Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

**Compósito cimento-lodo de ETE de indústria de papel para aplicação na
construção civil**

Samantha Nazaré de Paiva

**Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Recursos Florestais, com opção em Tecnologia
de Produtos Florestais**

Piracicaba
2007

Samantha Nazaré de Paiva
Engenheiro Florestal

Compósito cimento-lodo de ETE de indústria de papel para aplicação na construção civil

Orientador:
Prof. Dr. **GERALDO BORTOLETTO JÚNIOR**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em
Recursos Florestais, com opção em Tecnologia de Produtos
Florestais

Piracicaba
2007

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP

Paiva, Samantha Nazaré

Compósito cimento-lodo de ETE de indústria de papel para aplicação na construção civil / Samantha Nazaré Paiva. - - Piracicaba, 2007.
110 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2007.
Bibliografia.

1. Efluente – Tratamento 2. Indústria de celulose e papel 3. Lodo 4. Materiais compósitos 5. Materiais de construção 6. Resíduos – Aproveitamento 7. Resíduos industriais I. Título

CDD 634.98

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

Ofereço,

**Ao meu avô Waldomiro Machado (*in memorian*),
por me instigar a merecer o diploma pendurado na parede!**

Dedico,

**Aos meus pais,
Gabriel Luiz Bacha Junho e
Eulália Nazaré Cardoso Machado
pelo apoio incondicional!**

*“ Tempo de entusiasmo e coragem
Em que todo desafio
É mais um convite a luta que a gente enfrenta
Com toda disposição
De tentar algo novo, de novo e de novo
E quantas vezes for preciso “*

Mário Quintana

AGRADECIMENTOS

O reconhecimento é parte fundamental de qualquer trabalho, ainda mais quando ele é realizado em equipe! É por isso que a lista de agradecimentos é longa...

À *ESALQ* e ao *Programa de pós-graduação em Recursos Florestais* pelo aprendizado e acolhida.

A professora *Adriana Maria Nolasco* pela confiança depositada, orientação e amizade.

Ao professor *Geraldo Bortoletto* pela orientação formal durante todo o processo.

Aos professores *Osny Pelegrino* e *João Adriano Rossignolo* pela troca de idéias no início do trabalho e liberação dos ensaios mecânicos junto ao Laboratório de Construção Civil na Escola de Engenharia de São Carlos/USP. Aos técnicos, *Paulo Pratavieira* e *Sérgio Trevelin* pelo auxílio, paciência e descontração durante os ensaios.

A professora *Lia Lorena Pimentel* pelas contribuições no início do trabalho.

Ao professor *Marcelo Corrêa*, pelo auxílio nas análises estatísticas.

Ao professor *Ivaldo Jankowsky* pelo apoio.

As empresas que participaram do projeto, pela presteza nas informações solicitadas e apoio técnico necessário: *Votorantim Celulose e Papel*, unidade Piracicaba SP em especial ao Sr. *João Luiz Duarte* e *Papirus Indústria de Papel S/A* na cidade de Limeira SP, em especial ao Sr. *Gerson Quinhone* e *Maicon Fonseca*.

Aos funcionários do Departamento de Ciências Florestais e do IPEF, em especial: *José Martins*, *Eliezer Cotrim*, *Alex Oliveira*, *Evandro Dell Amatrice*, *Fernanda Cristina da Silva*, *Catarina Germuts*, *Margarete Pinese* e *Antonio Marcelo da Silva*.

Aos amigos do Laboratório de Química, Celulose e energia, em especial à *Udemilson Ceribelli* pela ajuda nos momentos mais complicados e a *Maria Regina Buch* pela atenção. Às amigas *Gláucia Alencar* e *Francismara Duarte* pelos momentos compartilhados de descontração e aprendizado.

Ao Núcleo de Apoio à Pesquisa em Microscopia Eletrônica, em especial ao professor *Elliot Kitagima*.

As amigas e estagiárias *Tatiana Pavan* e *Simony Oliveira*, pelo esforço, dedicação, alegria e descontração!

A amiga *Lis Uliana* pelo apoio em todas as etapas e amizade!

As amigas *Camila Doubek* e *Patrícia Azevedo* pela amizade, apoio e descontração!

A todos os colegas do Laboratório de Movelaria e Resíduos Florestais pela convivência e amizade!

A amiga *Simone Carolina Bauch* pelo apoio e auxílio, principalmente nas etapas finais!

As amigas da *República Forfê*, em especial a *Tiana Moreira*, *Sofia Iba* e *Ângela Dini* pelo apoio e torcida mesmo à distância!

A amiga *Maria Angélica Marchiori* pelo apoio, carinho e amizade!

Aos amigos *Fabiano Ribeiro*, *Luciane de Souza* e *Isabela* pela atenção e carinho!

A *CAPES* pela bolsa concedida.

A numerosa família Machado pela torcida! Em especial às minhas tias *Vanda* e *Dalva* e meus tios *Zito*, *Assis*, *Sérgio*, *Paulo*, *Roberto* e *Laércio* pelas palavras sempre especiais! Ao *Mateus*, meu afilhado, pelos questionamentos dignos de um futuro pesquisador!

Aos meus irmãos *Daniel Elias Machado Junho* e *Lucas Machado Junho* pela paciência, alegria, apoio e ainda por serem exemplos de perseverança e determinação. Obrigada pela torcida...

Aos meus pais, *Gabriel* e *Eulália* pelo apoio em todas as horas, pela confiança, estímulo e pelo exemplo!

E a todos que aqui não foram citados, mais que tiveram sua parcela na finalização deste trabalho...

Muito Obrigada!

SUMÁRIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT.....	10
1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 Contexto da Pesquisa.....	11
2 DESENVOLVIMENTO.....	15
2.1 Revisão Bibliográfica.....	15
2.1.1 Aspectos ambientais nas indústrias de celulose e papel.....	15
2.1.2 Geração e manejo de resíduos da produção de celulose e papel.....	19
2.1.2.1 Resíduos sólidos da indústria de celulose e papel.....	19
2.1.2.2 Sistemas de tratamento de resíduos em indústrias de celulose e papel.....	29
2.1.2.3 Quantidades de resíduos sólidos gerados na produção de celulose e papel.....	31
2.1.2.4 Manejo dos resíduos sólidos.....	32
2.1.3 Compósitos cimentícios reforçados com fibra de celulose.....	33
2.1.3.1 Uso de fibras vegetais como reforço em compósitos.....	33
2.1.3.2 Características da madeira e das fibras de celulose.....	35
2.1.3.3 Propriedades dos compósitos cimentícios reforçados com fibra de celulose.....	37
2.1.3.4 Aplicações dos compósitos reforçados com fibra de celulose.....	43
2.1.3.5 Uso do lodo de resíduos da produção de celulose e papel em compósitos cimentícios.....	45
2.2 Material e Métodos.....	49
2.2.1 Planejamento experimental.....	49
2.2.2 Material.....	50
2.2.3 Métodos de produção dos compósitos.....	54
2.2.4 Delineamento experimental.....	56
2.2.4.1 Caracterização dos compósitos.....	57
2.2.5 Análise estatística.....	61
2.3 Resultados e Discussão.....	62
2.3.1 Caracterização dos resíduos.....	62
2.3.1.1 Volume gerado e sazonalidade.....	62
2.3.1.2 Características químicas do resíduo.....	63

2.3.1.3 Características físicas dos resíduos.....	66
2.3.2 Estudo do compósito.....	68
2.3.2.1 Características físicas dos compósitos.....	68
2.3.2.1.1 Massa específica aparente.....	68
2.3.2.1.2 Determinação do índice de vazios.....	70
2.3.2.1.3 Absorção de água.....	71
2.3.2.1.4 Retratibilidade.....	75
2.3.2.1.5 Isolamento acústico.....	76
2.3.2.1.6 Análise da microestrutura do compósito.....	78
2.3.2.1.7 Resistência à compressão simples.....	81
2.3.2.2 Avaliação da durabilidade do compósito.....	88
3 CONCLUSÕES.....	92
REFERÊNCIAS.....	94
ANEXOS.....	102

RESUMO

Compósito cimento-lodo de ETE de indústria de papel para aplicação na construção civil

O grande volume de resíduos sólidos industriais gerado pelo setor de celulose e papel e o alto custo do seu manejo estimulam pesquisas em busca de soluções mais adequadas para o seu gerenciamento. Uma alternativa que se destaca neste contexto é o aproveitamento destes resíduos em materiais de construção. Este trabalho visa o aproveitamento do lodo de ETE de indústria de papel na produção de compósitos cimentícios para uso na construção civil. Foi estudada a influência de diferentes teores da adição do lodo de ETE (5%,10%,20% e 30% em massa) em argamassa de cimento e areia, com relação água-cimento de 0,65. Determinou-se para o resíduo: teor de umidade; massa unitária; massa específica; pH; sazonalidade de geração e teor de sólidos fixos e para o compósito: massa específica aparente; absorção de água por imersão; absorção de água por capilaridade; retratibilidade; isolamento acústico; resistência à compressão e análise da microestrutura. O resíduo foi classificado como Classe II – A, não inerte e não perigoso, o que indica alto potencial para aproveitamento em materiais de construção. Sua incorporação na argamassa aumentou a absorção de água por capilaridade em 12,76 % e por imersão em 18,93% no traço com 30% de resíduo para a empresa “A”. Houve também a diminuição da resistência à compressão com a incorporação do resíduo, entretanto definiu-se o ponto-ótimo de incorporação em 12% para as duas empresas avaliadas, garantindo assim a resistência mínima à compressão de 2,5 MPa, exigência para blocos sem função estrutural. A incorporação de resíduo também apresentou decréscimo na massa específica do compósito de 14% na empresa “A” e de 34% para a empresa “B” para os traços de 30% de resíduo. Os resultados permitem concluir que este compósito é adequado para uso em materiais de construção sem função estrutural.

Palavras-chave: Compósitos; Resíduo industrial; Celulose e papel; Materiais de construção

ABSTRACT

Composite cement-sludge from pulp and paper industry mills effluent treatment for use in building materials

The large volume of industrial solids residues generated by the pulp and paper sectors and its high management cost stimulate research aiming at finding adequate solutions to its management. An alternative that shows high potential in this context is using these residues in building materials. This work aims at studying the use of paper's mills effluent treatment solid waste in the production of cement composites to be used in construction. The influence of adding different sludge proportions (5%,10%,20% and 30% in mass) in cement and sand mortar, with a water-cement relation of 0,65 was studied. The humidity ratio, unit mass, specific mass, pH, generation season and fixed solid concentration for the residue; and specific apparent mass, water absorption by immersion, water absorption by capillarity, acoustic isolation, compression resistance and microstructure analysis for the composite. The residue was classified as Class II – A, not inert and not dangerous, which indicated high potential for use as building materials. Its use in the mortar increased the water absorption by capillarity in 12.76% and in immersion by 18.93% in the trace of 30% residue from company “A”. There was also a decrease in compression strength when the residue was incorporated, however the optimal incorporation point was defined in 12% for both evaluated firms, guaranteeing the minimum compression resistance of 2.5 MPa, required for block without structural function. The residue incorporation also presented a decrease in the composite specific mass of 34% for company “B” and 1% for company “A” for the traces of 30% residue. The results allow us to conclude that this composite is adequate for use as building materials with no structural function.

Keywords: Composites; Pulp and paper; Industrial waste

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto da Pesquisa

A indústria de celulose e papel é geradora de grande volume e diversidade de resíduos e, portanto, bastante visada pelos órgãos ambientais no Brasil. Apesar disso, a maioria das empresas ainda dispõem seus resíduos em aterros industriais ou urbanos dos municípios onde atuam. Este tipo de solução é denominado “solução de fim de tubo” (*“end of pipe”*) e suas principais características são: os altos custos com tratamento, transporte e disposição dos resíduos; e riscos ambientais inerentes, como o risco de contaminação do solo e do lençol freático, com danos ao ambiente, à saúde da população do entorno e à imagem da empresa.

Esse sistema de gestão de resíduo foi adotado pelas indústrias brasileiras a partir da década de 1970, como resposta ao modelo de política ambiental baseado em parâmetros de emissão e multas para as empresas que lançassem no solo, ar ou água, resíduos sólidos ou efluentes hídricos ou gasosos fora desses padrões legais.

A partir da década de 1990, mudanças mundiais no tratamento da questão ambiental têm levado os governos e o setor empresarial a rever a política ambiental e os sistemas de gestão de resíduos. A “solução de fim de tubo” passa a ser gradativamente substituída pela “produção mais limpa” e pela “gestão integrada de resíduos”, que priorizam ações que levem à redução na geração e ao aproveitamento dos resíduos gerados.

Atualmente, diversos fatores favorecem o desenvolvimento e a implementação de alternativas de aproveitamento de resíduos da indústria de celulose e papel, dentre eles:

- a) Previsão de investimento na expansão da capacidade produtiva das indústrias de celulose e papel até o ano de 2012 de 14,4 bilhões de dólares (BRACELPA, 2006);
- b) Certificações, inclusive as da série ISO 14.000, cujo padrão implica no rígido controle dos processos produtivos e do gerenciamento dos resíduos gerados;
- c) Legislação ambiental cada vez mais restritiva;
- d) Abertura de segmentos diferenciados de mercado para produtos ambientalmente corretos;
- e) Substituição de barreiras tarifárias por barreiras ambientais na exportação dos produtos para diversos países;

- f) Incorporação da gestão de resíduos na estrutura administrativa das empresas e no sistema de gestão empresarial.

A construção civil é um dos setores com maior potencial para aproveitamento de resíduos industriais em função de características como: ampla atuação em todo o território nacional; grande diversidade e quantidade de matérias-primas utilizadas; escassez de matérias-primas tradicionais; diferentes níveis tecnológicos para a produção de materiais, além do alto custo associado aos mesmos; e crescimento urbano acelerado, com grande déficit habitacional. Estas características estabelecem inclusive um nicho de mercado diferenciado para produtos competitivos e de qualidade.

O lodo de ETE (Estação de Tratamento de Efluentes) de indústria de papel possui características que favorecem seu aproveitamento em materiais de construção: grande volume em um ponto fixo de emissão; não apresenta sazonalidade na geração; pequena variação na composição química ao longo do tempo e entre empresas; grande quantidade de fibras e materiais inertes (caulim ou carbonato de cálcio); não é considerado um resíduo perigoso; tem grande potencial para incorporação em materiais e componentes construtivos tradicionais, o que reduz problemas de aceitação pelos consumidores; ampla distribuição no país e a curtas distâncias dos centros consumidores.

Este trabalho faz parte de uma série de projetos da linha de pesquisa “Aproveitamento de Resíduos Florestais” desenvolvidos no Laboratório de Moveleira e Resíduos Florestais (LAFLOR), do Departamento de Ciências Florestais/ESALQ/USP. Essa linha de pesquisa teve início em 1989 a partir de uma parceria com a Votorantim Celulose e Papel S/A – Unidade Piracicaba, com o objetivo de desenvolver alternativas para o aproveitamento dos resíduos sólidos gerados pela empresa. Desde então, foram realizados diversos estudos para a produção de materiais para a construção civil (compósitos e componentes) com a incorporação do resíduo sólido resultante do tratamento do efluente hídrico da empresa. Resultados muito positivos, como a utilização na produção comercial de blocos e tijolos cerâmicos na região de Piracicaba/SP desde 1996, com utilização de 100% do resíduo sólido gerado pela unidade local da empresa, tem estimulado a continuidade da parceria e dos estudos.

Este trabalho contribui para ampliar o número de alternativas para a valorização do resíduo, através do estudo de sua incorporação em compósitos cimentícios, que poderão ser

utilizados em componentes para a construção civil. Estudos posteriores serão realizados com a finalidade de desenvolvimento dos componentes.

