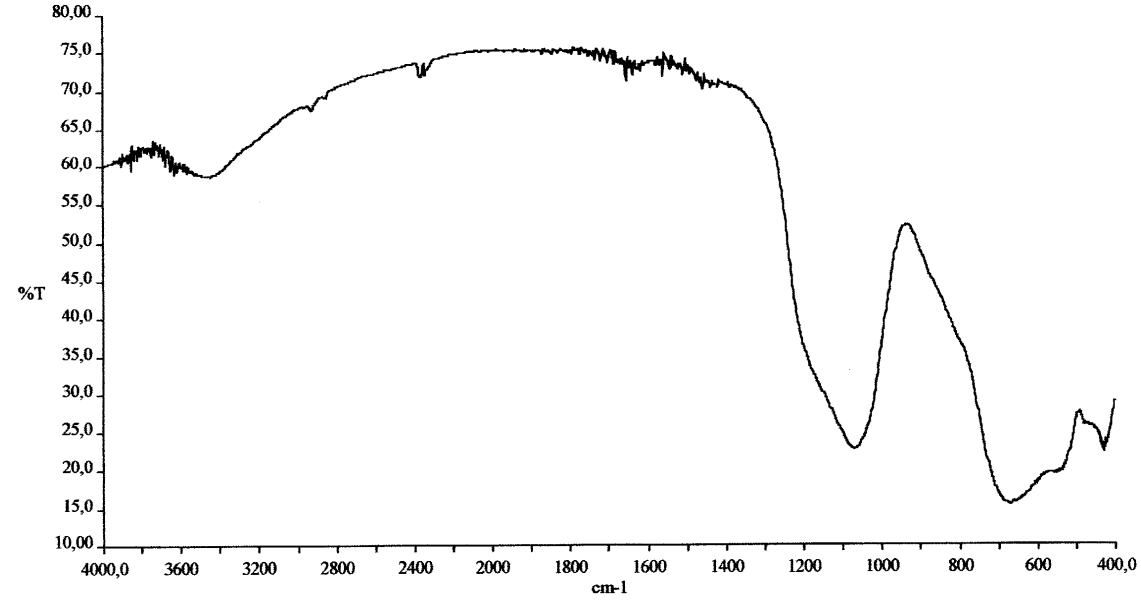

Fig. 8.7 –Espectro no infravermelho do resíduo, após calcinado à 500º C.

Os ensaios de caracterização do resíduo foram realizados no Instituto de Química da Unicamp, no laboratório da Profa. Inês Joekes, por Dircilei de Fátima Maciel (técnica do laboratório) e Nádia Segre.

8.2 Caracterização física do resíduo

8.2.1 Determinação da umidade do resíduo

Para a determinação da quantidade de água presente no resíduo foi utilizado o secador infravermelho IRP-150, a 110º C, e foram realizados oito ensaios e sempre antes de moldagem dos corpos-de-prova.

Na determinação do ensaio de umidade, parte da amostra coletada foi colocada na balança do secador, verificando-se sua massa inicial. Em seguida, a amostra foi submetida à secagem artificial através de raios infravermelhos, sendo verificado eletronicamente a constância de massa. O ensaio foi finalizado automaticamente pelo aparelho (Fig. 8.8), com a indicação da massa final, considerada seca.

Fig. 8.8 –Secador Infravermelho IRP-150

A quantidade de água presente no resíduo, em porcentagem, foi determinada através da seguinte equação:

$$W = \frac{(Pu - Ps) * 100}{Pu} \qquad (8.1)$$

onde,

W = quantidade de água no resíduo (%);

Pu = massa da amostra do resíduo úmido (g); e,

Ps = massa da amostra do resíduo seco (g).

A Tabela 8.1 apresenta os resultados dos ensaios do teor de umidade do resíduo.

Tab. 8.1 – Ensaios do teor de umidade no resíduo

Amostra	***Pu*** *(g)*	***Ps*** *(g)*	***W*** *(% de água)*
1	3,11	1,05	66,2
2	6,56	2,01	69,4
3	6,87	2,15	68,7
4	4,45	1,52	65,8
5	3,23	1,12	65,3
6	5,76	1,68	70,8
7	5,02	1,51	69,9
8	5,66	1,64	71,0
		Wm =	68,4

Obs: *Wm* = média das porcentagens de água obtidas

A porcentagem média de água (*Wm= 68.4%*) presente no resíduo, ficou dentro da faixa indicada pela indústria geradora do resíduo.

8.2.2 Determinação da massa específica pelo frasco de Chapman

A massa específica foi determinada de acordo com a norma NBR 9776, utilizando-se o resíduo com pesos próximos a 75 g e com volume de 350 cm^3 de água. O procedimento constou da colocação da água no frasco e em seguida o resíduo (seco até a constância de massa), agitando-se a mistura até a eliminação das bolhas existentes. Em seguida, foi coletada a leitura do nível atingido pela água indicando o volume em cm^3 ocupado pela mistura. Foram realizados quatro ensaios e a massa específica do resíduo foi calculada mediante a equação:

$$\rho = \frac{Wr}{L - 350} \qquad (8.2)$$

onde,

ρ = massa específica do resíduo (g/cm^3);

Wr = massa da amostra do resíduo seco (g); e,

L = leitura do volume ocupado pela mistura no frasco (cm^3).

A Tabela 8.2 apresenta os resultados dos ensaios da determinação da massa específica do resíduo por meio do frasco de Chapman, onde ρ_m é a média dos resultados obtidos em g/cm^3.

Tab. 8.2 – Determinação da massa específica do resíduo.

Wr (g)	**Água** (cm^3)	**L** (cm^3)	ρ (g/cm3)
76.25	350.00	400.00	1.53
76.34	350.00	401.00	1.50
73.20	350.00	398.00	1.53
73.20	350.00	399.00	1.49
		$\rho_{m=}$	1.51 (g/cm3)

Fig. 8.9 – Frascos de Chapman utilizados nos ensaios de determinação da massa específica.

8.3 Ensaios dos Compósitos Tipo 1 (CPT1) - Argamassa de cimento

8.3.1 Resistência à compressão simples

Para o ensaio de resistência à compressão axial, foram utilizados quatro corpos-de-prova para os traços M1 (0% de adição), M2 (5% de adição), M3 (10% de adição), M4 (15% de adição) e M5 (20% de adição), que foram confeccionados a partir dos moldes recomendados pela ABNT para argamassa, nas dimensões 5x10 cm. Logo após a moldagem, os corpos-de-prova permaneceram em ambiente com temperatura e umidade controladas até às datas dos respectivos ensaios.

Os ensaios foram realizados aos 3, 7 e 28 dias a partir da data de moldagem dos corpos-de-prova e apresentaram os seguintes resultados (Fig. 8.10 e Fig. 8.11):

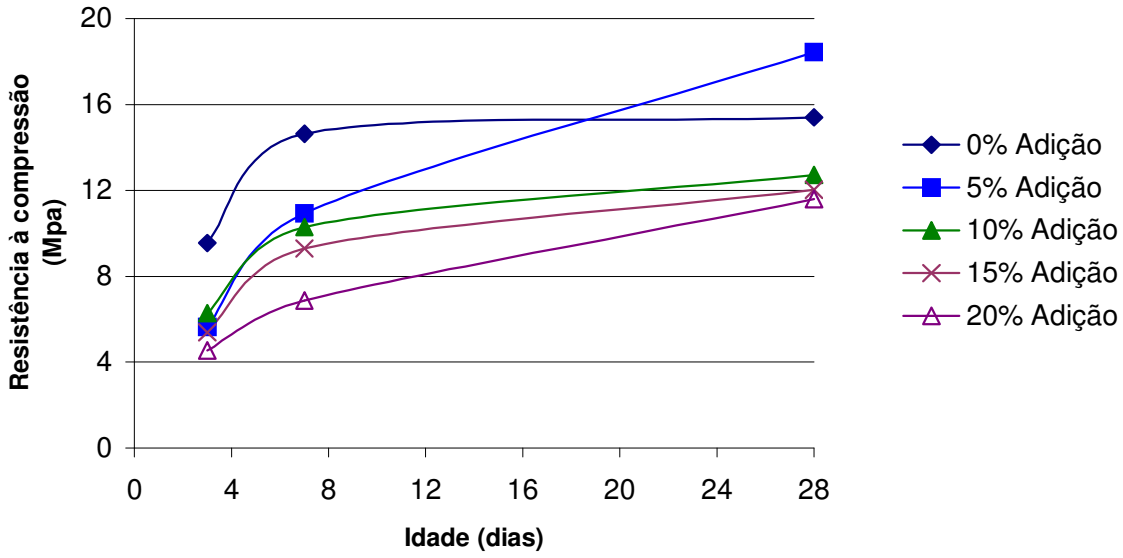

Fig. 8.10 –Resistência à compressão axial em função da idade da amostra (CPT1)