Outra pergunta que o trabalho procura responder é se há diferença significativa no desempenho físico e mecânico dos compósitos em função das diferentes composições dos resíduos, que indique a necessidade de um novo estudo para cada empresa para que se possa aplicar a tecnologia desenvolvida. Sabe-se que os lodos de ETE gerados pelas indústrias de papel apresentam composição ligeiramente diferente, resultado do tipo de matéria-prima, processo de fabricação e papel produzido, e do sistema de tratamento adotado. Assim, ocorrem pequenas variações no teor de fibra, caulim, umidade, pH e composição química. Para este estudo foram selecionados lodos provenientes de indústrias com processos produtivos bastante diferentes: uma indústria que utiliza somente celulose virgem e branqueada para produção de papéis especiais (autocopiativo, térmicos e couché) e outra que utiliza aparas pós-consumo (material proveniente da coleta de catadores) e fibra virgem branqueada e não-branqueada, produzindo papel reciclado (papel cartão sólido, duplex e triplex).

O desenvolvimento de compósitos cimentícios com potencial aplicação em diferentes tipos de componentes para a construção civil é de grande interesse tanto para o setor empresarial como para a sociedade. Do ponto de vista ambiental poderá contribuir para a redução do volume disposto em aterro industrial, com redução dos custos para a empresa, do passivo ambiental, dos riscos de contaminação do meio, da degradação da paisagem e do uso mais adequado do solo. Do ponto de vista tecnológico, resulta em novos materiais baseados em modelos mais sustentáveis de produção com o uso de resíduo e aplicações regionalizadas, que podem contribuir para a organização de ecossistemas produtivos locais (cadeias industriais integradas e complementares). Já do ponto de vista social, além dos benefícios ambientais para as comunidades do entorno, a viabilidade da produção de novos materiais, poderá levar à criação de novos empreendimentos e postos de trabalho, além de possibilitar a produção de materiais de menor custo, passíveis de utilização em programas de habitação de interesse social.

1.2 Objetivos

Objetivo Geral:

Avaliar a viabilidade da utilização do lodo de estação de tratamento de efluentes de indústria de papel em compósitos cimentícios para a construção civil.

Objetivos Específicos:

1. Quantificar, avaliar a sazonalidade de geração e caracterizar as propriedades químicas e físicas dos resíduos originados do tratamento de efluentes hídricos de duas indústrias de papel, uma que utiliza somente matéria-prima virgem e outra apenas pós-consumo;
2. Analisar as propriedades físicas dos compósitos produzidos com os dois tipos de resíduos: massa específica aparente; absorção de água por imersão; absorção de água por capilaridade; índice de vazios, retratibilidade e isolamento acústico.
3. Avaliar a resistência à compressão simples dos compósitos;
4. Analisar o aspecto da microestrutura do compósito, a distribuição das fibras celulósicas e do caulim dentro da matriz cimentícia além da interface fibra/matriz através da microscopia eletrônica de varredura;
5. Analisar a durabilidade do compósito através de ensaio de envelhecimento acelerado;
6. Determinar através do estudo das propriedades físicas e mecânicas dos compósitos produzidos com o lodo de ETE das duas empresas se há diferença significativa no desempenho dos compósitos em função das diferenças de composição dos resíduos;
7. Determinar através do estudo das propriedades físicas e mecânicas dos compósitos produzidos com o lodo de ETE das duas empresas aqueles traços com maior potencial para diferentes aplicações na construção civil.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão Bibliográfica

2.1.1 Aspectos ambientais nas indústrias de celulose e papel

A questão ambiental é considerada atualmente um dos principais desafios a ser equacionado pelo setor industrial. É mais importante, mais profunda e de maior alcance social que sua antecessora – a qualidade, pois o que se discute vai além dos requisitos do produto (JOHN, 2000). Diz respeito aos impactos negativos da produção, aos riscos para a sociedade, à imagem da empresa, ao acesso a matérias-primas e a própria continuidade da atividade industrial.

O setor brasileiro de celulose e papel é composto por 220 empresas, localizadas em 450 municípios de 16 estados. A matéria-prima utilizada é exclusivamente de florestas plantadas, especialmente pinus e eucalipto, sendo a área plantada para abastecimento de 1,7 milhões de hectares (75% eucalipto, 24% pinus e 1% outros). O setor gera cerca de 110 mil empregos diretos. Atualmente, o Brasil é o 7º maior produtor mundial de celulose de todos os tipos, 1º em produção de celulose fibra curta e 11º em produção de papel (BRACELPA, 2006).

A produção nacional em 2006 foi de 8,8 milhões de toneladas de papel e 11 milhões de toneladas de celulose base seca. Isso representou um crescimento de 1,8 e 6,3%, respectivamente, em relação a 2005. O volume exportado foi de US\$ 3,9 bilhões, ou seja, um aumento de 14% em relação a 2005 (BRACELPA, 2006).

Historicamente o setor papelero está associado a um grande número de problemas ambientais, tais como:

- grande consumo de recursos naturais;
- geração de grande quantidade e diversidade de resíduos sólidos, efluentes líquidos e emissões gasosas;
- manejo inadequado dos resíduos com poluição do solo, da água e do ar;
- imagem negativa perante a sociedade.

As indústrias de celulose e papel têm um alto potencial poluidor para o ambiente devido a volumosas descargas de matéria orgânica e substâncias tóxicas geradas no processo produtivo (NOLASCO, 1993).

Até meados da década de 1980, a preocupação ambiental no setor baseava-se fundamentalmente no tratamento de efluentes e de odores derivados do processo de fabricação

para atendimento à legislação do país e redução dos conflitos com a população do entorno. O controle dos resíduos (sólidos, hídricos e gasosos) era realizado através de “tecnologias de fim de tubo”, adequando os padrões de emissão aos limites dados pela legislação (LARS et al., 1996).

Na década de 1990, o que chamava a atenção da sociedade era a questão do branqueamento da polpa, realizado com o uso de cloro. Como resposta, começaram a ser adotadas “tecnologias mais limpas” como a ECF - “elemental chlorine free”, livre de cloro elementar, e a TCF – “totally chlorine free”, totalmente livre de cloro (CORAZZA, 1996).

Soluções para minimização da geração de resíduos, recuperação de matéria-prima e reuso da água são os novos desafios, que começaram a ser tratados no final da década de 1990.

Entretanto, problemas relacionados principalmente à gestão dos resíduos sólidos industriais ainda ocorrem, resultado das diferenças no nível de adequação ambiental das empresas e do passivo ambiental existente, na forma de lodos e outros resíduos, e que estão contidos em inúmeros aterros industriais e urbanos. Como exemplo podemos citar o vazamento de licor negro da Indústria Cataguazes de Papel S/A em 2003 (Figura 1a) e o vazamento de lodo de ETE, em 2005, na Votorantim Celulose e Papel – Unidade de Jacareí (Figura 1b).

Figura 1 – Acidentes com o rompimento da barragem de rejeitos em duas ocasiões: (a) Indústria Cataguazes de Papel S/A, Cataguazes/MG; (b) Votorantim Celulose e Papel S/A na cidade de Jacareí/SP

Fonte: (a): Florestal Cataguazes (2006); (b): O Vale Paraibano (2005)

No caso da Indústria Cataguazes de Papel, a liberação de 400 milhões de litros de licor negro em março de 2003 comprometeu o abastecimento de água de cerca de 600 mil habitantes, a água para agricultura em uma grande região dos estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro, além da atividade de pesca na Bacia de Campos – RJ, como mostra a Figura 2 (TANIZE, 2004).

Figura 2 – Área atingida pelo vazamento de efluente da Indústria Cataguazes de Papel
Fonte: Folha de São Paulo, 2003

O rompimento do aterro industrial da Votorantim Celulose e Papel sediada em Jacareí/SP interrompeu uma estrada vicinal que liga o município de Jacareí ao de Guararema, além de atingir um córrego próximo, contaminando-o com resíduo formado por lodo biológico, cinzas de caldeiras e sobras de recuperação de cal (O VALE PARAIBANO, 2005).

Apesar do intenso controle dos órgãos fiscalizadores, acidentes desse tipo ocorrem frequentemente. Isso é preocupante, pois temos que considerar que à medida que a produção de celulose e papel aumenta os números relativos à geração de resíduos também crescem na mesma proporção.

Estima-se que para a fabricação de 100 toneladas de celulose, cerca de 48 toneladas de resíduos sólidos são gerados e, tudo isso, em base seca (BELLOTE et al., 2003). Na produção de papel, o volume de resíduo sólido corresponde a cerca de 1% do volume de produto acabado (NOLASCO; PIRES; SPRINGER, 2000). Enquanto que na produção de papel reciclado até 27 kg de resíduos sólidos são gerados por tonelada de papel (LIMA et al., 1998).

Soluções que levem à diminuição da necessidade de disposição em aterro ganham cada vez mais credibilidade junto ao meio empresarial.

O aproveitamento de resíduos, além de reduzir o risco ambiental do empreendimento, pode reduzir os custos com transporte e disposição, com maior retorno econômico para a indústria. Também traz resultados muito positivos em relação à imagem da empresa, pois deixa de existir o principal fator de risco: aterros completamente cheios de resíduos, armazenados eternamente; e possibilita a criação de novos empreendimentos para a fabricação dos produtos desenvolvidos com esses materiais. Essas soluções articuladas formam a base das ações de responsabilidade social da empresa, outro elemento extremamente importante para acessar novos mercados consumidores e fontes de financiamento (NOLASCO, 1993).

Ações ambientais mais pró-ativas são fundamentais como estratégia competitiva, ou seja, a gestão ambiental passa de uma função complementar para uma parte do planejamento estratégico corporativo, integrando-se a todas as funções da empresa: marketing e vendas, produção, recursos humanos, jurídica e financeira, pesquisa e desenvolvimento (BACKER, 1995).

Muitas organizações, ao obterem bom desempenho ambiental com boa gestão operacional, baixo risco financeiro e boas perspectivas de sucesso econômico futuro, estão começando a influenciar as normas de práticas corporativas (HOFFMAN, 2000).

Embora havendo uma tendência geral, essa evolução ocorre em setores empresariais de maneira diferenciada, assim como dentro de cada empresa, dependendo do nicho de mercado na qual está inserida e conseqüentemente das suas exigências e limitações operacionais. A postura e a cultura da empresa afetam significativamente as decisões tomadas sob o âmbito das demandas ambientais (CORAZZA, 1996).

O setor de celulose e papel é heterogêneo no que diz respeito aos diferentes modelos de gestão ambiental empregados. Isto decorre de uma série de fatores, dentre eles: o porte da empresa, a localização, o mercado consumidor, as regulamentações estaduais e a própria estrutura do setor (BRACELPA, 2006).

Para os grandes conglomerados empresariais, representados pelas 7 maiores empresas de celulose e papel no Brasil, a preocupação e as ações relativas aos aspectos ambientais são fator diferencial em função principalmente das barreiras não-tarifárias aplicadas ao mercado internacional, já que estas empresas são as grandes exportadoras nacionais neste setor. Em contrapartida, as empresas de pequeno e médio porte, apresentam grandes dificuldades no

cumprimento das regulamentações básicas, necessárias ao funcionamento das unidades produtivas (PIOTTO, 2003; PIZZOL; BACHA, 1998).

Deste modo, mudanças nos processos de gerenciamento dos resíduos passam a ser fundamentais para implementar estratégias de otimização de uso desse material na própria cadeia produtiva ou ainda em outras cadeias, de uma forma sistêmica, como sugere os princípios da ecologia industrial, que promove a integração dos setores industriais, com a diminuição ou eliminação dos impactos ambientais negativos na produção e no ciclo de vida do produto, e também com retorno social e econômico (HOFFMAN, 2000; MENON; MENON, 1997).

2.1.2 Geração e manejo de resíduos da produção de celulose e papel

2.1.2.1 Resíduos sólidos da indústria de celulose e papel

Resíduo é todo material descartado nas cadeias de produção e consumo que por limitações tecnológicas ou de mercado, não apresenta valor de uso ou econômico, podendo causar impactos negativos ao ambiente quando manejados de maneira imprópria (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB, 1985).

Os resíduos podem ser classificados quanto à sua origem (domiciliar, comercial, de serviços públicos, hospitalar, portos, aeroportos, terminais rodoviários, terminais ferroviários, industrial, radioativo, agrícola e entulho); quanto ao seu estado físico (sólido, pastoso, líquido e gasoso); quanto à periculosidade e composição química (Classe I - Perigosos, Classe II-A – Não inertes e Classe II-B - Inertes) (NOLASCO, 2000; NBR 10004, 2004; SÃO PAULO, 1998); quanto a sua granulometria (CASSILHA et al., 2003); entre outros.

A modificação da matéria-prima – principalmente madeiras do gênero *Eucalyptus*, em material fibroso, denominado de pasta, polpa ou celulose industrial, podem ser realizadas por processos mecânicos, termomecânicos, semiquímicos ou químicos, que geram produtos diferenciados com relação às propriedades da polpa e do papel (PHILIPP; D'ALMEIDA, 1988), resultando também numa série de resíduos com potenciais diversos de aproveitamento.

O processo químico denominado kraft constitui-se num processo químico-sulfato que utiliza hidróxido de sódio e sulfeto de sódio em pH acima de 12, a 160 – 180° C, em pressão de vapor de 800 kPa, por 0,5 por 3 horas, quando ocorre a dissolução da maioria da lignina da fibra da madeira. É o mais utilizado mundialmente para obtenção de pastas químicas com eucalipto, devido à preservação da resistência das fibras e a boa dissolução da lignina, formando uma pasta

O processo de produção de celulose envolve diferentes operações como pode ser observado na Figura 3 e descrito abaixo, segundo Philipp; D'almeida, (1988):

- a) Descascamento: etapa que pode ser realizada em dois momentos, ou no campo (onde os resíduos são dispostos sob o solo servindo de cobertura morta) ou na fábrica. Quando este é realizado na fábrica, geralmente a casca é enviada à caldeira como fonte de energia.
- b) Picagem: transformação das toras de eucalipto em cavacos de cerca de 1,5 a 2,0 cm e espessura média de 4 mm. A uniformidade no tamanho e na espessura faz com que a madeira seja cozida com mais eficiência, influenciando assim na qualidade final da polpa celulósica. Os resíduos originados nesta etapa são enviados à caldeira.
- c) Cozimento: separação da celulose dos demais compostos da madeira, pela ação de produtos químicos e calor.
- d) Lavagem: dá origem à “lixívia negra” ou “licor negro”, que é enviado para o sistema de recuperação de produtos químicos, cujo principal objetivo é reaproveitar os reagentes químicos, além de utilizar os sólidos orgânicos dissolvidos da madeira como fonte de energia.
- e) Depuração: consiste em submeter à celulose à ação de peneiramento (durante a lavagem, as impurezas solúveis são removidas, assim como as impurezas sólidas como, cavacos mal cozidos, estilhas, fragmentos de casca, que são enviados à caldeira e areia e pedras, que são descartados).
- f) Branqueamento: considerada a etapa que visa melhorar as propriedades da celulose industrial - alvura, limpeza e pureza química, em detrimento da remoção de lignina e seus derivados. Esta etapa consiste em tratar a celulose com peróxido de hidrogênio, dióxido de cloro, oxigênio e/ou soda cáustica em cinco estágios diferentes, com seus respectivos filtros lavadores. Após o branqueamento, a celulose é depurada novamente e enviada para a secagem.
- g) Formação da folha: nesta operação a água é retirada da polpa celulósica, até que esta atinja o ponto de equilíbrio com a umidade relativa do ambiente (90% de fibras e 10% de água). Esta é a etapa que gera maior quantidade de efluente hídrico.
- h) Prensagem: consiste na remoção de água por ação mecânica, com a finalidade de consolidar a posição das fibras e conceber maior resistência para a folha úmida passar para a secagem.
- i) Secagem: nesta etapa a água é removida por evaporação através da aplicação controlada de calor na folha de celulose.

j) Enfardamento: redução de uma folha contínua em outras menores, para a constituição dos fardos, para fins de transporte e carregamento.

Já o processo de produção do papel consiste nas seguintes etapas, segundo Philipp; D'almeida, (1988):

a) Preparação da massa: preparação da celulose para a produção de papel, constitui-se das seguintes operações:

- Desagregação: os fardos de celulose são encaminhados ao “*Hidrapulper*”, junto com água. Os fardos são desagregados dando origem a uma massa que é transportada para a fase inicial do processo. Em fábricas que também produzem a celulose, a massa já desagregada pode seguir via tubulação direto para refinação.
- Refinação: as fibras de celulose são refinadas, permitindo maior absorção de água e uma melhor interação na formação do papel.
- Depuração: são removidas todas as impurezas da massa.
- Colagem interna: processo no qual os produtos químicos como colas à base de breu, silicões, polietilenos, perfluorcarbonetos e colas sintéticas são adicionados à massa durante sua preparação, para se depositarem sobre as fibras com o propósito de controlar a penetração de líquidos no papel ou papelão depois de sua fabricação ou acabamento. Papéis de seda, mata-borrão, toalha, lenço, guardanapo e de uso sanitário são fabricados com o propósito de absorção rápida de líquidos, portanto não são submetidos a este processo.
- Aditivação: são melhoradas as características ópticas do papel, como a alvura e opacidade, utilizando aditivos específicos para a obtenção do papel desejado.

b) Máquina de Papel

No fluxograma da Figura 4, verificam-se os processos realizados na máquina de papel, cujas funções são especificadas em seguida:

Figura 4 – Fluxograma dos processos realizados na máquina de papel, com pontos de emissão de efluentes hídricos

Fonte: Adaptado de Philipp e D'almeida (1988)

- Caixa de entrada/Formação da folha: nesta etapa as fibras estão em suspensão com 99,5% de água e prontas para serem levadas para a máquina de papel, cuja alimentação é feita através da caixa de entrada onde se define a gramatura. A “Tela Formadora” é a etapa seguinte onde se promove a drenagem de água e o entrelaçamento das fibras, formando a folha de papel. Esta é a etapa no processo de fabricação de papel com maior geração de efluentes hídricos, em consequência da suspensão de água a que as fibras estão contidas para a formação da folha.
- Prensagem: remove a máxima quantidade possível de água da folha de papel antes de submetê-la à secagem por calor. Outras funções são a redução do volume específico e a melhora da lisura (grau de regularidade da superfície da folha). A resistência mecânica da folha úmida aumenta à medida que a água é removida. Esta etapa também é responsável pela emissão de efluentes hídricos.

- Secagem – Cilindros secadores: é o processo de remoção de água por evaporação, aplicando-se calor. O modo convencional de secagem é a passagem da folha de papel sobre cilindros aquecidos a vapor. A folha é mantida em contato com a superfície dos cilindros, por meio de feltros secadores.
- Colagem superficial: tem por objetivo aumentar a resistência à penetração de líquidos, aplicando substâncias formadoras de película, tais como: amidos modificados, gomas, alginato de sódio, álcool polivinílico, metil celulose e carboximetilcelulose (CMC), na superfície da folha de papel já formada ou em fase de acabamento.
- Secagem: após a aplicação de amido superficial é necessário realizar o processo de secagem da folha novamente.
- Calandragem: processo mecânico que visa melhorar a superfície e a espessura do papel, adequando-se aos processos futuros e à impressão. Consiste basicamente, em passar o papel entre rolos com revestimentos e acabamentos diferentes que através de compressão e fricção, conferem ao papel, maior brilho, lisura e densidade.
- Enroladeira: o papel é enrolado formando uma grande bobina para então ser submetido a cortes de tamanhos específicos, conforme o produto final.

Na produção de papel reciclado há pequenas variações no processo, que seguem o modelo ilustrado na Figura 5, onde há duas operações de retirada de materiais indesejáveis ao sistema, realizadas no turboseparador (retirada de plásticos e outras substâncias maiores) e nos depuradores (onde são retirados metais e outros materiais com maior densidade).

Figura 5 - Produção de papel e papelão reciclados
Fonte: Adaptado de Nolasco (2006)

Já com relação à emissão de efluentes hídricos na fabricação de celulose e papel, os principais pontos de geração são:

- Pátio de madeira - operações de lavagem e descascamento;
- Despejos provenientes do setor de polpação (lavagem, depuração e engrossamento e condensados do digestor e tanque de descarga);
- Branqueamento: despejos fortemente alcalinos do estágio de extração alcalina e despejos fortemente ácidos do estágio de oxidação (despejos muito variados em função da grande variação nas seqüências de branqueamento, com cargas poluidoras muito diferentes);
- Unidades de recuperação de produtos químicos: condensados dos evaporadores e despejos fortemente alcalinos da caustificação (evaporação, caldeira de recuperação e forno de cal);
- Máquina de papel;
- Refinadores;
- Caixa de regulação de consistência e;

- Mistura de massa nas peneiras depuradoras;
- Limpeza de aparas.

É importante salientar que a carga poluidora deste efluente depende de alguns fatores segundo Nolasco (2006):

- tipo de papel fabricado, pois papéis especiais requerem maior quantidade de água e consequentemente geram mais efluente (Tabela 1);
- prática ou não da recirculação da água branca (fechamento de circuito);
- separação das águas limpas das contaminadas;
- recuperação de fibras;
- melhoria nos sistemas de manejo de lodos e rejeitos e;
- prevenção de perdas acidentais e sistema de coleta de derrames.

Tabela 1 - Características do efluente hídrico da produção de diferentes tipos de papel

Característica	Tipo de Papel		
	Impressão/escrita	Jornal	Cartão duplex
Sólidos Suspensos (Kg/t)	10	10	10
DBO (Kg/t)	4,5	2	6
pH	7	5	5
Temperatura (°C)	40-43	40-43	40-43
Vazão (m ³ /t)	15	11	18

Fonte: Lima et al, (1998)

Nas diferentes etapas da produção de celulose e papel são produzidos diferentes resíduos, como destacado na Figura 3. Estes são apresentados de forma descritiva segundo Nolasco (2000).

- Cascas: rejeito da área preparação da madeira que não se prestam à queima nas caldeiras de biomassa em função da presença de contaminantes inorgânicos;
- Cinzas: geradas na combustão dos cavacos energéticos e de cascas, ou do carvão mineral nas caldeiras auxiliares de geração de energia. Composta por frações de areia, carvão e cinzas em uma mistura heterogênea;
- Licor negro: solução originada da decomposição dos constituintes da madeira, contendo reagentes químicos e extrativos (fenóis, ácidos carboxílicos, compostos sulfurados, ácidos graxos, etc). É, portanto rico em matéria orgânica e inorgânica;

- d) Dregs: impurezas resultantes do processo de clarificação do licor verde. É um material rico em cal, sulfatos e compostos de ferro. Considerado o resíduo gerado de maior volume no processo kraft. É classificado como resíduo de classe II de acordo com a norma ABNT (NBR 10.004), entretanto em função do alto pH (10,7): pode ser enquadrado como classe I - materiais corrosivos;
- e) Grits: resíduo gerado no processo de caustificação do licor verde, após separação da lama contendo carbonato de cálcio e hidróxido de cálcio. Rico em óxido de cálcio e impurezas do processo da queima da lama de cal e do calcário nos fornos de cal;
- f) Rejeito de depuração: impurezas presentes junto a polpa não-branqueada e branqueada;
- g) Lodo primário: material sedimentado nos decantadores primários do sistema de tratamento de efluentes. Constituído basicamente de fibras, areia e outras impurezas predominantemente minerais;
- h) Lodo secundário ou biológico: formado pela transformação da matéria orgânica solúvel presente no efluente no tratamento biológico. Formado por material orgânico na forma de flocos biológicos de microrganismos, rico em nutrientes como fósforo e potássio;
- i) Lodo terciário: gerado no tratamento terciário através de precipitação química, normalmente com sulfato de alumínio e algum polieletrólito. Composição básica: hidróxido de alumínio, precipitados de hidróxidos, fosfatos, colônias de bactérias remanescentes do tratamento secundário;
- j) Resíduo domiciliar (lixo doméstico);
- k) Resíduos de serviços de saúde;
- l) Entulho.

Na Tabela 2, encontram-se os valores médios de geração de resíduos sólidos por uma unidade produtiva.

Tabela 2 - Produção de resíduo por operação

Operação	Tipo	Kg/t celulose seca
Manuseio madeira	Areia	13
Caldeira	Cinza	8
Caustificação	Dregs	3
	Grits	12
Planta química	Lamas	0,4
ETE	Lodos	28
Outros		1
Total		65,4

Fonte: Lima et al., (1998)

A implementação de estratégias que possam diminuir a geração de resíduos e favorecer seu posterior aproveitamento é parte da gestão integrada de resíduos industriais. Para tanto, algumas medidas consideradas fundamentais são:

- Utilizar matéria-prima de boa qualidade;
- utilizar combustíveis que geram pouca cinza - gás natural ou óleo combustível;
- monitorar a geração de resíduos e segregar para melhor aproveitamento;
- realizar a compostagem do lodo biológico;
- enviar o rejeito da depuração para produção de energia;
- estudar a possibilidade de envio de lodos para a produção de papel de baixa qualidade (como por exemplo para a produção de “caixa de ovo”);
- estímulo a usos externos.

2.1.2.2 Sistemas de tratamento de resíduos em indústrias de celulose e papel

Os efluentes hídricos da produção de celulose e papel são enviados à estação de tratamento de efluentes – ETE (Figura 6) que seguem geralmente o modelo descrito por Silva, (2006):

- tratamento primário: retirada de sólidos grosseiros, por equipamentos que utilizem processos físicos simples como gradagem e decantação;
- tratamento secundário: é um tratamento biológico onde a carga orgânica entra em contato com microorganismos que a decompõem. Constituído por lagoas de estabilização, lagoas aeradas, lodos ativados e/ou filtros biológicos. Nesta etapa o principal objetivo é a redução da DBO (demanda bioquímica de oxigênio);
- tratamento terciário: consiste em processos que melhoram as características das águas residuárias como DBO e DQO (demanda química de oxigênio), além de processos para a remoção de cor como absorção química, além da redução de espuma e de sólidos inorgânicos.

É necessário ressaltar que pode haver várias combinações nos tipos de equipamentos assim como no número de etapas e processos, conforme o projeto adotado pela empresa.

O lodo da indústria de papel pode ser dividido nas seguintes categorias, segundo Boni; D'aprile e Casa (2004):

- a) Lodo primário: resíduo proveniente da primeira etapa do tratamento de efluentes;
- b) Lodo secundário: o lodo ativado do sistema biológico;
- c) Lodo combinado: resíduo da produção de papel com o biológico (lodo ativado); e.
- d) Lodo de destintamento: resíduo de lodo da produção de papel reciclado por remoção das tintas das fibras;

Figura 6 – Fluxograma geral de uma estação de tratamento de efluente hídrico de indústria de celulose e papel.

Fonte: Beal; Monteggia; Giustina (2006)

A maior fração dos resíduos sólidos é composta pelo lodo gerado no tratamento primário de efluentes hídricos. O lodo secundário e o terciário são de difícil desidratação. O tratamento do lodo é feito normalmente em várias etapas, inicialmente pelo adensamento e seguido pelo condicionamento e desidratação. O teor de sólidos do lodo biológico pode ser aumentado quando ele é misturado com o lodo gerado no tratamento primário, que é rico em fibras. O lodo misto pode ser desidratado a níveis de 25 a 35% de sólidos secos utilizando-se filtros-prensa, e de 40 a 50% com equipamento tipo “*screw-press*” precedido de pré-tratamento com vapor (PIOTTO, 2003).

A composição do lodo do tratamento de efluentes hídricos de indústrias de celulose e papel é variável, dependendo das matérias-primas, dos tipos de papéis produzidos, dos processos produtivos empregados e do sistema de tratamento do efluente hídrico. É necessário também salientar que há diferenças entre as indústrias integradas (que produzem celulose e papel) quando comparadas àquelas que só fabricam papel. Esta se deve principalmente aos efluentes do branqueamento, ricos em matéria orgânica dissolvida (MOUNTEER, 2000).

2.1.2.3 Quantidades de resíduos sólidos gerados na produção de celulose e papel

Os dados relativos à geração de resíduos ainda são limitados e os valores reportados por algumas fábricas suecas e finlandesas, e variam enormemente. Os valores reportados para processo kraft, em base seca, são apresentados na Tabela 4, enquanto que a Tabela 3 traz os números relativos à geração de resíduos por categoria de produção (PIOTTO, 2003).

Tabela 3 - Geração de lodo por categoria de produção por processo de polpação

Categoria de Produção	kg sólidos/ton de produção (base seca)
Polpação química	9 – 68
Pasta mecânica / papel impressão e outros	9 – 45
Semiquímico / meio corrugado	9 – 27
Destintamento / papéis finos e higiênicos	36 – 136
Fábrica não- integrada / papéis finos	9 – 36
Papelão reciclado	0 – 27

Fonte: Lima et al, (1998)

Tabela 4 - Geração de resíduos sólidos em fábricas de celulose européias de processo Kraft.

Unidade	Tipo de resíduo	Quantidade Kg/ADT*	Total Kg/ADT*
Polpa kraft branqueada	Cinzas	2,0	15
	Dregs	10,0	
	Resíduos de madeira	3,4	
	Rejeitos de celulose	0,3	
	Lama do forno de cal	9,7	
Polpa kraft branqueada	Dregs	8,1	45
	Lodo da estação de tratamento de águas residuárias	8,7	
	Rejeitos e cascas	6,0	
	Outros	10,5	

Fonte: Piotto (2003)

Nota: *ADT = “Air dry on”, tonelada de celulose seca ao ar

2.1.2.4 Manejo dos resíduos sólidos

O grande desafio encontrado pelas empresas do setor de celulose e papel é equacionar os interesses econômicos às demandas apresentadas pelos órgãos fiscalizadores e certificadores. Isto se dá principalmente em função dos custos operacionais intrínsecos às atividades relacionadas à gestão de resíduos. A sua disposição corresponde a maior parte destes custos, pois pode ser feito em aterros da própria indústria ou em aterros particulares elevando mais ainda esses valores.

É necessário ressaltar que resíduos quando não tratados ou descartados na natureza adequadamente acarretam problemas, dentre os quais se destacam a possibilidade do resíduo se transformar em vetor na transmissão de doenças e o comprometimento de mananciais e poluição do solo ou do ar. Além de consequências implícitas quando os descartes são realizados em aterros próximos aos centros urbanos como, por exemplo, a deterioração do espaço, a degradação da paisagem urbana além da desvalorização das propriedades vizinhas (LEBÉIS, 2004).

Entretanto, algumas empresas passaram a investir em outras formas de destinação para o resíduo. A Klabin mantém uma central de tratamento e reciclagem de rejeitos industriais num horto florestal, que pode absorver mais de 98% dos rejeitos recicláveis da unidade em Guaíba, no Rio Grande do Sul (KLABIN, 2007). A Votorantim Celulose e Papel (VCP) na cidade de Piracicaba destina seus resíduos sólidos do processo de tratamento de efluentes para indústrias cerâmicas na região. Na unidade de Jacaré a mesma empresa estuda a incorporação do resíduo em tijolo adobe (tijolo sem queima) e na produção de telhas de fibrocimento, enquanto que na unidade de Luiz Antônio, 90% dos resíduos é destinado a compostagem. A empresa revela que só nesta última operação há uma economia anual de R\$ 370 mil, em virtude da substituição do adubo químico pelo composto orgânico utilizado nas florestas (VCP, 2006).

Casos como estes têm grande apelo econômico, ambiental e social, o que contribui para o estudo de novas alternativas de aproveitamento em escala regional.

De modo geral a Tabela 5 indica as alternativas de destinação dos principais resíduos da produção de celulose e papel.

Tabela 5 – Alternativas de aproveitamento dos resíduos sólidos nas indústrias de celulose e papel

Resíduo	Destinação
Cascas	Fertilizante orgânico
Dregs	Corretivo de acidez do solo
Grits	Corretivo de acidez do solo
Rejeitos	Produção de compósitos cimentícios
Lama de Cal	Corretivo de acidez do solo
Lodo primário	Cultivo de cogumelo
Lodo biológico	Compósitos cimentícios
Rejeitos Celulósicos	Fertilizante orgânico
Cinzas	Compósitos cimentícios (telhas e painéis)
	Cimento

Fonte: Nolasco (2006)

2.1.3 Compósitos cimentícios reforçados com fibra de celulose

Este trabalho tem por objetivo buscar uma alternativa de aproveitamento do resíduo sólido industrial gerado nas estações de tratamento de efluentes de indústrias de papel. Desta forma buscaram-se compósitos que, incorporando a máxima quantidade de resíduo (para reduzir o volume disposto em aterro), apresentem características físicas e mecânicas adequadas para uso na construção civil, especialmente em materiais de vedação.