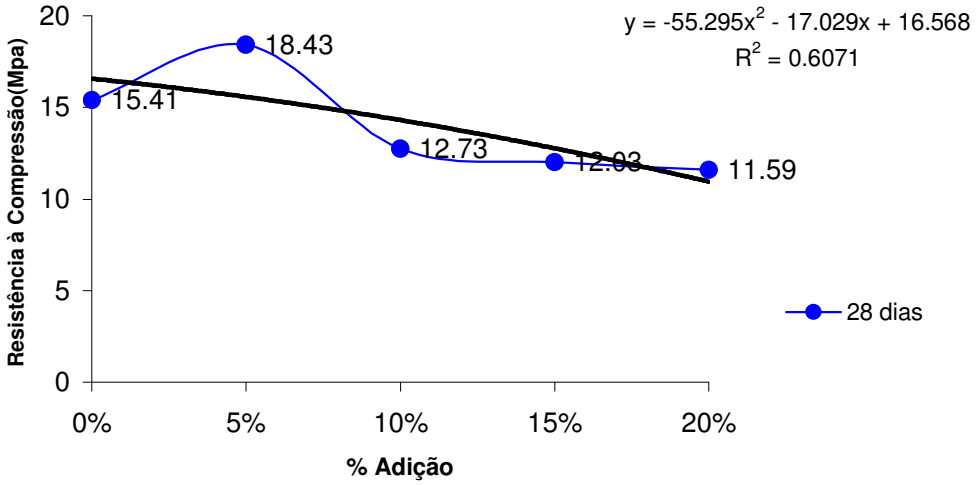

Fig. 8.11 –Resistência à compressão axial aos 28 dias em função da % de adição (CPT1)

Os resultados apresentados, indicam que, aos 3 dias, a resistência à compressão sofreu redução com o acréscimo da adição de resíduo, tendência essa que se manteve aos 7 dias. Porém aos 28 dias, esse comportamento foi alterado pelo compósito M2 (5 % de adição), que apresentou um ganho de resistência com relação ao compósito M1 (0 % de adição). Para os compósitos M3 (10 % de adição), M4 (15 % de adição) e M5 (20 % de adição), aos 28 dias, com o aumento do teor de adição, os resultados apontaram uma diminuição na resistência à compressão com relação ao compósito M1, mas não tão significativas entre si.

Tab. 8.3 – Resultados dos ensaios da resistência à compressão axial aos 3 dias (CPT1).

Resistência à Compressão Axial "*fck*"						
% adição	**Idade** (dias)	**Carga** (kgf)	***fck*** (Mpa)	***fck$_m$*** (Mpa)	***fck$_m$-fck*** (Mpa)	**Desvio relat$_{Max}$**
0	3	1840	9.37	**9.55**	0.18	1.9%
		1875	9.55		0.00	
		1900	9.68		-0.13	
		~~1700~~	~~8.66~~			
5	3	1085	5.53	**5.64**	0.11	
		1105	5.63		0.01	
		~~1230~~	~~6.26~~			
		1130	5.76		-0.12	-2.1%
10	3	1270	6.47	**6.28**	-0.19	-3.0%
		1260	6.42		-0.14	
		1200	6.11		0.17	
		1200	6.11		0.17	
15	3	~~1175~~	~~5.98~~	**5.38**		
		1085	5.53		-0.14	-2.7%
		1035	5.27		0.11	
		1050	5.35		0.03	
20	3	940	4.79	**4.55**	-0.24	-5.2%
		~~730~~	~~3.72~~			
		855	4.35		0.20	
		885	4.51		0.04	

Obs.: resultados em vermelho e tachados foram desconsiderados, pois diferiram em mais de 6% da média

Tab. 8.4 – Resultados dos ensaios da resistência à compressão axial aos 7 dias (CPT1).

Resistência à Compressão Axial "*fck*"						
% adição	**Idade** (dias)	**Carga** (kgf)	***fck*** (Mpa)	***fck$_m$*** (Mpa)	***fck$_m$-fck*** (Mpa)	**Desvio relat$_{max}$**
0	7	3000	15.28	**14.64**	-0.64	-4.3%
		2825	14.39		0.25	
		~~2500~~	~~12.73~~			
		2800	14.26		0.38	
5	7	2075	10.57	**10.93**	0.36	3.3%
		2190	11.15		-0.22	
		~~2375~~	~~12.10~~			
		2175	11.08		-0.14	
10	7	2015	10.26	**10.30**	0.03	
		2065	10.52		-0.22	-2.1%
		~~1650~~	~~8.40~~			
		1985	10.11		0.19	
15	7	1860	9.47	**9.29**	-0.18	-1.9%
		1820	9.27		0.03	
		1830	9.32		-0.03	
		1790	9.12		0.18	1.9%
20	7	1390	7.08	**6.88**	-0.20	-3.0%
		1320	6.72		0.15	
		~~1175~~	~~5.98~~			
		1340	6.82		0.05	

Obs.: resultados em vermelho e tachados foram desconsiderados, pois diferiram em mais de 6% da média

Tab. 8.5 – Resultados dos ensaios da resistência à compressão axial aos 28 dias (CPT1).

Resistência à Compressão Axial "*fck*"						
% adição	**Idade** (dias)	**Carga** (kgf)	***fck*** (Mpa)	***fck$_m$*** (Mpa)	***fck$_m$-fck*** (Mpa)	**Desvio relat$_{max}$**
0	28	2850	14.51	**15.41**	0.89	5.8%
		3050	15.53		-0.13	
		~~3725~~	~~18.97~~			
		3175	16.17		-0.76	
5	28	3625	18.46	**18.43**	-0.03	
		3625	18.46		-0.03	
		3725	18.97		-0.54	
		3500	17.83		0.60	3.3%
10	28	2400	12.22	**12.73**	0.51	
		2350	11.97		0.76	6.0%
		2625	13.37		-0.64	
		2625	13.37		-0.64	
15	28	2400	12.22	**12.03**	-0.20	
		2320	11.82		0.21	1.7%
		2355	11.99		0.03	
		2370	12.07		-0.04	
20	28	2250	11.46	**11.59**	0.13	
		2360	12.02		-0.43	-3.7%
		2280	11.61		-0.03	
		2210	11.26		0.33	

Obs.: resultados em vermelho e tachados foram desconsiderados, pois diferiram em mais de 6% da média

Fig. 8.12 –Corpos-de-prova capeados para os ensaios de resistência à compressão axial

Fig. 8.13 –Equipamento utilizado para a determinação da resistência à compressão axial

8.3.2 Resistência à tração na compressão diametral

A determinação dos valores da resistência à tração por compressão diametral ($f_{t,D}$), foi empregado o método normalizado de acordo com a NBR 7222.

Para este ensaio, foram utilizados quatro corpos-de-prova para os traços M1 (0% de adição), M2 (5% de adição), M3 (10% de adição), M4 (15% de adição) e M5 (20% de adição), confeccionados a partir dos moldes recomendados pela ABNT para argamassa, nas dimensões 5x10 cm, com duas tiras de fibra de madeira conforme especificado na norma NBR 10024. Logo após a moldagem, os corpos-de-prova permaneceram em ambiente com temperatura e umidade controladas.