Para compreender o comportamento do compósito em relação às diferentes propriedades avaliadas é necessário que se entenda o comportamento de compósitos com fibras vegetais, já que o resíduo possui em sua composição elevado teor de fibras de celulose.

2.1.3.1 Uso de fibras vegetais como reforço em compósitos cimentícios

Um material compósito é definido como a combinação de dois ou mais materiais que têm propriedades que os materiais componentes isoladamente não apresentam. Eles são, portanto, constituídos de duas fases: a matriz e o elemento de reforço, e são desenvolvidos para aproveitar os pontos fortes de cada uma das fases (BUDINSKI, 1996).

Os materiais compósitos podem ser classificados em três classes, segundo Jones (1975).

- compósitos com fibras: consistem em fibras dispersas ou alinhadas dentro de uma matriz;
- compósitos laminados: que são constituídos de camadas de diferentes materiais;
- compósitos particulados (ou em partículas): constituídos por partículas de determinado material inserido dentro de uma matriz.

Compósitos com fibras podem ser constituídos por fibras orgânicas ou inorgânicas. Para efeito deste trabalho o foco foi centrado nas fibras orgânicas vegetais, como é o caso da celulose.

Fibras vegetais, como reforço de matrizes frágeis à base de materiais cimentícios, têm despertado grande interesse nos países em desenvolvimento, em virtude de seu baixo custo, grande disponibilidade e baixo consumo de energia na produção (SAVASTANO Jr. 2000).

Os benefícios resultantes da utilização de fibras em compósitos cimentícios incluem o combate a retração plástica por secagem, que ocorre nas primeiras horas após a moldagem (TONOLI, 2006); a melhora da resistência a tração do material, em função do posicionamento das fibras, que proporcionam a diminuição de microfissuras; e a versatilidade de emprego na construção civil (MEHTA; MONTEIRO, 1994)

No caso particular da indústria de construção civil, John; Agopyan e Pegoraro (1993) afirmaram que as matrizes mais empregadas são as frágeis (que rompem-se sem deformação plástica), notadamente: pastas, argamassas e concretos de aglomerantes minerais, como o cimento Portland e, em menor escala, a cal e o gesso. As fibras vegetais apresentam baixo módulo de elasticidade, sendo responsáveis pelo grande acréscimo da resistência ao impacto dos compósitos, devido ao elevado alongamento na ruptura (AZIZ; PARAMASIVAN; LEE, 1986; NEITHALATH, 2006)

Agopyan e Savastano (1997) ressaltam ainda que 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 adequado (NEITHALATH; WEISS; OLEK, 2004). Enquanto que Beraldo (1997) e Soroshian (1997) citam ainda a baixa massa específica, baixa condutividade térmica, resistência ao fogo, impermeabilidade e resistência mecânica que, embora não seja tão alta quanto a do concreto, mostra-se adequada para aplicações em placas delgadas de uso freqüente na construção civil.

Sabe-se que as fibras vegetais de cadeia longa, como o sisal, sofrem bastante influência das intempéries e da alcalinidade do meio a que são expostas (RAMASWAMY et al., 1983), por este fato é que diversos estudos estão sendo conduzidos buscando analisar a durabilidade dos compósitos constituídos com fibras vegetais. De acordo com John; Agopyan (1997), alternativas tais como a impermeabilização da matriz, o tratamento prévio das fibras 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.

2.1.3.2 Características da madeira e das fibras de celulose

A madeira é um material heterogêneo, sendo sua variabilidade estrutural e química refletida numa ampla gama de propriedades físicas, tais como: densidade permeabilidade; comportamento quanto à capilaridade; condutividade térmica; difusão da água de impregnação, entre outras (BRITO; BARRICHELO, 1988).

A madeira caracteriza-se como um material constituído fundamentalmente por compostos de elevado grau de polimerização e peso molecular como a celulose, as hemiceluloses e a lignina, considerados seus componentes fundamentais (BRITO; BARRICHELO, 1988). Entretanto, componentes acidentais também podem ser encontrados. Cada componente possui uma função específica, como verifica-se a seguir:

a) Componentes Fundamentais

- Celulose: responsável pela formação da fibra vegetal, ou seja, as moléculas de celulose se alinham, formando as microfibrilas, as quais formam as fibrilas. Essas por sua vez, se ordenam para formar as sucessivas paredes celulares da fibra (Figura 7), onde o ângulo de deposição das microfibrilas é mostrado pelas linhas oblíquas na parede primária e na parede secundária (BARRICHELO; BRITO, 1985). Celulose é um polímero de glicose, cuja fórmula química é $C_6H_{10}O_5$.

Figura 7 – Diagrama da estrutura de uma fibra
Fonte: Naik et al. (2003)

A celulose possui alto grau de polimerização e cristalinidade e apresenta efeitos da degradação, seja ela mecânica, química ou térmica, quando comparados aos componentes não celulósicos co-formadores das fibras (VAN VLACK, 1970 *apud* SILVA, 2002).

- Hemiceluloses: considerados os principais polissacarídeos não-celulósicos da madeira e que estão presentes em quantidades apreciáveis em outros vegetais. Junto à celulose forma a fração da madeira denominada holocelulose (PHILIPP; D'ALMEIDA, 1988).
- Lignina: substância amorfa, altamente polimerizada, responsável pela formação da lamela média, (camada externa das fibras), que “cimenta” as fibras (FENGEL; WEGENER, 1984). É o 3º componente fundamental em importância na madeira (15 a 35% de seu peso), localiza-se principalmente na lamela média (PHILIPP; D'ALMEIDA, 1988).

b) Componentes acidentais:

- extrativos: não são integrantes da parte estrutural da parede celular ou da lamela média. A maioria é solúvel em solventes orgânicos neutros ou água.
- componentes minerais: cálcio, magnésio, fósforo e silício são os componentes facilmente encontrados (BARRICHELO; BRITO, 1985).

2.1.3.3 Propriedades dos compósitos cimentícios reforçados com fibra de celulose

Sabe-se que compósitos de fibrocimento apresentam maiores energias específicas, ductibilidade, capacidade de flexão e resistência à fratura quando comparados a materiais não fibro-reforçados (TONOLI, 2006).

A presença de fibras junto a matrizes de cimento diminui também a velocidade de propagação das fissuras. Isto ocorre porque para uma fissura transpor uma fibra exige-se um trabalho adicional na deformação, como o arrancamento ou a ruptura desta fibra. O mesmo efeito é também responsável pelo surgimento de múltiplas fissuras, aumentando ainda mais a dissipação de energia (Figura 8). É por esta razão que os compósitos reforçados com fibras resistem melhor aos esforços de manuseio e uso que os materiais frágeis, mesmo eventualmente tendo uma resistência a compressão, tração e flexão inferiores a matriz original (JOHN; AGOPYAN; PEGORARO, 1993).

Figura 8 – Efeito das fibras como reforço de matrizes frágeis

Fonte: John; Agopyan; Pegoraro (1993)

O emprego de fibras também reduz o risco da fissuração devido à retração por secagem de matrizes. Este efeito é notável mesmo quando se empregam fibras de baixo módulo de elasticidade como as plásticas e as vegetais (AGOPYAN, 1991).

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

- fragilidade;
- baixo módulo de elasticidade;
- alta absorção de água;
- suscetibilidade ao ataque de fungos e insetos;
- redução da durabilidade em meio alcalino;
- grande variabilidade dos diferentes tipos de fibra, que levam a um desenvolvimento lento do setor por falta de informações precisas sobre suas estruturas e propriedades (SWAMY, 1990; JOHN et al., 1990; SOROUSHIAN; MARIKUNTE, 1992; NOLASCO, 1993).

O comportamento mecânico adequado e a manutenção do desempenho ao longo do tempo dos compósitos reforçados com fibras vegetais dependem de alguns fatores considerados importantes na sua estrutura interna e está relacionado à capacidade potencial que o compósito possui de absorver os esforços aos quais foi submetido, ou seja, da sua tenacidade e da manutenção da integridade das características de sua microestrutura. Essas propriedades dependem do tipo e das características da matriz, do tipo e da rigidez da fibra empregada e das características na interação entre esses dois constituintes (SILVA, 2002).

Matrizes compostas por matérias-primas distintas apresentam composições próprias em seus produtos hidratados. A composição desses produtos hidratados ajudará a definir as propriedades físicas e mecânicas do compósito. A presença de portlandita (cristais de hidróxido de cálcio) em excesso, por exemplo, pode levar a uma concentração desses cristais nas interfaces das fibras com a matriz, produzindo uma aderência deficiente em função do aumento da porosidade do sistema. Essa concentração também contribui para a diminuição na durabilidade da fibra, em contato direto com o material alcalino (SILVA et al., 2005).

Savastano Jr. (2000) ao avaliar a influência da microestrutura nas propriedades mecânicas do compósito, concluiu que, ao se empregar fibras vegetais, o mecanismo de arrancamento da fibra do interior da matriz é mais importante que a ruptura da própria fibra, ou seja, compósitos

reforçados com fibras de baixo módulo tendem a se romper devido ao arrancamento das fibras do interior da matriz e não em função da sua ruptura. Isso é explicado pelas altas deformações suportadas por este tipo de fibra antes da ruptura, incompatível com as deformações da matriz, aliada à resistência de aderência fibra-matriz inferior à resistência à tração da fibra.

A Figura 9 mostra a representação de uma fissura atravessando um compósito reforçado com fibras, na qual: o número (1) representa uma fibra rompida; o (2) representa uma fibra arrancada; enquanto o (3) representa uma fibra íntegra atravessando a fissura. A fibra (2) exemplifica um caso onde a fibra escorrega da matriz, caso típico citado anteriormente. No caso apresentado da fibra (3), a mesma se apresenta íntegra, absorvendo parcialmente a energia a qual o material está submetido.

Figura 9 – Representação esquemática de uma fissura através de um material compósito reforçado com fibras

Fonte: Coutts (1986) apud Silva et al. (2005)

Dessa forma, a estrutura interna dos compósitos e sua interação que, por sua vez, é função da aderência entre fibra e matriz, influem de forma significativa no seu desempenho e na sua durabilidade. A aderência é influenciada em grande parte pelas características da zona de transição (SILVA, 2002).

A utilização dos conceitos de avaliação de desempenho é uma alternativa para a comprovação da viabilidade técnica de um produto, onde a partir dos conceitos de desempenho pode-se, inclusive, comparar materiais diferentes destinados à mesma aplicação (SILVA, 2002).

Quando se estuda compósitos com fibras vegetais, a avaliação de seu desempenho, deve ser a preocupação maior, já que as fibras tendem a se decompor ao longo do tempo dentro da matriz devido à alcalinidade da mesma ou à simples presença de água. A decomposição das fibras implica na redução das resistências mecânicas do compósito, e principalmente da sua ductilidade (AGOPYAN, 1991).

Deve-se frisar que a preocupação não se restringe ao fato da fibra se desfazer e assim cessar a sua função de reforço; o compósito persiste como tal, desde que se mantenha a aderência fibra-matriz, portanto, basta a destruição desta junta para que o compósito se torne um material poroso, contendo em seus vazios internos ar, água e fibras em decomposição. A fibra vegetal ao perder a aderência à matriz, deixa de funcionar como reforço e passa a ser um material de enchimento, com o agravante de ser higroscópico e putrescível (AGOPYAN, 1991).

Os principais agentes que podem degradar a fibra são: a hidratação do cimento, através da liberação de compostos de elevada alcalinidade; o CO₂, presente no ar atmosférico, produzindo a carbonatação da matriz; e ação da água e da temperatura, que podem causar a lixiviação de compostos (SILVA, 2002).

Segundo John et al. (1997), a água é um dos fatores de degradação mais importante. Sua ação, combinada a outros fatores, pode levar à decomposição de compostos presentes na fibra e à lixiviação de produtos hidratados que foram decompostos. Savastano Jr. (2000) também atenta para as variações dimensionais produzidas pelas modificações nos teores de umidade do compósito devido aos ciclos de molhagem e secagem aos quais é submetido durante o uso.

A degradação das fibras vegetais em meio alcalino deve-se, principalmente, à decomposição química da lignina e da hemicelulose, rompendo a ligação entre as células fibrosas, e em consequência, destruindo o arranjo estrutural das fibrilas nas paredes das fibras; em resumo, a fibra decompõe-se em partes menores, perdendo a sua capacidade de reforço (AGOPYAN, 1991).

Os mecanismos de degradação são a forma como os agentes se manifestam no compósito. No caso da incompatibilidade química, pode se apresentar enfraquecendo ou petrificando a fibra; a incompatibilidade física poderá causar perda de aderência entre a fibra e a matriz. Além da variação no teor de umidade do compósito, a água, pode agir como lixiviante dos produtos gerados a partir da carbonatação, causando aumento na porosidade do material (SILVA et al, 2005). Os principais mecanismos são: a decomposição e petrificação das fibras e a carbonatação da matriz.

Decomposição das fibras: ocorre quando os constituintes da fibra, principalmente a lignina e a hemicelulose presentes na lamela intercelular, são decompostos pela ação do elevado pH da água do poro da pasta de cimento. A decomposição desses produtos conduz à redução na capacidade de reforço da fibra e à quebra da aderência com a matriz. Dessa forma, com a perda de aderência na interface com a matriz, a fibra deixa de funcionar como reforço, passando a ser um material de enchimento (AGOPYAN, 1991). Quando o compósito se encontra ainda no estado fresco, essa decomposição pode inclusive retardar a pega do cimento pela liberação de substâncias de caráter ácido (SAVASTANO Jr., 1992).

Petrificação das fibras: ocorre quando as lacunas presentes nas fibras são preenchidas, parciais ou totalmente, com os elementos químicos provenientes dos produtos hidratados do cimento. Esse acúmulo provoca um enrijecimento na estrutura da fibra, impedindo-a de se deformar, prejudicando, dessa maneira, a sua capacidade de absorver energia e tornando seu comportamento frágil, refletindo-se principalmente na tenacidade do compósito (SILVA, 2002).

Carbonatação da matriz: potencializada devido à alta porosidade do compósito, que facilita a penetração do CO₂ permitindo, dependendo do cimento, formação de carbonato de cálcio no interior do material. Seu efeito, em compósitos a base de cimento Portland, pode ser descrito como benéfico ao material. O consumo de álcalis, presentes nos poros do material, conduz a uma diminuição da alcalinidade do meio, fornecendo, por consequência, um ambiente menos agressivo a fibra (JOHN; AGOPYAN; PEGORARO, 1993).

Outros mecanismos: a biodeterioração, que ocorre devido à remoção da lignina das fibras pela ação de fungos aeróbios. A quebra das cadeias poliméricas, pela ação de radiações ultra-violeta, também pode ser considerada uma forma de degradação e perda das propriedades mecânicas. Entretanto, John; Agopyan e Pegoraro (1993) consideram este mecanismo desprezível devido ao fato das fibras estarem inteiramente embutidas na pasta de cimento.

Os indicadores de degradação são as propriedades críticas que devem ser preservadas pelo material avaliado, de forma que esse se mantenha acima de um nível mínimo para a satisfação do usuário. Dos compósitos reforçados com fibras vegetais são exigidos que suas propriedades físicas, mecânicas e microestruturais sejam afetadas o menos possível pela ação dos agentes de

degradação. A manutenção dessas propriedades é indispensável para o bom desempenho do compósito ao longo do tempo (SILVA, 2002).

Propriedades físicas: As propriedades físicas exigidas por um material compósito, se referem à sua massa específica adequada à aplicação, sua porosidade, absorção de água e os aspectos visuais apresentados pelos materiais. Os materiais esbeltos usados em coberturas, por exemplo, precisam se manter impermeáveis por motivos óbvios. Em função da sua alta porosidade, aliada à elevada absorção apresentada pelas fibras vegetais, principalmente as de celulose (aproximadamente 400%), os compósitos podem vir a apresentar problemas relativos à sua permeabilidade (SILVA et al., 2005).

Propriedades mecânicas: A utilização da resistência à compressão é uma das formas de avaliação da compatibilidade e da degradação do material, a qual indiretamente pode ser utilizada como parâmetro para avaliação da qualidade do compósito. Sua diminuição pode se caracterizar como indício de que a fibra pode estar sendo decomposta, fragilizada ou que a interface com a matriz já não mantém suas características adequadas, desta forma pode-se extrapolar para a definição do ponto ótimo de incorporação de fibras junto a matriz. Ainda tem-se a vantagem de que a resistência à compressão é uma grandeza largamente conhecida pelo meio técnico e universalmente aceita como parâmetro para avaliação da qualidade de um compósito, sendo seu controle facilmente exequível por um laboratório devidamente equipado para tal finalidade (LEVY, 2001).

Características da microestrutura: A conservação da integridade da interface é fator fundamental para a manutenção do desempenho do compósito. Problemas como o desligamento entre a matriz e a fibra pode causar redução no comportamento físico e mecânico do compósito. A microestrutura do material pode ser avaliada através de imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). As imagens podem ser obtidas a partir de superfícies polidas ou fraturadas, dependendo do que se deseja observar. Uma limitação dos ensaios de microscopia, entretanto, é a representatividade da área em análise, em relação ao todo do material, o que aumenta em muito a responsabilidade por parte das tarefas de preparo dos corpos-de-prova, escolha dos pontos para ensaio e interpretação das imagens (SAVASTANO Jr., 1997).

2.1.3.4 Aplicações dos compósitos reforçados com fibra de celulose

O uso de materiais de construção civil à base de cimento reforçado com fibras está aumentando rapidamente, atualmente com cerca de 1,3 bilhão de metros quadrados e 28 milhões de toneladas de produção anual estimada em todo mundo (HEINRICKS et al., 2000), em especial nos países desenvolvidos. A justificativa para isso está na possibilidade de produção de componentes esbeltos (leves), com bom desempenho mecânico (elevada absorção de energia, diante de esforços dinâmicos, por exemplo), bom isolamento termoacústico, além da indispensável viabilidade econômica (AGOPYAN, 1991).

Um dos principais argumentos para a utilização de fibras vegetais é a possibilidade de reposição das áreas plantadas, sendo um recurso renovável, diferente das reservas minerais, como asbesto, que se caracterizam como recursos não renováveis.

Em diversos países, inclusive no Brasil, há uma crescente tendência de rever a utilização do amianto crisotila, especialmente no reforço de matrizes de cimento, que ainda representa em torno de 74% do fibrocimento produzido anualmente na América do Sul e Central, principalmente para elementos de cobertura (HEINRICKS et al., 2000). Como suporte para esta tendência, alegam-se graves problemas de saúde, com incidência preocupante, sobretudo nos trabalhadores da indústria da construção (HARRISON et al., 1999; TONOLI, 2006).

O fato de o Brasil ser um dos maiores produtores de fibras vegetais demonstra a grande expectativa em se adaptar o seu uso para reforço em matrizes cimentícias como alternativa ao uso das fibras de amianto. Seu uso pode reduzir o consumo de energia, conservar recursos escassos e gerar alternativas para o problema habitacional, intensificando as infraestruturas locais. A fragilidade inerente a essas fibras pode ser superada por estudos microestruturais e micromecânicos, sendo estes, pontos da engenharia que precisam ser mais intensivamente pesquisados (SWAMY, 1990; TONOLI, 2006).

Na construção civil os inúmeros materiais utilizados apresentam características frágeis (gesso, cimento, argamassa de cimento e concreto) e com a adição de fibras tem-se uma melhoria na resistência à tração e flexão, conferindo maior ductilidade e resistência a choques. No caso particular do cimento puro, tem-se elevada resistência à compressão, baixíssima ductilidade e grande facilidade de moldagem. Essa fragilidade excessiva pode causar fratura do material, por impacto, durante o processo de desmoldagem ou transporte. Com inclusão das fibras o aumento da ductilidade é considerável e com isso tem-se produto de melhor qualidade e segurança.

Entretanto, existe uma tendência à queda na resistência à compressão, que deve ser avaliada para definição do volume máximo de fibra a ser incorporado em um compósito (FUJIYAMA et al., 1999).

Segundo Swamy (1990), o emprego dos compósitos em placas, telhas de cobertura e componentes pré-fabricados estruturais e de vedação representa significativa contribuição para o rápido crescimento da infra-estrutura desses países. Também nos países desenvolvidos, o uso de fibrocimentos que utilizam polpa celulósica como reforço tem sido consagrado, graças a constantes aperfeiçoamentos das matérias-primas, processos produtivos com consumo racionalizado de energia e custos de investimento cada vez menores (COUTTS, 1992).

Goroyias et al. (2004) também cita a produção de painéis com fibra residual da indústria de papel com vantagens nas características mecânicas, térmicas e acústicas, entretanto com a desvantagem de ser pouco flexível e susceptível a umidade e a degradação. O mesmo autor cita ainda o que ele denomina de híbrido de MDF (*medium-density fiberboard*) a partir da adição de resinas junto ao resíduo para melhorar as características da moldagem e do processo de cura.

Neste panorama, a celulose se destaca como uma matéria-prima particularmente importante devido a sua ocorrência, abundância, e pelo uso disseminado na produção de papel além de ser considerada com grande potencial no reforço em materiais de construção (RAMASWAMY; AHUJA; KRISHNAMOORTHY, 1983). O Instituto Americano do Concreto (1996) recomenda o uso de fibras de polpa Kraft como reforço em materiais cimentícios em virtude da retirada de grande parte da lignina e de hemiceluloses consideradas menos resistentes à alcalinidade (KURTIS, 2005 apud TONOLI, 2006).

2.1.3.5 Uso do lodo de resíduos da produção de celulose e papel em compósitos cimentícios

O uso do lodo do tratamento de efluentes hídricos de indústrias papeleiras constitui objeto de pesquisa em diversas instituições (NAIK; KRAUS, 1998; THOMAS; THOMAS; HOVER, 1987; ALKIRE; NEWTON, 1975; SOH; SOH; LEE, 1995; PERA; AMROUZ, 1998). Algumas vantagens apontadas no uso desse resíduo em materiais de construção estão relacionadas:

- a economia de água, já que o resíduo é naturalmente úmido (NOLASCO, 1993);
- presença de material inorgânico, caulim, que tende a diminuir a porosidade do material (SOROUSHIAN, 1990; SOROUSHIAN, 1994; SOROUSHIAN; MARIKUNTE, 1992);
- presença de fibras celulósicas que tendem a diminuir as microfissuras características em materiais cimentícios (SOROUSHIAN, 1990, SOROUSHIAN; MARIKUNTE; WON, 1995; SARIGAPHUTI; SHAH; VINSON, 1993).

Thomas et al. (1987) desenvolveu um compósito com lodo de efluente de uma indústria de papel reciclado com potencial para uso na construção civil principalmente em blocos de construção e painéis. O resíduo em questão possuía cerca de 55% de fibras de celulose, 44% de caulim e 1% de outros materiais. Na moldagem o pesquisador constatou grande dificuldade para a dispersão das fibras celulósicas na matriz

Eires et al. (2005) utilizou o resíduo como agregado junto a fibra de celulose, desenvolvendo o que foi denominado de “*hemcrete*” atingindo até 8MPa de resistência à compressão aos 28 dias.

Naik e Kraus (1998) constataram em sua pesquisa que o uso de 1,2% de resíduo da etapa de floculação como adição em concretos, com relação a/c entre 0,39 e 0,52 promove importantes ganhos nas propriedades mecânicas. Os mesmos autores ainda submeteram o resíduo antes da adição ao concreto a uma separação mecânica, com o objetivo de homogeneizar o tamanho das partículas. Os compósitos foram moldados em 5 diferentes porcentagens de resíduo, variando de 0,2% até 1,2% em massa do concreto. Aos 28 dias submeteu os corpos-de-prova a ensaios de compressão e flexão. Foi constatada uma relação positiva entre a resistência mecânica, relação a/c e a densidade do concreto. Já com relação a degradação biológica, houve um moderado decréscimo nas propriedades mecânicas do material (SHARMAN; VAUTIER, 1986).

O aproveitamento do lodo de ETE de indústria de papel para a produção de componentes cerâmicos para vedação (blocos e tijolos) foi desenvolvido por Nolasco (1997a). Foram testados diferentes traços entre 10% a 30% de resíduos. Os resultados apontaram para a viabilidade

técnica e econômica da utilização do resíduo, em função de ganhos nas características como acabamento, resistência ao impacto, coesão e trabalhabilidade. Apresentou-se também economia de água, argila e energia elétrica na produção. Esse produto se encontra em produção comercial na cidade de Piracicaba S.P. desde o ano de 1996.

Battistelle (2002) estudou a utilização do lodo do tratamento de efluentes da indústria de celulose e papel na fabricação de adobe, tijolo sem queima. O resíduo em estudo apresentava a composição de cerca de 58,9% de fibras celulósicas residuais. Os tijolos de adobe foram confeccionados com solo arenoso proveniente do município de Bauru, SP, nos traços 0%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% e 40% em volume de resíduo. Diversos ensaios foram realizados para a caracterização dos tijolos, dentre eles: retração, absorção de água e resistência à compressão simples, assim como ensaios de intemperismo, gotejamento, verificação da ação do fogo (perda de massa, propagação das chamas e ensaio de combustibilidade dos materiais de construção), como também a obtenção de suas características térmicas e acústicas. Neste caso, a utilização é incipiente, já que o produto é bastante diferente dos convencionais, e por não passar pelo processo de queima, é rejeitado pelos consumidores. Atualmente a mesma pesquisadora desenvolve um estudo da incorporação do mesmo resíduo em placas de forro, utilizando como elemento estabilizante a resina poliuretana extraída da mamona.

Lebéis (2003) obteve bons resultados laboratoriais na incorporação do resíduo em argamassas de cimento com aditivos superplastificantes para revestimento. Neste estudo a relação a/c foi padronizada em 0,65, com traços variando entre 0% e 20% de resíduo em relação à massa de cimento. Os ensaios realizados contaram com a caracterização química e física do resíduo e ensaios nos compósitos, como: resistência à compressão simples (idades de 3, 7 e 28 dias), resistência à tração na compressão diametral, absorção de água por capilaridade e resistência de aderência à tração. Os resultados apresentaram um aumento na resistência à compressão axial e na tração por compressão diametral na incorporação de 5% de resíduo. O autor sugere que o resultado se deva ao fechamento do pacote granulométrico, proporcionado pela presença de finos no resíduo assim como também a melhor distribuição das tensões que as fibras celulósicas residuais proporcionaram. Os traços de 10 e 15% de resíduo foram indicados para o enchimento de lajes e regularização de pisos. Entretanto, não foram realizados estudos de durabilidade do compósito em idades mais avançadas além da degradação das fibras celulósicas residuais. Neste caso, não foi possível detectar a incorporação da tecnologia no mercado.

Savastano Jr. (2002) desenvolveu telhas de fibrocimento vegetal, a partir de resíduos fibrosos provenientes da filtragem de efluentes do processo de produção de celulose de eucalipto. É importante salientar que este estudo resultou no depósito da patente “Processo de obtenção de telha de fibrocimento com reforço à base de polpa celulósica, por meio de sucção de água e prensagem, e produtos assim obtidos”, registrada sob nº 0201204-9, possibilitando desta forma a transferência de tecnologia para o mercado produtivo. Atualmente se encontra em fase de testes uma telha de 250x500mm, ondulada, feita de argamassa de cimento de escória de alto-forno com fibras vegetais (CONSTRUÇÕES E AMBIÊNCIA, 2006).

Nessa linha de pesquisa, Devito (2003) também obteve resultados satisfatórios quanto às propriedades mecânicas e redução de energia com utilização de fibras de celulose residuais como reforço em telhas com base de cimento alternativo, assim como Silva (2002), que constatou a redução da massa específica e aumento da absorção nos compósitos com adição de fibras celulósicas, principalmente em função do aumento da porosidade e da presença de uma fração menos densa (fibras). No ensaio de resistência à flexão houve um acréscimo entre 40% e 150% no módulo de ruptura quando se elevou o teor de fibras de 2% para 12%. O estudo também contou com ensaios de envelhecimento natural e acelerado, sendo que este último se apresentou eficiente nos efeitos do ambiente externo nas propriedades dos compósitos. Já o efeito das fibras celulósicas após 9 meses de envelhecimento permaneceu, mesmo que reduzido pela degradação da fibra e/ou da interface fibra-matriz.

O estudo de Pimentel; Beraldo e Savastano (2004) contou com o teste de um polímero de base acrílica em dois tipos de compósitos: com polpas celulósicas (de eucalipto e da reciclagem de papel jornal) e com resíduo de *Pinus caribaea*. Foram realizados ensaios de envelhecimento acelerado por meio de ciclos de imersão em água e secagem, e por imersão em água quente, além do processo de envelhecimento natural, por exposição dos corpos-de-prova às intempéries. As propriedades físicas do compósito avaliadas foram: a massa específica, a absorção total de água por imersão e o índice de vazios, enquanto que as propriedades mecânicas avaliadas foram determinadas por meio de ensaios de resistência à tração na flexão analisando-se a tensão e a energia de ruptura; também foi determinado o módulo de deformação dinâmico, com auxílio de ultra-som. O microscópio eletrônico de varredura permitiu constatar a modificação da característica morfológica do compósito com a adição do polímero e o estado das fibras dentro do compósito ao longo do tempo. O uso do polímero melhorou o desempenho mecânico do

compósito nas primeiras idades, em função redução do índice de vazios e do aumento da massa específica aparente, além de promover uma redução da capacidade de absorção de água, denotando sua adequação para aumentar a durabilidade do compósito.

2.1 Material e Métodos

2.2.1 Planejamento experimental

O experimento foi realizado utilizando para os ensaios de retratibilidade, absorção de água, índice de vazios e resistência a compressão corpos-de-prova (CPs) cilíndricos de 50mm X 100mm e para o ensaio de isolamento acústico CPs retangulares de 230mm X 120mm moldados de acordo com as normas específicas para cada ensaio, descritas posteriormente. Já para a análise de microestrutura foram utilizados CPs de 1cm². A sequência experimental adotada encontra-se na Figura 10.

Figura 10 – Planejamento experimental

2.2.2 Material

Os materiais foram escolhidos em função da possibilidade de aplicação do resíduo em escala regional. Para tanto, foram empregados materiais de uso corrente na construção civil na região de estudo e de fácil obtenção no mercado local.

Cimento Portland

O cimento Portland utilizado foi o CP II – E – 32 (cimento Portland composto com escória – classe 32), marca Votoran. Sua composição química é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 – Características químicas do cimento CP II E

Tipo de Cimento	Resíduo insolúvel (%)	Perda ao fogo (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	CO ₂ (%)
CP II - E	≤ 2,5	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 5,0

Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2002.

Areia

Foi utilizada areia média lavada de rio, cujas características são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Distribuição granulométrica da areia

Malha # (mm)	% Retida	% Acumulada
9,5 # 3/16	4,3	4,3
4,75 # 4	4,6	8,9
2,38 # 8	5,3	14,2
1,19 # 16	16,2	30,4
0,59 # 30	20,6	51
0,297 # 50	22,6	73,6
0,149 # 100	16	89,6
Fundo	10,4	100
Módulo de finura		2,72
Dimensão máxima		9,5mm

Segundo a NBR NM26 – Agregados - amostragem, este material pode ser classificado como areia média.

Lodo de ETE das indústrias de papel

Os resíduos sólidos empregados neste estudo são resultantes do processo de tratamento de efluentes hídricos de duas indústrias de papel: a Papyrus Indústria de Papel S/A, localizada em Limeira – SP e denominada neste trabalho como indústria “A”; e a Votorantim Celulose e Papel localizada no município de Piracicaba - SP, denominada indústria “B”.