Os ensaios foram realizados aos 3, 7 e 28 dias a partir da data de moldagem dos corpos-de-prova e apresentaram os seguintes resultados (Fig. 8.14 e Fig. 8.15):

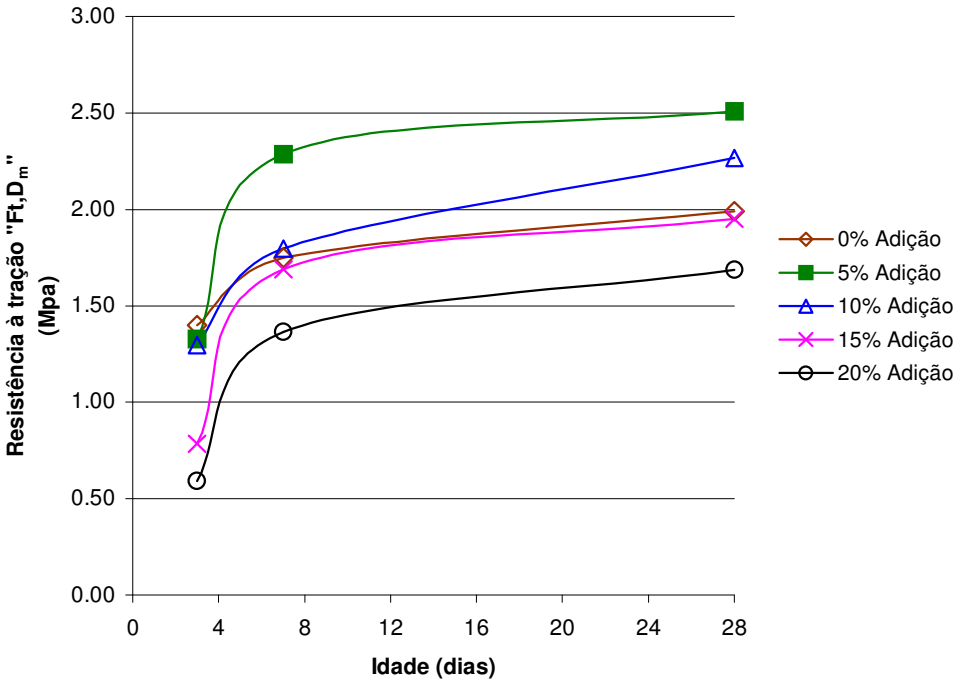

Fig. 8.14 –Resistência à tração na compressão em função da idade da amostra (CPT1)

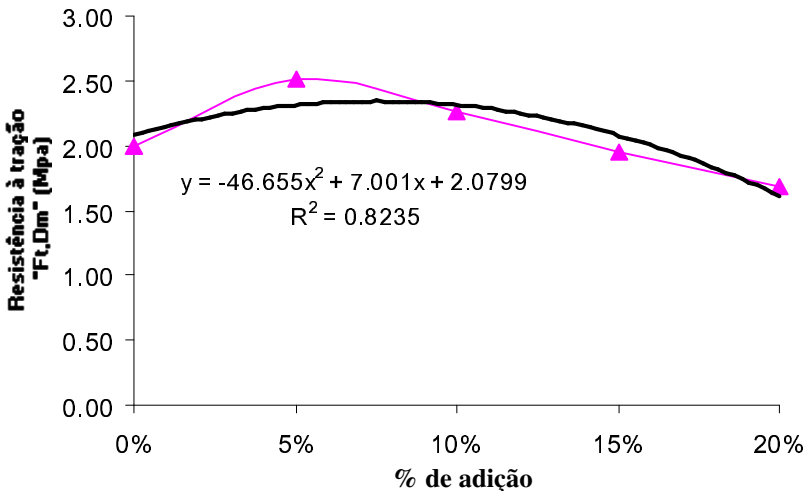

Fig. 8.15 –Resistência à tração na compressão aos 28 dias em função da % de adição (CPT1)

Os resultados obtidos indicam, com relação à amostra sem adição (M1), uma tendência de manutenção ou ganho na resistência à tração na compressão com adição de até 10 % de resíduo. Para adições superiores a 10 % a tendência foi de redução na resistência.

Tab. 8.6 – Resultados dos ensaios da resistência à tração na compressão aos 28 dias (CPT1).

Resistência à tração na compressão aos 28 dias			
% adição	**Carga** (kgf)	$f_{t,D}$ (Mpa)	$f_{t,D\,m}$
0	1650	2.10	**1.99**
	1575	2.01	
	1500	1.91	
	1530	1.95	
5	1950	2.48	**2.51**
	1800	2.29	
	2175	2.77	
	1950	2.48	
10	1935	2.46	**2.27**
	1700	2.16	
	1635	2.08	
	1850	2.36	
15	1675	2.13	**1.95**
	1500	1.91	
	1450	1.85	
	1500	1.91	
20	1325	1.69	**1.69**
	1350	1.72	
	1350	1.72	
	1275	1.62	

8.3.3 Ensaio de absorção de água por capilaridade

Nestes ensaios, os corpos-de-prova foram colocados em uma camada de água, com nível constante a 0,50 cm. As faces laterais das amostras foram protegidas com a aplicação de uma película de parafina, para evitar tanto a evaporação como a penetração de água, direcionando o fluxo em um único sentido.

Para os ensaios aos 28 dias, foram utilizados quatro corpos-de-prova para os traços M1 (0% de adição), M2 (5% de adição), M3 (10% de adição) e M4 (15% de adição), confeccionados a partir dos moldes recomendados pela ABNT para argamassa, nas dimensões 5x10 cm. Logo após a moldagem, os corpos-de-prova permaneceram em ambiente com temperatura e umidade controladas.

Podemos notar nas Figuras 8.16 e 8.17 que, a adição do resíduo na argamassa, implicou no aumento, tanto da absorção quanto na altura de ascensão capilar. É possível notar também que, com o aumento dos teores de adição, a absorção e a ascensão capilar também aumentaram.

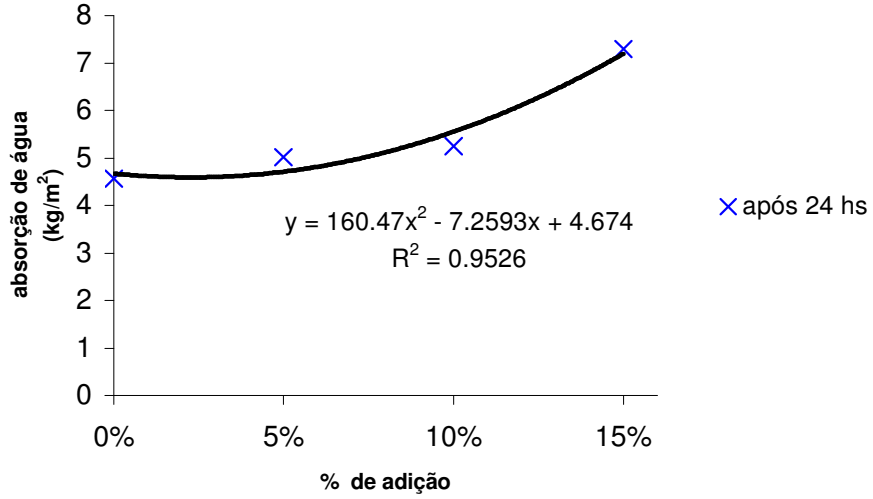

Fig. 8.16 –Absorção de água por capilaridade após 24 h, aos 28 dias de idade

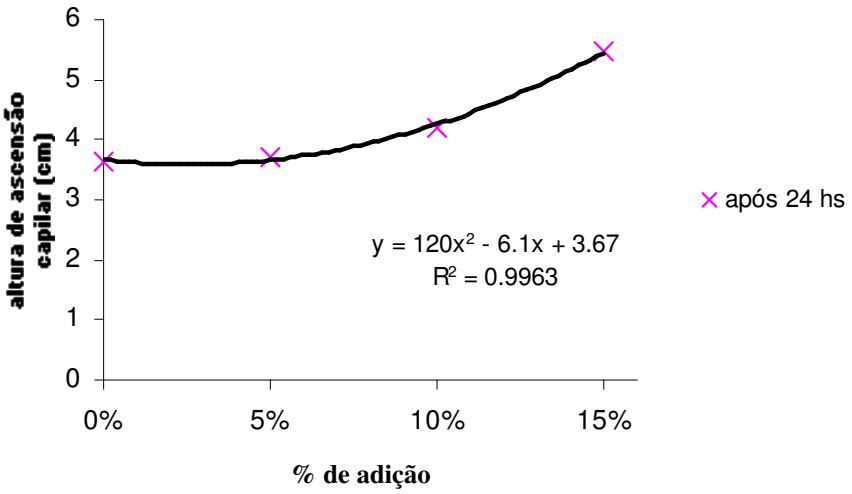

Fig. 8.17 –Altura de ascensão capilar após 24 h, aos 28 dias de idade

Tab. 8.7 – Resultados dos ensaios de absorção capilar aos 28 dias (M1).

M1 (0 % de adição) aos 28 dias										
Leitura	**amostra 1**		**amostra 2**		**amostra 3**		**amostra 4**		**Pm**	**Acm**
(tempo)	Peso (g)	Variação (g)	Peso (g)	Variação (g)	Peso (g)	Variação (g)	Peso (g)	Variação (g)	(g)	(g)
0	370.5	0.0	380.4	0.0	381.0	0.0	380.8	0.0	378.18	0.00
5 min	371.0	0.5	380.9	0.5	381.4	0.4	381.1	0.3	378.60	0.42
10 min	371.6	1.1	381.4	1.0	381.6	0.6	381.6	0.8	379.05	0.88
15 min	371.9	1.4	381.5	1.1	382.0	1.0	381.9	1.1	379.33	1.15
30 min	372.8	2.3	382.3	1.9	382.4	1.4	382.5	1.7	380.00	1.83
01 hora	374.5	4.0	383.6	3.2	383.5	2.5	384.1	3.3	381.43	3.25
02 horas	375.8	5.3	384.6	4.2	384.8	3.8	385.4	4.6	382.65	4.48
04 horas	377.3	6.8	386.1	5.7	386.4	5.4	386.8	6.0	384.15	5.98
06 horas	378.4	7.9	386.9	6.5	387.3	6.3	387.5	6.7	385.03	6.85
08 horas	378.7	8.2	387.2	6.8	387.6	6.6	387.8	7.0	385.33	7.15
24 horas	380.8	10.3	389.1	8.7	389.5	8.5	389.2	8.4	387.15	8.98
hp.=	40		35		35		36			
Acm= acréscimo médio de massa			Pm= peso médio				Hpm (mm) =		**36.5**	
Hpm = altura média de penetração			Absm = absorção média (24 hs)				Absm (g/cm²) =		**4.57**	

Tab. 8.8 – Resultados dos ensaios de absorção capilar aos 28 dias (M2).

M2 (5 % de adição) aos 28 dias										
Leitura	amostra 1		amostra 2		amostra 3		amostra 4		Pm	Acm
(tempo)	Peso (g)	Variação (g)	Peso (g)	Variação (g)	Peso (g)	Variação (g)	Peso (g)	Variação (g)	(g)	(g)
0	400.3	0.0	387.2	0.0	391.7	0.0	394.5	0.0	393.43	0.00
5 min	401.3	1.0	388.0	0.8	392.5	0.8	395.6	1.1	394.35	0.93
10 min	402.0	1.7	388.4	1.2	393.0	1.3	396.3	1.8	394.93	1.50
15 min	402.3	2.0	388.7	1.5	393.3	1.6	396.6	2.1	395.23	1.80
30 min	403.1	2.8	389.4	2.2	394.0	2.3	397.4	2.9	395.98	2.55
01 hora	404.7	4.4	390.7	3.5	395.3	3.6	399.1	4.6	397.45	4.03
02 horas	405.8	5.5	391.9	4.7	396.6	4.9	400.3	5.8	398.65	5.23
04 horas	407.4	7.1	393.4	6.2	398.1	6.4	401.8	7.3	400.18	6.75
06 horas	408.4	8.1	394.4	7.2	399.0	7.3	402.9	8.4	401.18	7.75
08 horas	408.6	8.3	394.6	7.4	399.3	7.6	403.1	8.6	401.40	7.98
24 horas	410.9	10.6	396.2	9.0	401.1	9.4	404.9	10.4	403.28	9.85
hp.=	39		36		36		38			
Acm= acréscimo médio de massa			Pm= peso médio					Hpm (mm) =	37.3	
Hpm = altura média de penetração			Absm = absorção média (24 hs)					Absm (g/cm^2) =	5.02	

Tab. 8.9 – Resultados dos ensaios de absorção capilar aos 28 dias (M3).

M3 (10 % de adição) aos 28 dias										
Leitura	**amostra 1**		**amostra 2**		**amostra 3**		**amostra 4**		**Pm**	**Acm**
(tempo)	Peso (g)	Variação (g)	Peso (g)	Variação (g)	Peso (g)	Variação (g)	Peso (g)	Variação (g)	(g)	(g)
0	395.9	0.0	394.5	0.0	399.1	0.0	390.6	0.0	395.03	0.00
5 min	397.4	1.5	395.7	1.2	400.3	1.2	391.6	1.0	396.25	1.22
10 min	398.2	2.3	396.4	1.9	400.9	1.8	392.5	1.9	397.00	1.97
15 min	398.7	2.8	396.7	2.2	401.2	2.1	392.9	2.3	397.38	2.35
30 min	399.8	3.9	397.2	2.7	402.1	3.0	393.9	3.3	398.25	3.22
01 hora	401.2	5.3	398.5	4.0	403.5	4.4	395.3	4.7	399.63	4.60
02 horas	402.5	6.6	399.5	5.0	404.5	5.4	396.5	5.9	400.75	5.72
04 horas	403.9	8.0	399.9	5.4	405.8	6.7	398.2	7.6	401.95	6.92
06 horas	404.8	8.9	401.8	7.3	406.6	7.5	399.0	8.4	403.05	8.03
08 horas	405.2	9.3	402.2	7.7	406.9	7.8	399.3	8.7	403.40	8.37
24 horas	407.2	11.3	404.1	9.6	408.6	9.5	401.4	10.8	405.33	**10.30**
hp.=	45		41		40		42			
Acm= acréscimo médio de massa			Pm= peso médio					**Hpm (mm) =**	**42.0**	
Hpm = altura média de penetração			Absm = absorção média (24 hs)					**Absm (g/cm^2) =**	**5.25**	

Tab. 8.10 – Resultados dos ensaios de absorção capilar aos 28 dias (M4).

M4 (15 % de adição) aos 28 dias										
Leitura	**amostra 1**		**amostra 2**		**amostra 3**		**amostra 4**		**Pm**	**Acm**
(tempo)	Peso (g)	Variação (g)	Peso (g)	Variação (g)	Peso (g)	Variação (g)	Peso (g)	Variação (g)	(g)	(g)
0	387.4	0.0	392.2	0.0	396.1	0.0	388.1	0.0	390.95	0.00
5 min	389.4	2.0	394.7	2.5	397.9	1.8	390.4	2.3	393.10	2.15
10 min	390.4	3.0	395.5	3.3	398.9	2.8	391.4	3.3	394.05	3.10
15 min	391.1	3.7	396.2	4.0	399.7	3.6	392.1	4.0	394.78	3.83
30 min	392.3	4.9	397.4	5.2	400.9	4.8	393.2	5.1	395.95	5.00
01 hora	394.0	6.6	399.2	7.0	402.8	6.7	395.1	7.0	397.78	6.83
02 horas	395.5	8.1	400.8	8.6	404.3	8.2	396.6	8.5	399.30	8.35
04 horas	397.4	10.0	402.5	10.3	406.2	10.1	398.6	10.5	401.18	10.23
06 horas	398.6	11.2	403.5	11.3	407.3	11.2	399.8	11.7	402.30	11.35
08 horas	399.1	11.7	404.0	11.8	407.8	11.7	400.3	12.2	402.80	11.85
24 horas	402.6	15.2	406.2	14.0	409.9	13.8	402.4	14.3	405.28	**14.33**
hp.=	58		53		53		55			
Acm= acréscimo médio de massa			Pm= peso médio				**Hpm (mm) =**		**54.8**	
Hpm = altura média de penetração			Absm = absorção média (24 hs)				**Absm (g/cm^2) =**		**7.30**	

8.4 Ensaios dos Compósitos Tipo 2 (CPT2) - Argamassa de revestimento

8.4.1 Resistência à compressão simples

Para o ensaio de resistência à compressão axial, foram utilizados quatro corpos-de-prova nos traços M6 (0% de adição), M7 (5% de adição), M8 (10% de adição) e M9 (15% de adição), que foram confeccionados a partir dos moldes recomendados pela ABNT para argamassa, nas dimensões 5x10 cm. Logo após a moldagem, os corpos-de-prova permaneceram em ambiente com temperatura e umidade controladas até às datas dos respectivos ensaios.

Os ensaios foram realizados aos 28 dias a partir da data de moldagem dos corpos-de-prova, e apresentaram os seguintes resultados (Figura 8.18):

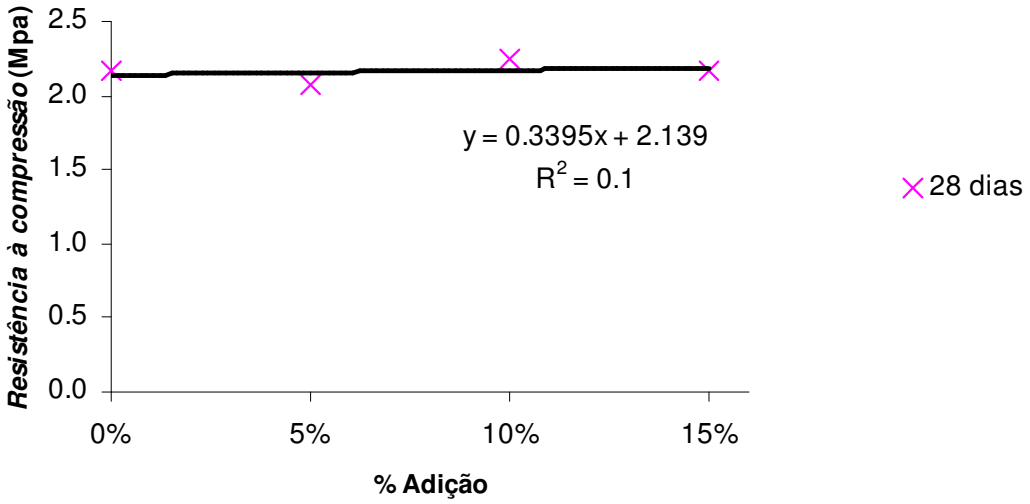

Fig. 8.18 –Resistência à compressão axial aos 28 dias em função da % de adição (CPT2)

Tab. 8.11 – Resultados dos ensaios da resistência à compressão axial aos 28 dias (CPT2).