As indústrias fornecedoras dos resíduos operam em diferentes segmentos de mercado. A empresa “A” fabrica papel cartão (sólido, duplex e triplex) a partir de aparas pós-consumo (material proveniente da coleta de catadores) e de fibra virgem, branqueada e não branqueada.

Já a empresa “B”, produz papéis especiais (térmicos, autocopiativos e couché) utilizando somente polpa celulósica virgem e branqueada produzida em outras unidades fabris do Grupo Votorantim, localizadas nos municípios de Luiz Antônio e Jacareí – SP.

Efluentes hídricos são gerados na máquina de papel pela formação e prensagem da folha, e denominados de água branca. Esse material não pode ser descartado diretamente no meio por contribuir para o aumento da demanda química (DQO) e bioquímica (DBO) de oxigênio, devido a alta carga de minerais (caulim) e fibras celulósicas contendo resíduos de produtos como cola, amidos, etc. Portanto, são recolhidos e tratados para posterior disposição, gerando efluente hídrico tratado e lodo.

Em ambos os casos, o processo de tratamento de efluentes incluiu o tratamento primário e secundário. O lodo em questão é resultante destes dois processos.

Diferenças no tipo de matéria-prima, processos de produção, tratamentos empregados, e produtos finais obtidos se refletem na composição do efluente e do lodo. Portanto, é fundamental a caracterização do resíduo antes do seu aproveitamento.

Os ensaios foram realizados por laboratórios terceirizados, de acordo com as recomendações da CETESB para licenciamento e monitoramento do empreendimento, sendo um procedimento de rotina. As análises foram realizadas obedecendo as normas: NBR 10004 – Classificação de Resíduos Sólidos; NBR 10005 – Ensaio de Lixiviação; NBR 10006 – Ensaio de Solubilização e NBR 12988 – Líquidos Livres. Os laudos completos estão disponíveis no Anexo A.

Como resíduo Classe II-A, não há necessidade de realização de ensaio toxicológico para sua utilização.

Os resíduos possuem coloração marrom-acinzentada, odor característico e diferenças com relação a granulometria, quando úmidos e secos em estufa, como pode ser visualizado na Figura 11.

Figura 11 – Resíduos em estudo: (a) empresa “A” úmido; (b) empresa “B” úmido; (c) empresa “A” seco em estufa; (d) empresa “B” seco em estufa

Para complementar a caracterização química dos resíduos, foram realizadas as seguintes análises:

Análise do pH: permite avaliar compatibilidade do resíduo com o pH de hidratação do cimento, que resulta em melhor comportamento mecânico quando hidratado em meio com pH entre 6,0 e 8,0.

O pH foi obtido por amostra composta do resíduo, com 3 repetições. Esta foi determinada após a chegada do material no laboratório. As leituras foram realizadas em pHmetro digital, modelo portátil marca Digimed.

Teor de Umidade: calculado seguindo a NBR 10004 – Resíduos Sólidos – Classificação, que preconiza o teor de umidade a partir das médias das leituras de 3 amostras do resíduo. Para o cálculo do teor de umidade foi utilizada a equação 1:

$$\text{Umidade(\%)} = \left(\frac{M_{\text{úmida}} - M_{\text{seca}}}{M_{\text{seca}}} \right) * 100 \quad (1)$$

Onde:

$M_{\text{úmida}}$ = massa inicial da amostra

M_{seca} = massa seca em estufa

Após a tara do recipiente e a pesagem de 100g do material, este foi submetido à secagem em estufa à 90° C para a eliminação da umidade natural do resíduo. Após 24 horas, o mesmo foi retirado e submetido à pesagem. O teor de umidade foi determinado pela diferença entre peso úmido e peso seco, de forma percentual. Foi considerado seco o material que possuía peso constante, após o processo de secagem.

Determinação da massa unitária em estado solto: a massa unitária foi determinada de acordo com a NBR 7251 – Determinação da massa unitária em estado solto, com 3 repetições. Após os ensaios de determinação da umidade do material, os recipientes para pesagem foram tarados, e em seguida o resíduo foi colocado no mesmo tomando o cuidado de nivelar o volume inserido às bordas do recipiente. Após essa etapa, o conjunto seguiu para a pesagem.

Determinação de sólidos fixos (SF): para a determinação dos sólidos fixos, ou ainda denominados resíduos fixos, foi utilizada metodologia descrita por PIVELI (2006), onde utilizando-se cadinho de porcelana realiza-se a tara do recipiente e aloca-se uma quantidade de resíduo no mesmo objetivando a incineração da amostra em mufla a 600° C. O que restar no cadinho é considerado a fração inorgânica/inerte do material, pois a temperatura empregada faz com que toda a matéria orgânica seja transformada em CO₂ e água. Esta metodologia permite estimar a quantidade de material orgânico no material, o que pode ser considerado o percentual de fibras residuais contidas no resíduo em estudo.

Determinação da massa específica: Os procedimentos seguiram recomendações realizadas nos trabalhos de Grande (1991) apud Nolasco (1993). Esta é uma adaptação da NBR 9776 – Determinação da massa específica. Seguiram-se as adaptações sugeridas por Grandi (1995), onde foram substituídos 200 ml de água de densidade aproximada de 1.0 g/cm^3 , por 350 ml de álcool de densidade aproximada de $0,86 \text{ g/cm}^3$. O procedimento teve início com a colocação do álcool no frasco de Chapman e em seguida o resíduo (seco até a constância da massa). Agitou-se a mistura até a eliminação das bolhas existentes. A leitura foi efetuada em seguida e o cálculo da massa específica foi obtido através da equação 2:

$$M_e = \frac{M_a}{L} - 350 \quad (2)$$

Onde:

M_e : Massa específica do resíduo (g/cm^3);

M_a : Massa da amostra do resíduo seco (g);

L: Leitura do volume ocupado pela mistura no frasco de Chapman (cm^3)

Geração do lodo e sazonalidade: informação obtida junto às empresas.

2.2.3 Métodos de produção dos compósitos

Determinação dos traços

A determinação dos traços foi realizada de forma empírica, a partir de testes preliminares variando o teor de resíduo em relação à mistura de cimento e areia e o fator água/cimento, adotando-se como parâmetro de seleção a trabalhabilidade e a resistência à compressão dos compósitos.

Os traços selecionados para estudo são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Traços avaliados

Traço	Cimento	Areia	Resíduo	Fator a/c
T ₀	1	3	0	0,65
T ₁	1	3	0,2	0,65
T ₂	1	3	0,4	0,65
T ₃	1	3	0,8	0,65
T ₄	1	3	1,2	0,65

Em função dos resultados observados, optou-se pela fixação do fator água/cimento (a/c) em 0,65 para todos os traços, considerando a umidade natural do resíduo.

Um traço testemunha (T_0), sem adição de resíduo, foi adotado como parâmetro para avaliar a evolução positiva ou negativa do desempenho dos compósitos com o aumento do teor de resíduos.

Foi observado que acima de 30% de adição de resíduo no compósito, tanto a moldagem dos corpos de prova como a resistência à compressão ficava comprometida. Isso determinou a quantidade máxima de incorporação para o estudo.

Mistura dos materiais e moldagem dos corpos de prova

Os corpos-de-prova foram moldados no Laboratório de Movelaria e Resíduos Florestais da ESALQ/USP.

A mistura foi realizada em betoneira de eixo vertical marca Menegotti, com capacidade para 120 litros, sendo os materiais pesados e adicionados na seguinte ordem:

$$[(\text{areia} + \text{cimento}) + (\text{resíduo} + \text{água})] \quad (3)$$

A sequência de moldagem adotada para os ensaios físico-mecânicos encontra-se na Figura 12, onde é possível visualizar o enchimento das fôrmas de acordo com a NBR 7215 – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão (Figuras 12a e 12b) e os corpos-de-prova moldados (Figura 12c) e após 24 horas, desmoldados e prontos para serem levados à câmara úmida para a cura, por 7 dias (Figura 12d).

Figura 12 – Sequência de moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos (a) fôrmas-de-moldagem sendo preenchidas pela argamassa; (b) compactação da argamassa nas fôrmas-de-moldagem; (c) corpos-de-prova moldados e (d) corpos-de-prova desmoldados prontos para o encaminhamento à câmara úmida

Utilizaram-se corpos-de-prova cilíndricos com dimensões de 100 mm de altura por 50 mm de diâmetro para os ensaios de: resistência a compressão (NBR 7215), retratibilidade (NBR 9779) e absorção de água, tanto por capilaridade (NBR 9779) quanto por imersão (NBR 9778).

A compactação da mistura foi feita em 4 camadas acomodadas com 30 golpes de soquete normatizado por camada, de acordo com a NBR 7215 – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão.

Processo de cura

Os corpos-de-prova foram desmoldados após 24 horas, seguindo à cura úmida por 7 dias, em câmara úmida a $23 \pm 2^\circ \text{C}$ e umidade relativa mínima de 95%. Aqueles destinados ao ensaio de resistência à compressão foram capeados com argamassa de cimento ARI (CP – V) de alta resistência inicial e areia com finura controlada no traço 1:1, para obter uma superfície regularizada.

2.2.4 Delineamento experimental

Tabela 9 – Delineamento Experimental

Cimento	Traço		a/c	Resíduo *	Nomenclatura
	Areia	resíduo			
1	3	0	0,65	-	T ₀
1	3	0,2	0,65	A	T ₁ A
1	3	0,4	0,65	A	T ₂ A
1	3	0,8	0,65	A	T ₃ A
1	3	1,2	0,65	A	T ₄ A
1	3	0,2	0,65	B	T ₁ B
1	3	0,4	0,65	B	T ₂ B
1	3	0,8	0,65	B	T ₃ B
1	3	1,2	0,65	B	T ₄ B

* Resíduo A – referente a empresa denominada de A, produtora de papel reciclado e Resíduo B – referente a empresa denominada de B, produtora de papéis especiais

2.2.4.1 Caracterização dos compósitos

A) Propriedades físicas

- Determinação da massa específica aparente

Com a determinação da massa específica em balança de precisão da marca Marte de sensibilidade de 0,01g e com os resultados das medidas dos corpos-de-prova realizadas para o ensaio de retratibilidade, foi calculada a massa específica aparente do compósito, expressa em g/cm³.

- Determinação do índice de vazios

O índice de vazios foi determinado (equação 4), utilizando os dados do ensaio de absorção de água por imersão.

$$IV(\%) = \frac{M_{sss} - M_{s_{est}}}{M_{sss} - M_{im}} \quad (4)$$

Onde:

$M_{s_{est}}$ – Massa seca em estufa;

M_{im} – Massa imersa;

M_{sss} – Massa saturada com superfície seca.

- Absorção de água

Absorção de água por imersão

Para este ensaio foram moldados 3 corpos-de-prova de cada traço e após a cura em câmara úmida, foi realizado o ensaio para determinação da absorção de água por imersão, de acordo com a NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água por imersão – índice de vazios e massa específica.

Os corpos-de-prova foram secos em estufa a 105° C ± 5° C e determinada a massa após 24, 48 e 72 horas de secagem, em balança digital da marca Marte de sensibilidade de 0,01g. Após o resfriamento, foram imersos completamente em água e pesados transcorridas 24, 48 e 72 horas de imersão. Concluída esta etapa, foram imersos em água em ebulição pelo período de 5 horas, sendo resfriados novamente e pesados.

$$Pf - Pi = \%A \quad (5)$$

Onde:

Pf = Peso final do corpo-de-prova;

Pi = Peso inicial do corpo-de-prova;

%A = Porcentagem de água absorvida pelo corpo-de-prova.

Absorção de água por capilaridade

Para este ensaio foram moldados 3 corpos-de-prova de cada traço e após a cura em câmara úmida, foi realizado o ensaio para determinação da absorção de água por capilaridade, de acordo com a NBR 9779 Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade.

Foram moldados 3 corpos-de-prova de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura, que após cura em câmara úmida, tiveram sua superfície lateral impermeabilizada com produto impermeabilizante da marca Hidronorth, esta mudança ocorreu em função da baixa eficiência na utilização da parafina.

$$Pf - Pi = \%A \quad (6)$$

Onde:

Pu = Peso final do corpo-de-prova;

Pi = Peso inicial do corpo-de-prova;

%A = Porcentagem de água absorvida pelo corpo-de-prova.

- Retratibilidade

Neste ensaio foram utilizados corpos-de-prova de 50mm de diâmetro por 100 mm de altura. Após a desmoldagem e aos 91 dias de idade foram realizadas medições do diâmetro e do comprimento dos corpos-de-prova com paquímetro digital com precisão de 0,01mm. A retratibilidade foi determinada pela média de 4 leituras de cada corpo-de-prova em cada direção e posteriormente pela média dos 3 corpos-de-prova dos traços correspondentes.

- Isolamento acústico

Foi utilizado o método desenvolvido por GRANDI (1995), onde três caixas de forma geométrica cúbica de espaço livre de 120 x 120 x 120 mm foram construídas para o ensaio em todos os traços avaliados. Dentro deste espaço, foi instalada uma campainha de 5,0 W de potência, fonte de 4,5 V e com frequência de 500 Hz. Distante 100 mm da parede externa, foi localizado o decibelímetro, marca Lutron na faixa “A” (simula audição humana) com o microfone dirigido para a fonte de ruído (Figura 13).

Após a medição do ruído de fundo da sala onde estava sendo realizado o ensaio, foram realizadas as medições com a superfície superior da caixa aberta e, em seguida, fechada. A diferença entre as aferições em dB é o isolamento acústico do material.

Figura 13 – Ensaio das propriedades acústicas (a) caixa fechada e (b) caixa aberta

- Análise da microestrutura

A análise de microestrutura foi realizada por método de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em ensaios com 1 amostra de cada traço. Esta foi retirada na porção mediana do interior do corpo-de-prova do ensaio de resistência a compressão com dimensão aproximada de 1cm².

A metodologia aplicada foi adaptada de KJELSEN (1991) *apud* SAVASTANO Jr. (1992). Essa consiste na impregnação do corpo-de-prova com resina do tipo epóxi (copolímero de epicloridrina e difenilol propano, conhecido comercialmente como Araldite) diluída em álcool etílico anidro, e submetidas a pressão negativa de 85 kPa por 2 minutos. Em seguida os corpos-de-prova foram mantidos em estufa a 50°C por 15 horas (para catalisar a polimerização de resina) e foram montadas em suportes com o auxílio de fitas adesivas. As amostras foram cobertas com ouro (260 segundos) em “sputter” adaptado ao metalizador MED 010 da Balzers, etapa

necessária visto que o material não é condutor elétrico. Em seguida foram observadas ao microscópio eletrônico Zeiss DSM 940 A, onde imagens digitalizadas, denominadas de micrografias, foram obtidas.

Esta análise foi utilizada com o intuito de verificar o aspecto da microestrutura, a distribuição das fibras contidas no resíduo dentro do compósito, e a interface fibra/matriz.

Este ensaio foi realizado no Núcleo de Apoio à Pesquisa em Microscopia Eletrônica Aplicada a Agricultura (NAP/MEPA) ESALQ/USP.

B) Ensaio mecânico

- *Resistência à compressão simples*

O ensaio de resistência à compressão simples (NBR 7215, 1996) foi realizado no Laboratório de Construção Civil da Escola de Engenharia de São Carlos - USP, com máquina universal de ensaios (Figura 14). Foram ensaiados 6 corpos de prova de cada traço aos 7, 28 e 91 dias de idade. Optou-se pela realização de análise de regressão nos dados obtidos, visto que os mesmos apresentaram interação tripla significativa entre os traços aplicados, as idades e as empresas.

Figura 14 – Corpos-de-prova submetidos ao ensaio de resistência à compressão (a) visão da máquina de ensaio; (b) corpo-de-prova preparado para o ensaio e (c) corpo-de-prova TO após ruptura

C) Avaliação da durabilidade

Ensaio de envelhecimento acelerado

O ensaio de envelhecimento acelerado foi realizado de acordo com a metodologia proposta por Neves (2003). Foram aplicados aos corpos de prova, ciclos de 24 horas de imersão em água a 80°C, seguida de 24 horas de secagem em estufa com circulação de ar à mesma temperatura. Perfazendo um total de 10 ciclos, ensaiando os corpos-de-prova a resistência à compressão a cada término das séries propostas, totalizando 480 horas de exposição. O processo de envelhecimento iniciou-se 28 dias após a moldagem dos corpos de prova.