Resistência à Compressão Axial "*fck*"						
% adição	Idade (dias)	Carga (kgf)	*fck* (Mpa)	fck_m (Mpa)	$fck_m - fck$ (Mpa)	Desvio $relat_{max}$
0	28	450	2.29	2.16	-0.13	-5.9%
		400	2.04		0.13	5.9%
		425	2.16		0.00	0.0%
		~~325~~	~~1.66~~			
5	28	400	2.04	2.08	0.04	2.0%
		425	2.16		-0.08	-4.1%
		~~350~~	~~1.78~~			
		400	2.04		0.04	2.0%
10	28	~~500~~	~~2.55~~	2.25		
		450	2.29		-0.04	-1.9%
		425	2.16		0.08	3.8%
		450	2.29		-0.04	-1.9%
15	28	400	2.04	2.16	0.13	5.9%
		425	2.16		0.00	0.0%
		450	2.29		-0.13	-5.9%
		425	2.16		0.00	0.0%
Obs.: resultados em vermelho e tachados foram desconsiderados, pois diferiram em mais de 6% da média						

8.4.2 Resistência à tração na compressão diametral

A determinação dos valores da resistência à tração por compressão diametral foi determinada de acordo com método descrito no item 8.3.2.

Nos ensaios, foram utilizados quatro corpos-de-prova para os traços M6 (0% de adição), M7 (5% de adição), M8 (10% de adição) e M9 (15% de adição), confeccionados a partir dos moldes recomendados pela ABNT para argamassa, nas dimensões 5x10 cm, com duas tiras de fibra de madeira, conforme especificado na norma NBR 10024. Logo após a moldagem, os corpos-de-prova permaneceram em ambiente com temperatura e umidade controladas.

Os ensaios foram realizados aos 28 dias a partir da data de moldagem dos corpos-de-prova e os resultados (Fig. 8.19) indicaram uma tendência de aumento na resistência à tração na compressão com o aumento da adição de resíduo.

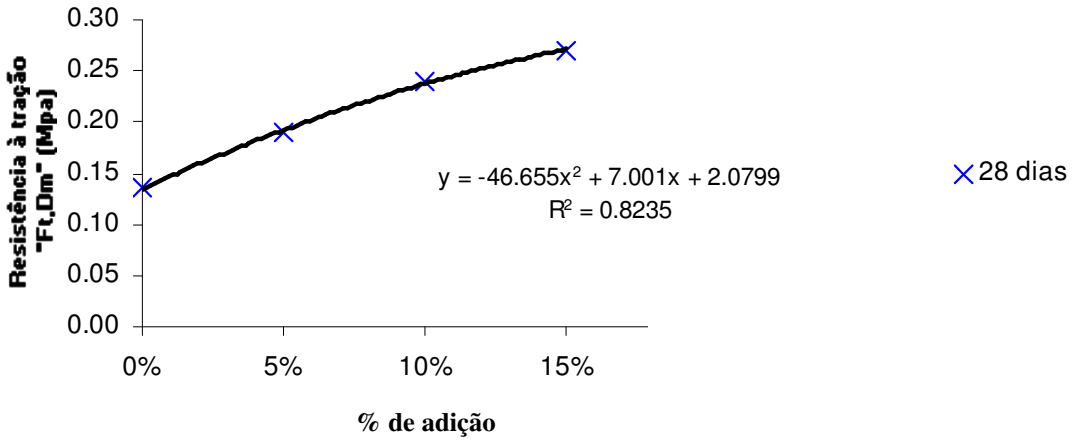

Fig. 8.19 –Resistência à tração na compressão aos 28 dias em função da % de adição (CPT2)

Tab. 8.12 – Resultados dos ensaios da resistência à tração na compressão aos 28 dias (CPT2).

Resistência à tração na compressão aos 28 dias			
% adição	**Carga** (kgf)	$f_{t,D}$ (Mpa)	$f_{t,D\,m}$ (Mpa)
0	125	0.16	**0.14**
	75	0.10	
	125	0.16	
	100	0.13	
5	150	0.19	**0.19**
	175	0.22	
	125	0.16	
	150	0.19	
10	200	0.25	**0.24**
	175	0.22	
	200	0.25	
	175	0.22	
15	225	0.29	**0.27**
	200	0.25	
	225	0.29	
	200	0.25	

8.4.3 Resistência de aderência à tração

A determinação dos valores da resistência de aderência à tração, foi em analogia ao método proposto pela NBR 13528.

Foram desenvolvidas duas seqüências de ensaio. Na primeira, não foi executado o chapisco antes da aplicação da argamassa de 20 mm, simulando dessa maneira o assentamento dos blocos. Na segunda, o chapisco foi executado nos blocos com 24 horas de antecedência de aplicação da argamassa, que foram moldadas com espessura média de 10 mm, e ensaiadas aos 21 dias a partir da moldagem.

Nas duas seqüências de ensaios, foram utilizados quatro corpos-de-prova para os traços M6 (0% de adição), M7 (5% de adição), M8 (10% de adição) e M9 (15% de adição). Após a moldagem, os corpos-de-prova (Figura 8.20) permaneceram em ambiente coberto e seco.

Fig. 8.20 – Corpos-de-prova para os ensaios de resistência de aderência à tração (CPT2)

8.4.3.1 Sequência 1 -Argamassa aplicada sem chapisco

Nesta seqüência, não foi possível a realização dos ensaios, pois os revestimentos das argamassas M9 (15% de adição) e M8 (10% de adição)**,** se descolaram dos blocos na manipulação dos mesmos antes dos ensaios, conforme pode se notar nas Figuras 8.21 e 8.22. Na argamassa M7 (5% de adição), ao utilizar a serra de copo para o corte da argamassa, ocorreu o desprendimento do revestimento que seria ensaiado (Figura 8.23). Portanto, não houve aderência na interface revestimento/substrato nas argamassas aplicadas sem o chapisco.

Fig. 8.21 – Descolamento dos revestimentos nos blocos.

Fig. 8.22 – Descolamento do revestimento antes dos ensaios.

Fig. 8.23 – Descolamento do revestimento com a utilização da serra de copo.

8.4.3.2 Sequência 2 -Argamassa aplicada com chapisco

Para a realização deste ensaio, em função da baixa aderência previamente verificada, foi utilizada uma adaptação com relação ao equipamento de tração. Ao invés de utilizar um equipamento mecânico ou hidráulico, foi utilizado um método manual, que constou de um pórtico para o apoio dos blocos, um recipiente acoplado ao gancho rotulado preso ao revestimento. A carga foi aplicada ao se colocar areia progressivamente no recipiente até a ruptura. A Figura 8.24 apresenta um desenho esquemático do método manual utilizado.

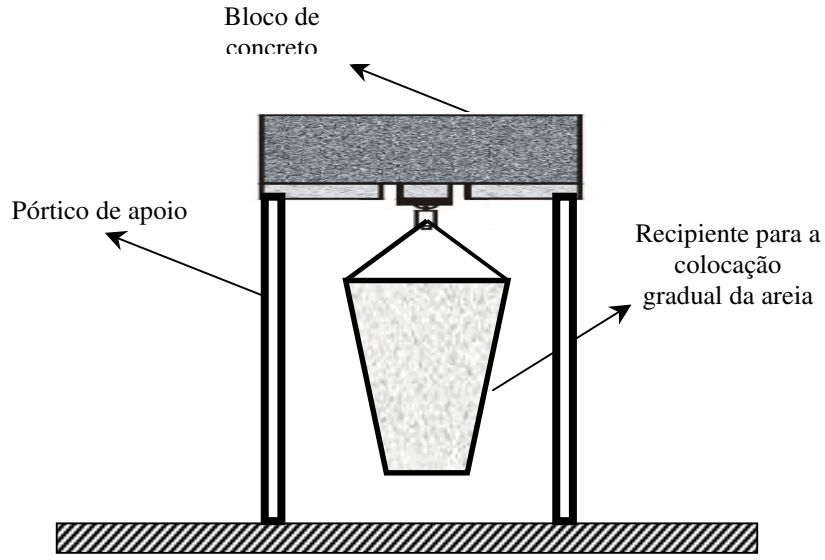

Fig. 8.24 – Desenho esquemático do método utilizado para o ensaio de aderência.