Entretanto, este ensaio só foi realizado para compósitos da empresa “B”, isto ocorreu em função dos resultados insatisfatórios encontrados, pois a metodologia não se mostrou eficaz para o estudo da durabilidade deste tipo de material.

2.2.5 Análise estatística

A análise estatística foi realizada no software SAS e foi empregada como ferramenta para subsidiar as comparações entre as médias. Foram realizadas comparações múltiplas entre grupos de resultados, empregando teste de Tukey. A análise de variância (ANOVA) foi utilizada para aceitar ou não a hipótese de igualdade entre resultados ensaiados. O nível de significância adotado foi de 5%, indicando que são considerados diferentes os grupos cuja significância seja menor que este valor.

2.3 Resultados e Discussão

Esta etapa busca esclarecer dois pontos fundamentais neste trabalho: (i) através do estudo das propriedades físicas e mecânicas dos compósitos produzidos com o lodo de ETE das duas empresas se há diferença significativa no desempenho dos compósitos em função das diferenças de composição dos resíduos e; (ii) se há influência do teor de resíduo incorporado a matriz cimentícia (traço) nas características estudadas para o compósito.

2.3.1 Caracterização dos resíduos

2.3.1.1 Volume gerado e sazonalidade

Partindo do princípio que:

- I. a quantidade de resíduo disponível em um local deve ser suficientemente grande para justificar o desenvolvimento de alternativas de aproveitamento em materiais de construção;
- II. a geração deve ser preferencialmente constante ao longo do tempo, ou caso haja sazonalidade, o resíduo deve ser passível de armazenamento com custo viável e sem que haja comprometimento de características que possam inviabilizar o aproveitamento ou representar riscos ao ambiente ou à saúde pública.

Os resultados apresentados na Tabela 10 indicam que o lodo de ETE de indústria de papel possui grande potencial de aproveitamento. Grandes volumes são gerados ao longo de todo o ano e, além disso, estão centralizados em um único ponto de saída em cada empresa.

Tabela 10 – Geração mensal de resíduo por empresa

Em- pre- sas	Geração de resíduo (ton/base seca por mês)												Mé- dia	DP*
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
A	301	236	300	249	271	233	395	258	366	398	322	337	306	59,1
B	182	128	181	162	129	135	193	157	186	180	206	205	171	27,8

Nota: * Desvio padrão

O volume de resíduos gerado ao longo do ano permite dizer se há ou não sazonalidade. Esta informação é importante, pois define a compatibilidade do uso do resíduo a sua viabilidade de aproveitamento (NOLASCO, 1993), já que as soluções técnicas compatíveis podem ser embasadas na demanda de resíduo a ser utilizado.

2.3.1.2 Características químicas do resíduo

A composição química, obtida a partir de dados secundários dos laudos das análises realizadas periodicamente por exigência da CETESB (Tabela 11) em laboratórios credenciados (Anexo A) permite classificar ambos os resíduos como Classe II A – resíduos não perigosos e não inertes (NBR 10004).

Tabela 11 – Caracterização química dos resíduos em estudo

(continua)					
Parâmetros	Unidade	LQ*	Resultados Analíticos Empresa "A"	Resultados Analíticos Empresa "B"	VMP** NBR10004
1 – Solubilizado					
Arsênio	mg/L	0,05	<LQ	<LQ	0,05
Bário	mg/L	0,1	<LQ	0,65	1
Cádmio	mg/L	0,005	<0,005	<LQ	0,005
Chumbo	mg/L	0,05	<LQ	<LQ	0,05
Cianetos	mg/L	0,1	<LQ	<LQ	0,1
Cromo Total	mg/L	0,05	1,26	<LQ	0,05
Fenóis	mg/L	0,001	<LQ	0,06	0,001
Fluoretos	mg/L	0,1	0,07	0,14	1,5
Mercúrio	mg/L	0,001	<LQ	<LQ	0,001
Nitratos	mg/L	0,1	0,19	9,6	10
Prata	mg/L	0,05	<LQ	<LQ	0,05
Selênio	mg/L	0,01	<LQ	<LQ	0,01
Alumínio	mg/L	0,05	<LQ	1,01	0,2
Cloretos	mg/L	5	2,0	440	250
Dureza	mg/L	5	48,0	<LQ	500
Ferro	mg/L	0,05	0,38	28,0	0,3
Cobre	mg/L	0,05	<LQ	<LQ	1
Manganês	mg/L	0,05	<0,33	3,0	0,1
Sódio	mg/L	0,5	18,0	3,5	200
Surfactantes	mg/L	0,1	1,56	0,1	0,2
Sulfatos	mg/L	5	11,23	5	400
Zinco	mg/L	0,05	<LQ	<LQ	5
2 – Lixiviado					
Arsênio	mg/L	0,05	<LQ	<LQ	5
Bário	mg/L	0,1	<LQ	0,15	100
Cádmio	mg/L	0,05	<LQ	<LQ	0,5

Tabela 11 – Caracterização química dos resíduos em estudo

					(Conclusão)
Parâmetros	Unidade	LQ*	Resultados Analíticos Empresa “A”	Resultados Analíticos Empresa “B”	VMP** NBR10004
Chumbo	mg/L	0,05	<LQ	<LQ	5
Cromo total	mg/L	0,05	<LQ	<LQ	5
Fluoretos	mg/L	0,1	0,10	0,10	150
Mercúrio	mg/L	0,05	<LQ	<0,05	0,1
Prata	mg/L	0,05	<LQ	<LQ	5
Selênio	mg/L	0,05	<LQ	<LQ	1
Volume de Ac. Acético 0,5 N	ml		131	3	Até 400
Tempo de lixiviação	Horas		24	24	24-28
3 – Massa Bruta					
Umidade	mg/kg	0,05	11,0	34	-
Berílio	mg/kg	1	<LQ	<LQ	100
Cromo VI	mg/kg	1	<LQ	<LQ	100
Mercúrio	mg/kg	1	<LQ	<LQ	100
Vanádio	mg/kg	1	<LQ	1,88	1000
Chumbo	mg/kg	1	<LQ	1,86	1000
Selênio	mg/kg	1	<LQ	<LQ	100
Arsênio	mg/kg	1	<LQ	<LQ	1000
Cianetos	mg/kg	1	<1	<LQ	1000
Fenóis	mg/kg	0,5	1,3	0,96	10
Hidrocarb. Líquidos/ Bombeáveis	%	0,05	<LQ	<LQ	5
Óleos e Graxas	%	0,05	<0,05	<LQ	1
Líquidos Livres		Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
		e			
Níquel	mg/kg	1	<1	...	-
Cádmio	mg/kg	1	<1	...	-
Cobre	mg/kg	1	19.5	...	-
Zinco	mg/kg	1	52.4	...	-

Fonte: Empresa A - BIOAGRI Laboratório Ltda, 2003;

Empresa B – HIDROLABOR Laboratório de Controle de Qualidade S/C Ltda, 2004.

Nota: LQ*: Limite de Quantificação;

<LQ: Menor que o Limite de Quantificação;

VMP**: Valores Máximos Permitidos pela Norma ABNT NBR 10004;

Sinal convencional utilizado:

... dado numérico não disponível.

A partir da análise química do resíduo é possível levantar possibilidades de aproveitamento que respeitem não só a legislação vigente como também aspectos éticos que envolvem o gerenciamento de resíduos.

O resíduo estudado é um tipo conhecido e codificado pela norma NBR 10004 como A006 no anexo H, onde estão os resíduos classificados como não perigosos. Entretanto, as diferenças em infra-estrutura, equipamentos, matéria prima e insumos nos processos produtivos de papel e celulose, papel reciclado e papéis especiais refletem em particularidades nas características químicas, como pode visto na Tabela 11.

A utilização de resíduos em materiais de construção é freqüente tema de pesquisas em todo o mundo, em qualquer situação deve se assegurar que o resíduo utilizado para este fim não oferece riscos de contaminação, do solo e/ou da água na produção do compósito como na sua utilização como elemento construtivo, ou ainda riscos à saúde de indivíduos que possam vir a manipular de alguma forma estes materiais.

pH dos resíduos

Os resultados apresentados na Tabela 12, demonstram que o pH não interfere na compatibilidade com a hidratação do cimento.

Tabela 12 – Análise do pH do resíduo das empresas em estudo

Amostras	pH*
	Valores Médios e Desvios Padrão
Empresa A	7,49 (0,04)
Empresa B	7,86 (0,21)

Nota: *Valores médios de três repetições.

O melhor comportamento mecânico é atingido quando o cimento é hidratado em meio com pH entre 6,0 e 8,0. Fora desta condição, as reações de hidratação são prejudicadas e consequentemente o desempenho mecânico também (ABCP, 2003).

Cabe ressaltar que apesar dos resíduos terem origem em processos diferenciados, ou seja, com diferentes matérias primas (empresa “A” aparas de papel e empresa “B” polpa celulósica), o pH foi similar. Isto ocorre em função do tratamento de efluentes, onde o pH é um parâmetro controlado.

2.3.1.3 Características físicas dos resíduos

Na Tabela 13 estão apresentados os resultados referentes às características físicas dos resíduos: teor de umidade, massa unitária e massa específica. Já a Figura 15 apresenta a composição orgânica e inorgânica dos resíduos.

Tabela 13 – Resultados referentes às características físicas dos resíduos			
Resíduo	Teor de umidade (%)*	Massa unitária (Kg/dm ³)*	Massa específica (g/cm ³) *
Lodo A	37,67	0,3	1,21
Lodo B	40,48	0,67	1,88

Nota: *Valores médios de três repetições

Figura 15 – Composição orgânica e inorgânica dos resíduos em estudo

O teor de umidade é um dado importante, pois dá a base para a prerrogativa de economia de água nos processos produtivos. Entretanto a umidade ideal deve ser aquela que não inviabiliza os custos de transporte do resíduo e permite vantagens no seu aproveitamento. Como se verifica na Tabela 13 a umidade dos resíduos variou em 2,81%, esta variação ocorre em função da eficiência no processo de deságüe do resíduo. Esta eficiência está diretamente ligada à infraestrutura de equipamentos de cada empresa.

Quanto à massa unitária e massa específica, os resultados indicam que há diferença entre os resíduos estudados. Esta diferença é intrínseca aos processos produtivos empregados nas duas empresas, em função dos produtos comercializados. A empresa “B” produz papéis especiais, autocopiativos e térmicos e emprega em seu processo maiores quantidades de cargas minerais (matéria inorgânica - MI) quando comparado ao processo da empresa “A” (Figura 15). É possível

também afirmar que na empresa “B” há um processo de recuperação de fibras mais eficiente, o que reflete as diferenças encontradas nos resultados de massa unitária e massa específica.

Os resultados de massa unitária indicam também que o resíduo em estudo pode ser caracterizado como um agregado leve quando comparado com a areia seca, o seixo rolado e a brita que apresentam respectivamente massas unitárias em torno de $1,60 \text{ Kg/dm}^3$ (areia seca), $1,50 \text{ Kg/dm}^3$ (seixo rolado) e $1,30 \text{ Kg/dm}^3$ (brita).

A partir dos resultados encontrados na determinação dos sólidos fixos (Figura 15) é possível afirmar que o percentual referente à matéria orgânica (MO) corresponde ao total de fibras celulósicas contidas no resíduo, enquanto que o percentual de matéria inorgânica (MI) corresponde a porção mineral, ou seja, o caulim contido no resíduo.

Esta informação pode auxiliar a decisão de uso ou não dos resíduos em matrizes de cimento, já que este parâmetro de avaliação permite conhecer o ponto ótimo de incorporação de fibras e de caulim na matriz cimentícia, a partir da comparação entre os resultados obtidos junto aos ensaios de caracterização física e mecânica do compósito.

Essas diferentes composições entre os resíduos também podem ser visualizadas nas micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (Figuras 16 e 17).

Na Figura 16, pode-se visualizar que no resíduo da empresa “A” há presença de fibras incrustadas com matéria inorgânica, enquanto que no resíduo da empresa “B”, visualizam-se placas de material inorgânico (Figura 16).

Figura 16 – Micrografias do resíduo da empresa “A”

Figura 17 – Micrografias do resíduo da empresa “B”

2.3.2 Estudo do compósito

2.3.2.1 Características físicas dos compósitos

Nesta etapa foi realizada a análise da variância dos resultados obtidos em todas as características aqui estudadas para verificar a influência dos efeitos das diferentes incorporações de resíduo (denominado de traço) das duas empresas estudadas no compósito. Quando as médias entre os traços para cada empresa apresentaram diferenças significativas, (resultado obtido quando o F calculado é maior que o F tabelado entre traços) deu-se sequência a análise, aplicando o teste de Tukey a 95% de probabilidade para comparar as médias obtidas e, portanto separar os grupos de médias semelhantes.

2.3.2.1.1 Massa específica aparente

A Tabela 14 apresenta os resultados de massa específica aparente dos compósitos.

Tabela 14 – Massa específica aparente dos compósitos

Traço	Massa Específica Aparente (g/cm ³)*								
	To	T ₁ A	T ₂ A	T ₃ A	T ₄ A	T ₁ B	T ₂ B	T ₃ B	T ₄ B
Média	0,91	0,83	0,77	0,66	0,60	0,89	0,80	0,78	0,78
Desvio Padrão	0,002 ^a	0,016 ^a	0,007 ^{a,b}	0,005 ^b	0,020 ^b	0,01 ^a	0,012 ^a	0,021 ^a	0,04 ^a

Nota: *Valores médios de três repetições;

Letras diferentes indicam diferenças significativas de acordo com o teste de Tukey a 95% de probabilidade.

Figura 18 – Massa específica aparente

Verifica-se que a medida em que se incorpora maior quantidade de resíduo, há um declínio no valor de massa específica (Figura 18). Isto se dá em função da incorporação de um material mais leve junto à matriz cimentícia. Os valores são próximos a concretos leves, como o concreto celular, que apresenta massa específica aparente em torno de $0,7\text{g/cm}^3$ (Nolasco, 1993).

Nas Tabelas 15 e 16, encontram-se os valores de análise da variância referente aos efeitos das adições de resíduo das empresas “A” e “B” respectivamente sobre a variável massa específica do compósito. É possível verificar pelo valor obtido do F calculado menor que o F tabelado que não há diferença entre as médias obtidas da variável massa específica para os diferentes traços avaliados da empresa “A”. Entretanto, esta situação não foi correspondente para a empresa “B”, que apresentou diferenças entre as médias obtidas da variável massa específica para os diferentes traços avaliados, como pode ser verificado pelo resultado do teste F na Tabela 16 e pelo teste de Tukey com 95% de probabilidade na Tabela 14.

Tabela 15 – Análise da variância referente aos efeitos das adições de resíduo da empresa “A” sobre a variável massa específica do compósito.

Causa de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	Pr(>F)
Entre traços	4	18,02	4,51	282,41	3,48
Dentro dos traços	10	0,16	0,016		
Total	14	18,18			

Tabela 16 – Análise da variância referente aos efeitos das adições de resíduo da empresa “B” sobre a variável massa específica do compósito

Causa de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	Pr(>F)
Entre traços	4	13,13	3,28	0,75	3,48
Dentro dos traços	10	43,96	4,39		
Total	14	57,09			

Deste modo é possível verificar que há grupos de médias distintos para o compósito da empresa “A” (T₃A e T₄A).

2.3.2.1.2 Determinação do índice de vazios

A análise dos dados pelo teste de Tukey com 95% de probabilidade indica que a presença do resíduo aumenta o índice de vazios (Tabela 17). Isto é um problema a ser contornado, pois as fibras celulósicas tendem a degradação ao longo do tempo. Neste caso, os vazios contidos nos compósitos tendem a ser interligados pelas microfissuras naturais do material, diminuindo, portanto sua resistência à compressão.