Nas argamassas M7, M8 e M9, a ruptura que prevaleceu foi a do tipo (a) – ruptura na interface revestimento/substrato (Fig. 8.25), ou seja, a resistência de aderência à tração é menor que a resistência à tração da argamassa. Na argamassa M6, a ruptura dominante foi a do tipo (b) – ruptura da argamassa de revestimento (Fig. 8.26), indicando que a resistência de aderência à tração supera a resistência de tração da argamassa. Os resultados mostraram também que, para o mesmo tipo de ruptura, a resistência de aderência à tração diminuiu com o aumento da adição do resíduo na argamassa.

Fig. 8.25 – Ruptura na interface revestimento/substrato.

Fig. 8.26 – Ruptura na argamassa de revestimento.

A tabela 8.13 apresenta o resumo das tensões de ruptura obtidas e a tabela 8.14 apresenta os demais dados relativos aos ensaios.

Tab. 8.13 – Médias das resistências obtidas nos ensaios de resistência de aderência à tração.

corpo de prova	**Resistência de ruptura (Mpa)**
M6 (0% adição)	**> 0.70**
M7 (5% adição)	**0.93**
M8 (10% adição)	**0.59**
M9 (15% adição)	**0.50**

Tab. 8.14 – Resultados dos ensaios da resistência à tração na compressão aos 28 dias (CPT2).

corpo de prova		espessura do revestimento (mm)	carga (kgf)	seção (mm2)	tensão (Mpa)	forma de ruptura a	b	c	d	e	tensão média (Mpa)
M6	**1**	10	13.25	19.63	0.67		x				**0.70**
	2	10	15.95	19.63	0.81		x				
(0% adição)	**3**	10	~~8.45~~	19.63	~~0.43~~	x					
	4	10	11.95	19.63	0.61		x				
M7	**1**	10	15.00	19.63	0.76	x					**0.93**
	2	10	21.45	19.63	1.09	x					
(5% adição)	**3**	10	18.45	19.63	0.94	x					
	4	10	~~26.25~~	19.63	~~1.34~~		x				
M8	**1**	10	11.75	19.63	0.60	x					**0.59**
	2	10	~~17.55~~	19.63	~~0.89~~		x				
(10% adição)	**3**	10	13.25	19.63	0.67	x					
	4	10	9.85	19.63	0.50	x					
M9	**1**	10	12.25	19.63	0.62	x					**0.50**
	2	10	9.55	19.63	0.49	x					
(15% adição)	**3**	10	8.45	19.63	0.43	x					
	4	10	9.00	19.63	0.46	x					

Obs.: resultados em vermelho e tachados foram desconsiderados por apresentarem formas de ruptura diferentes no mesmo traço

8.5 Análise da argamassa de revestimento aplicada em painel de alvenaria

O painel de revestimento com dimensão de 40 x 60 cm e espessura de 15 mm, foi executado em uma alvenaria em ambiente natural e externo, utilizando o traço M8 com relação água/aglomerante igual a 1,20. Com duas horas de antecedência da aplicação da argamassa, foi executado um chapisco sem adesivo acrílico.

Na execução do painel, cuja aplicação foi realizada em camada única (Figuras 8.27 e 8.28), não foi sentida nenhuma dificuldade, pois a massa apresentava trabalhabilidade e plasticidade boa para a aplicação, conseguindo-se um acabamento homogêneo e liso após a

utilização da desempenadeira de aço. Foi constatada também uma boa retenção no momento de "chapar" a argamassa na alvenaria, não havendo reflexão excessiva de material.

Fig. 8.27 – Momento da aplicação da argamassa de revestimento no painel de alvenaria.

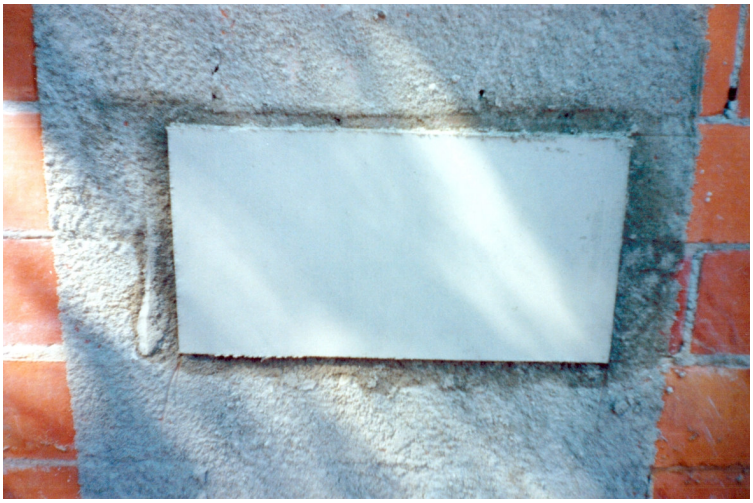

Fig. 8.28 – Painel de alvenaria ao término da aplicação da argamassa de revestimento.

Após 24 horas, foi feita uma inspeção no painel (Fig. 8.29) onde não foi observada nenhuma patologia de fissuração por retração de secagem, apesar da alta relação água/cimento do

compósito, observando-se apenas um aparente retardo de pega, que pode ser explicado pela retenção maior de água na argamassa devido à presença da fibra de celulose no resíduo, dificultando assim a carbonatação.

Fig. 8.29 – Painel de alvenaria após 24 horas do término da aplicação da argamassa de revestimento.

Na última inspeção realizada antes da finalização desse trabalho, o painel já se encontrava com 53 dias da aplicação do revestimento (Fig. 8.30).

Apesar da argamassa de revestimento não contar com nenhum material selante após a execução, e considerando que houve variações climáticas substanciais no período de Dezembro/2002 a Fevereiro/2003, o painel se encontrava em boas condições, não se verificando a presença de fungos ou manchas provenientes de umidade.

Nessa inspeção foram constatados alguns orifícios com aproximadamente 1mm de diâmetro, que supostamente foram originados no processo de eliminação de água da argamassa, mas sinais aparentes de fissuras ou gretas não foram diagnosticados (Fig. 8.31). Não foi constatado também nenhum indício de desprendimento ou descolamento do revestimento.

Fig. 8.30 – Painel de alvenaria após 53dias da aplicação da argamassa de revestimento.

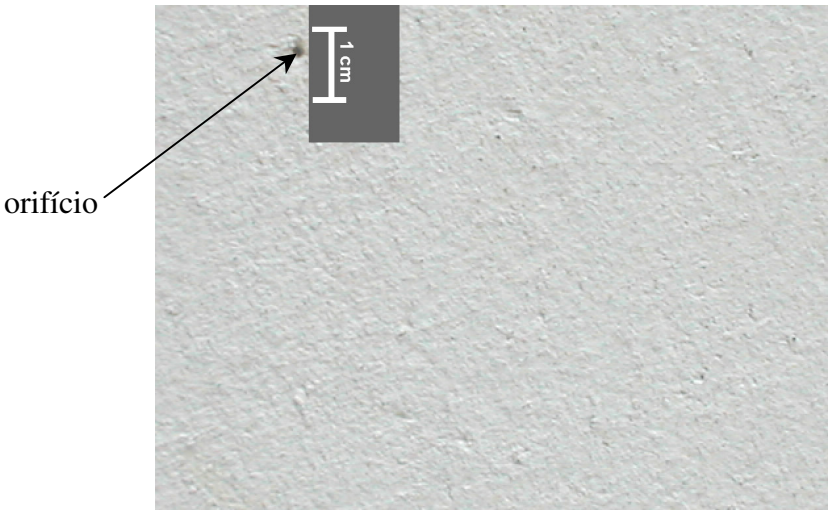

Fig. 8.31 – Foto ampliada da argamassa de revestimento aos 53 dias.

8.6 Considerações Finais

Para a relação água/aglomerante utilizada, os compósitos *Tipo 1* (argamassa de cimento) apresentaram, com teor incorporado de 5 % de resíduo, um aumento da resistência à compressão axial com relação ao compósito sem adição. É possível supor que isso se deve ao fechamento do pacote granulométrico proporcionado pelo material inorgânico (finos) presente no resíduo, diminuindo assim a porosidade, e a melhor distribuição de tensões que o material orgânico (fibra vegetal) proporciona. Paralelamente, os resultados do ensaio de absorção por capilaridade indicaram que, conforme foi incorporado ou elevado o teor de adição de resíduo, houve aumento, tanto da altura de ascensão capilar quanto na absorção de água. Portanto, para o teor de 5% de adição de resíduo, apesar da suposição da diminuição da porosidade indicada nos ensaios de resistência à compressão axial, pode-se presumir que os poros ainda presentes nas argamassas se tornaram mais "intercomunicáveis", provavelmente devido ao aumento da porosidade nas interfaces das fibras de celulose com a matriz.

Quanto ao aumento verificado na resistência à tração por compressão nos compósitos *Tipo 1*, para os teores incorporados de 5 e 10% de resíduo, é possível admitir que isso ocorreu devido à melhor distribuição de tensões, a elevada resistência à tração e a capacidade de absorção de energia conferidas pelas fibra de celulose presente no resíduo.

Nos compósitos *Tipo 2* (argamassa de revestimento), a tendência de manutenção ou ganho de resistência com o aumento do teor de adição do resíduo, tanto na compressão axial, quanto na tração por compressão, pode ser explicado pela baixa resistência da matriz, preponderando assim a capacidade de absorção de energia proporcionada pelas fibras de celulose presentes.

9 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho buscou avaliar o comportamento do resíduo da fabricação do papel como adição em argamassas de cimento e argamassas de revestimento, com a finalidade de se verificar a viabilidade da sua utilização como um subproduto econômico de material de construção, que pudesse, por um lado ser aplicado em habitações de interesse social, já que o problema do déficit habitacional brasileiro ser parece crônico, e por outro diminuísse o impacto ambiental gerado pelo descarte em aterro, beneficiando ainda a indústria geradora com a diminuição dos custos gerados pelo transporte e acondicionamento do resíduo.

Para isso, foram desenvolvidos diversos ensaios, em que foi possível obter algumas conclusões descritas a seguir.

1) Para a relação água/aglomerante utilizada, a adição de 5% de resíduo nos compósitos de argamassas de cimento, indicou melhorias nas propriedades mecânicas, tanto na compressão axial, quanto na tração por compressão diametral. O aumento verificado na absorção de água por capilaridade para esse teor de adição, não foi acentuado, e portanto, podemos concluir que a adição de 5% de resíduo nos compósitos foi benéfica e a ideal.

2) Para os teores de 10 e 15 % de adição de resíduo nas argamassas de cimento, pode-se constatar uma diminuição nas condições gerais das propriedades estudadas, mas que não inviabilizam sua utilização face aos propósitos indicados, ou seja, regularização de pisos e enchimentos de lajes.

3) As argamassas de revestimento apresentaram para todos os teores de adição incorporados, uma tendência de melhoria ou manutenção na resistência à compressão axial e na resistência à tração na compressão diametral. Porém, cabe-se observar que, com o desenvolvimento dos trabalhos, pôde-se constatar durante a realização dos ensaios no laboratório, que a incorporação superior a 10 % de resíduo, para a relação água/aglomerante utilizada, não produz trabalhabilidade suficiente para a utilização em assentamentos de blocos ou em revestimentos.

4) Os resultados obtidos com os ensaios de resistência de aderência à tração nas argamassas de revestimento, mostraram que, independentemente dos teores de adição, sem chapisco não há aderência, e portanto, a utilização em assentamentos de blocos não é recomendada. Por outro lado, com a execução prévia de chapisco, as argamassas de revestimento, para todos os teores de adição, apresentaram uma aderência mínima com o substrato, indicando ser viável a utilização como revestimento em alvenarias de vedação. A adição de 5% de resíduo, com relação à massa de aglomerante, mostrou ser também ser a mais eficiente nas argamassas de revestimento.

Portanto, os resultados obtidos sugerem que há viabilidade técnica do aproveitamento do resíduo resultante do processo de fabricação de papel como adição em argamassas de cimento e em argamassas de revestimento. Mas deverão ser efetuados novos estudos, principalmente com relação à trabalhabilidade das argamassas, à durabilidade da fibra de celulose nos compósitos e também com relação à aderência das argamassas.

Como sugestão para novos trabalhos, poderão ser efetuados:

- os mesmos ensaios utilizando resíduos coletados em dias diferentes, para verificar a influência na variação dos materiais orgânicos e inorgânicos presentes no resíduo nas propriedades dos compósitos;

- ensaios de microscopia para uma avaliação da interface fibra/matriz e das condições de homogeneização do resíduo no compósito;

- estudo da granulometria do resíduo para verificar a capacidade de fechamento do pacote granulométrico nos compósitos;

- estudos para definir as condições ideais de consistência das argamassas, ao se variar o teor de adição e a relação água/aglomerante

- ensaios de aderência em idades mais avançadas;

- ensaios de aderência com aplicação de chapisco, variando-se o tempo prévio de execução do mesmo antes da aplicação da argamassa;

- análise do comportamento das argamassas em idades mais avançadas, principalmente com relação à durabilidade; e,

- ensaios de condutividade térmica.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGOPYAN, V.; JOHN, V.M.; DEROLLE, A. Construindo com fibras vegetais**. A Construção São Paulo, n.2200**, 1990. p.17-20.

2. AGOPYAN, V.; SAVASTANO JR., H. Uso de materiais alternativos à base de fibras vegetais na construção civil: experiência brasileira. In: Seminário Iberoamericano de Materiales Fibrorreforzados, 1., Reunion Del Proyecto Pip VIII.5 Cyted, 3., 1997, Cali**. Memorias**... Cali: CYTED/Universidad Del Valle, 1997. p.23-40. (Artículo 03)

3. AÏTCIN, P.C. **Concreto de Alto Desempenho.** Tradução de Geraldo G. Serra. São Paulo/SP. Pini, 2000.

4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004. **Resíduos Sólidos.** Rio de Janeiro, 1987.3p.

5. ___ .NBR 6156. **Máquina de ensaio de tração e compressão.** Rio de Janeiro, 1983.

6. ___ .NBR 6465. **Agregados – determinação da abrasão "Los Angeles".** Rio de Janeiro, 1984.

7. ___ .NBR 7215. **Cimento Portland: Determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 1996.

8. ___ .NBR 7217. **Determinação da Composição Granulométrica dos Agregados.** Rio de Janeiro, 1983.

9. ___ .NBR 7222. **Argamassas e concretos: Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 1982.

10. ___ .NBR 7251. **Determinação da Massa Unitária em Estado Solto.** Rio de Janeiro, 1982.

11. ___ .NBR 9780. **Peças de concreto para pavimentação – determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 1987.

12. ___ .NBR 10007. **Amostragem de resíduos.** Rio de Janeiro, 1987.

13. ___ .NBR 10024. **Chapa dura de fibras de madeira.** Rio de Janeiro, 1987.

14. ___ .NBR 13528. **Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração.** Rio de Janeiro, 1995.

15. BENTUR, A.; AKERS, S.A.S. The microstructures and ageing of cellulose fibre reinforced autoclaved cement composites**. The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, v.11, n.2, 1989. p. 111-115.

16. CASTILHOS JR., A.B.; SOARES, S.R.; AMARAL, C.V. Solidificação/Estabilização de lodos galvânicos (metais cromo e zinco) em matrizes de cimento Portland. In: XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001, João Pessoa. **Anais**, Rio de Janeiro, ABES, 2001.

17. CINCOTTO, M.A. **Utilização de sub-produto e resíduos na indústria da construção civil.**Tecnologia de Edificações. São Paulo/SP, Pini, 1988.

18. DEVITO, R.A.; SAVASTANO JR., H.; CUNHA, L. Matrizes à base de cimento reforçadas com celulose de *eucalyptus grandis.* **Engenharia Agrícola**, v.22, n.1, Jaboticabal, 2002. p. 11-21

19. FARDIM, P. Papel e Química de Superfície – Parte I – A superfície da Fibra e a Química da Parte Úmida**. O Papel – Ano LXIII - nº 4**, 2002. p. 97-107.

20. FOELKEL, C.E.B.; BARRICHELO, L.E.G. **Tecnologia de Celulose e Papel.** Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – Departamento de Silvicultura, 1975. 207p.

21. GEROTTO, M.V.; CABO, S.S.; INNOCENTINI, M.D.M. et al. Utilização de caulim e meta-caulim em substituição à microssílica em concretos refratários aluminosos auto-escoantes**. Cerâmica - Vol. 46 - nº 300**, 2000. p. 200-209.

22. GRANDI, L.A.C. **O uso do pó de serra como material de construção, em misturas secas e argamassa.** Dissertação – Escola de Engenharia de São Carlos – USP. São Carlos, 1991. 92 p.

23. GRIM, R.E. **Clay mineralogy.** New York. Mcgraw-Hill, 1958. p.29

24. GUIMARÃES, S.S. Vegetable Fiber-cement composites**.** International Symposium on Vegetable Plants and their Fibres as Building Materials, 2., Salvador, 1990. **Proceedings…** London, Chapman and Hall, 1990. p.98-107 (Rilem Proceedings,7)

25. IPEF. **Resíduos da indústria do papel podem ser reaproveitados na construção civil.** Publicação do Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais da Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – Departamento de Ciências Florestais, Maio/Junho-2000. p. 5.

26. JEPSON, W.B. Kaolin: their properties and uses**. Philosophical Transaction**. Royal Society of London, Serie A. v.311, 1984. p. 411-432.

27. JOHN, V.M.; AGOPYAN, V. Materiais reforçados com fibras vegetais. In: Simpósio Internacional sobre Materiais Reforçados com Fibras para Construção Civil. São Paulo, 1993. **Anais**. São Paulo, EP-USP, 1993. p. 29-38.

28. JOHN, V.M.; AGOPYAN, V.; DEROLLE, A. Durability of blast furnace-slag-based cement mortar reinforced with coir fibres**.** International Symposium on Vegetable Plants and their Fibres as Building Materials, 2., Salvador, 1990. **Proceedings**… London, Chapman and Hall, 1990. p.87-97 (Rilem Proceedings,7)

29. KIYOHARA, P.K. **Estudos ópticos-eletrônicos e tecnológicos de caulins brasileiros visando a sua utilização na indústria do papel.** Dissertação – Escola Politécnica – USP. São Paulo, 1984. 124p.

30. KUAN, G.S.S.; BENAZZI, R.C.; BERGMAN, S. **Tecnologia de Fabricação do Papel.** v II, IPT, São Paulo, 1988. p. 561-581.

31. LOUGHBROUGH, R. Kaolin producers move up market**. Industrial Minerals n.313**, 1993. p. 51-69.

32. LIMA, R.M.F.; LUZ, A.B. **Caracterização tecnológica de caulim para a indústria de papel.** Série Tecnologia Mineral, 48. CETEM/CNPq, Rio de Janeiro, 1991. 21p.

33. LUZ, A.B.; CHAVES, A.P. **Tecnologia do Caulim: ênfase na indústria de papel.** Série Rochas e Minerais Industriais, 1. CETEM/MCT, Rio de Janeiro, 2000. 72 p.

34. LUZ, A.B.; DAMASCENO, E.C. **Caulim: um mineral importante.** Série Tecnologia Mineral, 65. CETEM/CNPq, Rio de Janeiro, 1993. 29p.

35. MARAGNO, A.L.F.C.; POVINELLI, J. Uso do resíduo de curtume em peças para a construção civil. In: XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001, João Pessoa. **Anais**, Rio de Janeiro, ABES, 2001.

36. MARCONDES, A.P.; **Introdução aos processos de obtenção de celulose e fabricação de papel.** Apostila do Núcleo Técnico da ABTCP, São Paulo, ABTCP, 1999. 13p. (on-line at www.abtcp.com.br)

37. NEVILLE, A. **Propriedades do concreto.** 2 ed. rev. atual.São Paulo. Pini, 1997

38. NOLASCO, A.M. **Utilização de resíduos da indústria de papel na produção de materiais para a construção civil.** Dissertação – Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 1993. 140 p.

39. NYQUIST R.A.; KAGEL R.O. **Infrared Spectra of Inorganic Compounds**. Academic Press. New York, 1971.

40. OLIVEIRA, M.J.E. **A influência dos tratamentos simples para as fibras de malva empregadas em reforço de argamassa de cimento Portland.** Dissertação – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1989. 170 p.

41. OSMANLIOGLU, A.E. **Immobilization of radioactive waste by cementation with purified kaolin clay.** Waste Management, v.22, n.5, 2002. p.481-483.

42. PADILHA, J.A.S.; TOLEDO FILHO, R.D.; LIMA, P.R.L.; JOSEPH, K; LELA, A.F. Argamassa leve reforçada com polpa de sisal: compósito de baixa condutividade térmica para uso em edificações rurais. **Engenharia Agrícola**, v.21, n.1, Jaboticabal, 2001. p. 1-11

43. PIRES, F.da S.; KUAN, G.S.S.; BENAZZI, R.C.; BUGAJER, S. **Tecnologia de Fabricação do Papel.** v II, IPT, São Paulo, 1988. p. 583-655.

44. PIRIE, B.J. et al. **Durability studies and characterization of the matrix and fibre-cement interface of asbestos-free fibre-cement products.** Cement & Concrete Composites, v.12, n.4,1990. p.233-244.

45. POON, C.S.; LAM, L; KOU, S.C.; WONG, Y.L.; WONG, R. **Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes.** Cement and Concrete Research, v.31, n.9, 2002. p.1301-1306.

46. PRASADA, M.S.; REID, K.J.; MURRAY, H.H. **Kaolin : processing, properties and application.** v.6. Aply Clay Science. Amsterdam. Elsevier, 1991. p. 87-119.

47. RAMASWAMY, H.S.; AHUJA, B.M.; KRISHNAMOORTHY, S. **Behavior of concrete reinforced with jute, coir and bamboo fibres.** International Journal of Cemente Compositesand Lightweight Concrete, v.5, n.1, 1983. p.3-13

48. SAVASTANO JR., H.; **Zona de transição entre fibras e pasta de cimento portland: caracterização e inter-relação com as propriedades mecânicas do compósito.** Tese – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo/SP, 1992. 209 p.

49. SELMO, S.M. de S.- **Dosagem de argamassas de cimento Portland e cal para revestimento externo de fachada dos edifícios.** Tese – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1989. 206 p.

50. SEWELL, G.H. **Administração e Controle de Qualidade Ambiental**. São Paulo. EPU, 1978. 295p.

51. SPROUSE COLLECTION OF INFRARED SPECTRA. Book 1: Polymers. (D.L. Hansen Ed.), Sprouse Scientific Systems, Pennsylvania, 1987.

52. SILVA, N.I.W.; KOCH, J.L.; FONSECA, H.B.F. Aproveitamento de resíduo da fabricação de sulfato de alumínio líquido na produção de blocos cerâmicos. In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000, Porto Alegre. **Anais**, Rio de Janeiro, ABES, 2000.

53. SWAMY, R.N. Vegetable fibre reinforced cement composites – a false dream or a potential reality? International Symposium on Vegetable Plants and their Fibres as Building Materials, 2., Salvador, 1990. **Proceedings**… London, Chapman and Hall, 1990. p.87-97 (Rilem Proceedings,7)

54. VAZ, A.R.; VALENTE, C.A. Lamas do efluente de fábrica de celulose – algumas soluções para o seu aproveitamento. 22º Congresso Anual de Celulose e Papel**. Anais,** São Paulo, 1989. Vol.1.p. 625-641.

11 ANEXOS

Anexo A – dosagens utilizadas nas argamassas de cimento

COMPÓSITOS TIPO 1 - ARGAMASSAS DE CIMENTO										
Dosagens utilizadas										
umidade resíduo	Teor adição	cimento (g)	areia (g)	resíduo bruto adicionado (g)	resíduo seco (g)	água resíduo (g)	água adicionada (g)	Total água (g)	relação a/g	superplast. (ml)
		2500.00	7500.00				1625.00	1625.00	0.65	37.5
0.680	5%	2500.00	7500.00	390.63	125.00	265.63	1359.38	1625.00	0.65	37.5
0.680	10%	2500.00	7500.00	781.25	250.00	531.25	1093.75	1625.00	0.65	37.5
0.680	15%	2500.00	7500.00	1171.88	375.00	796.88	828.13	1625.00	0.65	37.5
0.680	20%	2500.00	7500.00	1562.50	500.00	1062.50	562.50	1625.00	0.65	37.5

Anexo B – dosagens utilizadas nas argamassas de revestimento

COMPÓSITOS TIPO 2 -ARGAMASSA DE REVESTIMENTO										
Dosagens utilizadas										
umidade resíduo	Teor adição	cimento (g)	cal (g)	areia (g)	resíduo bruto adicionado (g)	resíduo seco (g)	água resíduo (g)	água adicionada (g)	Total água (g)	relação a/g
		500.00	1000.00	4500.00				1470.00	1470.00	0.98
0.680	5%	500.00	1000.00	4500.00	75.00	234.38	159.38	1310.63	1470.00	0.98
0.680	10%	500.00	1000.00	4500.00	150.00	468.75	318.75	1151.25	1470.00	0.98
0.680	15%	500.00	1000.00	4500.00	225.00	703.13	478.13	991.88	1470.00	0.98
0.680	20%	500.00	1000.00	4500.00	300.00	937.50	637.50	832.50	1470.00	0.98