Tabela 17 – Índice de vazios dos compósitos avaliados

Traços	Índice de Vazios (%)*
	Valores Médios e Desvios Padrão
TO	13,4 (0,61) ^{a,b}
T ₁ A	19,4 (0,15) ^b
T ₂ A	20,4 (0,39) ^{a,b}
T ₃ A	29,1 (1,55) ^a
T ₄ A	31 (1,74) ^c
T ₁ B	20,6 (2,42) ^a
T ₂ B	23,5 (1,84) ^{a,c}
T ₃ B	23,6 (4,73) ^{a,b}
T ₄ B	27,3 (3,00) ^c

Nota: * Letras diferentes indicam diferenças significativas de acordo com o teste de Tukey a 95% de probabilidade

Nas Tabelas 18 e 19 são apresentados os resultados da análise de variância para os resíduos das empresas “A” e “B” respectivamente. Há diferenças significativas entre os traços para o resíduo das duas empresas estudadas, conforme o resultado do F calculado.

Tabela 18 – Análise da variância referente aos efeitos das adições de resíduo da empresa “B” sobre a variável índice de vazios do compósito

Causa de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	Pr(>F)
Entre traços	4	368,93	92,23	136,95	3,48
Dentro dos traços	10	6,73	0,67		
Total	14	375,66			

Tabela 19 – Análise da variância referente aos efeitos das adições de resíduo da empresa “B” sobre a variável índice de vazios do compósito

Causa de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	Pr(>F)
Entre traços	4	314,99	78,75	9,02	3,48
Dentro dos traços	10	87,28	8,73		
Total	14	402,28			

Estes valores indicam que os traços T₄ (das duas empresas estudadas) apresentam médias estatisticamente diferentes dos outros grupos (Tabela 17).

2.3.2.1.3 Absorção de água

A absorção de água é uma importante característica de um material, principalmente aqueles que possuem em sua composição fibras naturais, com alta capacidade de absorção de água e risco de deterioração. Para esta característica, foram selecionados ensaios que pudessem simular situações reais.

Absorção de água por imersão

Os resultados para a absorção de água por imersão encontram-se na Tabela 20.

Tabela 20 – Absorção de água por imersão *

Traços	% Absorção de água em 24 horas Valores Médios e Desvios Padrão
TO	7,70 (0,47) ^a
T ₁ A	9,75 (0,31) ^{b,c}
T ₂ A	10,52 (0,35) ^c
T ₃ A	17,11 (1,37) ^d
T ₄ A	18,93 (1,79) ^d
T ₁ B	8,83 (0,13) ^{a,b}
T ₂ B	8,12 (0,52) ^{a,b}
T ₃ B	7,08 (0,35) ^{a,b}
T ₄ B	7,55 (1,15) ^{a,b}

Nota: * Letras diferentes indicam diferenças significativas de acordo com o teste de Tukey com 95% de probabilidade.

Já nas Tabelas 21 e 22 encontram-se as análises de variância das empresas “A” e “B” respectivamente, onde se verifica que para a empresa “A” há diferenças significativas entre as médias conforme resultado do teste F e representado pelas letras diferenciadas ao lado dos respectivos desvios padrão. A empresa “B” não apresentou a mesma característica, isto se deve a característica do resíduo, com baixo percentual de fibras e alto percentual de caulim.

Tabela 21 – Análise da variância referente aos efeitos das adições de resíduo da empresa “A” sobre a variável absorção de água pôr imersão do compósito

Causa de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	Pr(>F)
Entre traços	4	223,53	55,88	73,48	3,48
Dentro dos traços	10	3,80	0,76		
Total	14	227,33			

Tabela 22 – Análise da variância referente aos efeitos das adições de resíduo da empresa “B” sobre a variável absorção de água pôr imersão do compósito

Causa de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	Pr(>F)
Entre traços	4	3,57	0,89	1,66	3,48
Dentro dos traços	10	2,68	0,54		
Total	14	6,25			

O comportamento do material em relação à absorção de água foi esperado em função do alto teor de fibras contidas no resíduo, principalmente da empresa “A”, em torno de 61%. Entretanto, é importante ressaltar, que mesmo com esta alta absorção de água, não houve desagregação dos componentes do compósito e nem mesmo deformação dos corpos-de-prova.

Figura 19 - Absorção de água em função do tempo de imersão

A Figura 19 demonstra que todos os traços avaliados absorvem grande quantidade de água nos primeiros 15 minutos de imersão. Os traços T₃A e T₄A se destacam, isto reflete o percentual de fibras contido nos resíduos da empresa “A”. Já os traços T₁B, T₂B, T₃B e T₄B apresentam absorção uniforme ao longo das 24 horas, em função da maior quantidade de caulim e menor quantidade de fibras celulósicas contidos no resíduo da empresa “B”.

Absorção de água por capilaridade

A análise dos dados pelo teste de Tukey com 95% de probabilidade indica que há correlação positiva entre o percentual de fibras e a absorção de água, visto que há diferença significativa entre os traços T₃A e T₄A comparativamente aos outros traços (Tabela 23).

Tabela 23 – Absorção de água por capilaridade em função dos traços avaliados*

Traços	% Absorção de água em 24 horas
T0	1,49 (0,73) ^a
T ₁ A	3,66 (0,60) ^a
T ₂ A	3,36 (0,40) ^a
T ₃ A	3,19 (0,62) ^b
T ₄ A	12,16 (1,24) ^c
T ₁ B	2,24 (0,42) ^a
T ₂ B	2,17 (0,35) ^a
T ₃ B	1,85 (0,28) ^a
T ₄ B	1,91 (0,52) ^a

Nota: * Letras diferentes indicam diferenças significativas de acordo com o teste de Tukey com 95% de probabilidade.

Já nas Tabelas 24 e 25 encontram-se as análises de variância das empresas “A” e “B” respectivamente, onde se verifica que há diferenças significativas entre as médias dos traços apresentados para o resíduo da empresa “A”, situação esta não representativa para a empresa “B”.

Tabela 24 – Análise da variância referente aos efeitos das adições de resíduo da empresa “A” sobre a variável absorção de água por capilaridade do compósito

Causa de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	Pr(>F)
Entre traços	4	195,19	48,80	81,25	3,48
Dentro dos traços	10	6,01	0,60		
Total	14	201,20			

Tabela 25 – Análise da variância referente aos efeitos das adições de resíduo da empresa “B” sobre a variável absorção de água por capilaridade do compósito

Causa de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	Pr(>F)
Entre traços	4	0,35	0,086	0,38	3,48
Dentro dos traços	10	2,35	0,23		
Total	14	2,70			

A tendência apresentada no ensaio de absorção de água por imersão também se apresenta na absorção de água por capilaridade, onde o traço T₄A se destaca. Este resultado reflete a diferença encontrada nos resíduos estudados, especialmente o maior teor de fibras encontrado no resíduo da empresa “B” (Figura 15).

A absorção de água é um parâmetro que pode determinar o uso deste compósito em diferentes componentes construtivos. Painéis, placas de forro e elementos de vedação não são componentes que se submetem, geralmente, a valores altos de umidade, podendo portanto ser uma alternativa para o uso do compósito em estudo.

Entretanto, em outros componentes cuja característica exija baixa absorção de água, pode-se contornar o problema do uso do compósito em estudo com o uso de impermeabilizantes comerciais. Porém, neste caso, o custo econômico do componente tende a aumentar.

2.3.2.1.4 Retratabilidade

Na Tabela 26 encontram-se os valores observados para retratabilidade.

Tabela 26 – Retratabilidade em função dos traços avaliados

Traços	Longitudinal (mm/m)	Radial (mm/m)
	Valores Médios e Desvios Padrão	Valores Médios e Desvios Padrão
To	0,95 (0,42)	0,70 (0,24)
T ₁ A	1,22 (0,10)	0,93 (0,07)
T ₂ A	1,30 (0,40)	0,84 (0,21)
T ₃ A	1,26 (0,25)	0,92 (0,47)
T ₄ A	1,11 (0,19)	0,80 (0,12)
T ₁ B	0,95 (0,42)	0,70 (0,24)
T ₂ B	1,42 (0,54)	0,50 (0,43)
T ₃ B	1,51 (0,46)	0,84 (0,10)
T ₄ B	1,73 (0,16)	0,96 (0,19)

Já nas Tabelas 27 e 28 encontram-se as análises de variância das empresas “A” e “B” respectivamente, para a retratabilidade longitudinal do compósito, e nas Tabelas 29 e 30 encontram-se as análises de variância das empresas “A” e “B”, para a retratabilidade radial do compósito. Pelos valores obtidos pelo teste F, não há diferença entre as médias de retratabilidade encontradas, tanto no sentido longitudinal quanto no sentido radial, ou seja, os dois resíduos estudados apresentaram comportamento similar, não apresentando diferenças significativas entre traços estudados.

Entretanto, maior retração longitudinal e radial é apresentada no traço T₄B, situação que pode estar ligada a maior presença do caulim no resíduo da empresa “B”.

Tabela 27 – Análise da variância referente aos efeitos das adições de resíduo da empresa “A” sobre a variável retratabilidade longitudinal do compósito

Causa de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	Pr(>F)
Entre traços	4,00	0,24	0,06	0,67	3,48
Dentro dos traços	10,00	0,89	0,09		
Total	14,00	1,13			

Tabela 28 – Análise da variância referente aos efeitos das adições de resíduo da empresa “B” sobre a variável retratabilidade longitudinal do compósito

Causa de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	Pr(>F)
Entre traços	4,00	1,11	0,28	1,91	3,48
Dentro dos traços	10,00	1,45	0,15		
Total	14,00	2,57			

Tabela 29 – Análise da variância referente aos efeitos das adições de resíduo da empresa “A” sobre a variável retratibilidade radial do compósito

Causa de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	Pr(>F)
Entre traços	4,00	0,10	0,03	0,38	3,48
Dentro dos traços	10,00	0,68	0,07		
Total	14,00	0,78			

Tabela 30 – Análise da variância referente aos efeitos das adições de resíduo da empresa “B” sobre a variável retratibilidade radial do compósito

Causa de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	Pr(>F)
Entre traços	4,00	0,37	0,09	1,31	3,48
Dentro dos traços	10,00	0,70	0,07		
Total	14,00	1,07			

2.3.2.1.5 Isolamento acústico

Os dados referentes aos resultados do ensaio de isolamento acústico encontram-se na Tabela 31 e na Figura 20.

Tabela 31 - Isolamento acústico

Traços	Isolamento Acústico (dB)*
TO	1,6
T ₁ A	1,1
T ₂ A	1,1
T ₃ A	0,4
T ₄ A	3,0
T ₁ B	2,6
T ₂ B	0,3
T ₃ B	2,1
T ₄ B	0,7

Nota: * Letras diferentes indicam diferenças significativas de acordo com o testes de tukey com 95% de probabilidade

Já nas Tabelas 32 e 33 encontram-se as análises de variância das empresas “A” e “B” respectivamente, para a variável isolamento acústico. É possível verificar que não há diferenças significativas entre as médias dos traços das duas empresas estudadas pelo teste F.

Tabela 32 – Análise da variância referente aos efeitos das adições de resíduo da empresa “A” sobre a variável isolamento acústico do compósito

Causa de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	Pr(>F)
Entre traços	4	3,44	0,86	3,15	3,48
Dentro dos traços	10	2,73	0,27		
Total	14	6,17			

Tabela 33 – Análise da variância referente aos efeitos das adições de resíduo da empresa “B” sobre a variável isolamento acústico do compósito

Causa de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	Pr(>F)
Entre traços	4	0,35	0,08	0,37	3,48
Dentro dos traços	10	2,35	0,23		
Total	14				

Os traços T₄A, T₁B e T₂B apresentaram, respectivamente, maiores valores de isolamento acústico.

Figura 20 – Isolamento acústico do compósito em função dos traços avaliados

Os resultados obtidos não permitem afirmar o material como bom isolante acústico isto se comparado com os resultados obtidos por Nolasco (1993) e Grandi (1995), Tabela 34.

Tabela 34 – Isolamento acústico de diferentes materiais

Material	Isolamento Acústico (dB)
Blocos cerâmicos	8-19,5*
Tijolo	7,0*
Compósito madeira-cimento	7,7-44,5**

Nota: * Dados obtidos no trabalho de Nolasco (1993);

**Dados obtidos no trabalho de Grandi (1995).

2.3.2.1.6 Análise da microestrutura do compósito

A análise de microestrutura foi realizada, com o intuito de verificar o aspecto da microestrutura do compósito, a distribuição das fibras celulósicas e do caulim dentro da matriz cimentícia além da interface fibra/matriz. Estas características influem nas propriedades mecânicas do compósito, conforme salientado por Savastano Jr. (2000), que também cita que em compósitos à base de cimento, a maior aderência fibra-matriz é conseguida por meio do melhor desempenho da zona de transição, o que implica redução da porosidade e na menor concentração de portlandita (cristais de hidróxido de cálcio).

As amostras foram obtidas por meio de ruptura, na porção mediana do interior do corpo-de-prova submetido ao ensaio de resistência à compressão. Esta forma de obtenção dos corpos-de-prova pode ter influenciado a visualização da interface fibra-matriz.

As Figuras 21a e 21b apresentam respectivamente fibras celulósicas na matriz cimentícia. Na Figura 21a pode-se visualizar fibras de celulose pouco aderidas junto a matriz, não exercendo, portanto, a função que se espera, de controle de microfissuras. Em contrapartida, na Figura 21b, a fibra celulósica encontra-se integrada junto a matriz cimentícia.

As Figuras 21c e 21d apresentam “grumos” de grande concentração de resíduo. Esta concentração se deve a dificuldade de homogeneização do resíduo junto a matriz no momento da moldagem dos corpos-de-prova, fato que pode ser minimizado com a utilização de betoneira de eixo vertical, onde a homogeneização do compósito pode ser mais eficiente.

Como o resíduo da empresa “A” possui grande quantidade de fibras celulósicas, verifica-se, portanto grande concentração de fibras dentro do compósito. Estes pontos (onde há aglomeração de resíduos) tornam o compósito mais frágil, ou seja, menos resistente a compressão. Situação também presente no estudo de Savastano Jr. (2002), que diz que a aglomeração de fibras celulósicas proporciona um aumento dos poros aprisionados e conseqüente perda de aderência das fibras. O mesmo autor cita ainda, que a retração por secagem diferenciada da matriz nas proximidades da fibra ocasiona a fissuração da zona de transição.

Figura 21 – Micrografias do compósito T₄A

A Figura 22 corresponde à microestrutura do compósito T₁A. Nas imagens verifica-se a ausência de fibras celulósicas, o que pode ter ocorrido em função da baixa representatividade da amostra (cerca de 1 cm²).

Figura 22 - Micrografias do compósito T₁A com aumento de 1000 vezes

As cargas minerais contidas no resíduo da empresa B podem ser visualizadas na Figura 23, em destaque.

Figura 23 - Micrografias dos compósitos com frações minerais dos resíduos: (a) T₂B e (b) T₄B

2.3.2.1.7 Resistência à compressão simples

Na Tabela 35 encontram-se os valores obtidos de resistência à compressão simples do compósito e a Figura 24 ilustra os corpos-de-prova submetidos ao ensaio de resistência a compressão.

Tabela 35 – Resultados referentes ao ensaio de resistência a compressão simples

Traços	Resistência à compressão (MPa) (Valores médios e desvios padrão)		
	7 dias	28 dias	91 dias
To	16,38 (1,06)	30,52 (1,64)	28,25 (2,14)
T ₁ A	6,72 (0,48)	30,52 (2,25)	12,00 (1,02)
T ₂ A	3,46 (0,19)	14,70 (0,88)	7,30 (0,55)
T ₃ A	1,36 (0,23)	10,11 (0,54)	3,37 (0,25)
T ₄ A	0,76 (0,22)	4,88 (0,61)	1,93 (0,42)
T ₁ B	5,29 (0,66)	2,24 (2,14)	14,30 (2,25)
T ₂ B	4,11 (0,38)	13,34 (0,65)	12,47 (12,24)
T ₃ B	2,28 (0,60)	4,61 (0,38)	2,20 (0,51)
T ₄ B	0,97 (0,27)	2,07 (0,45)	1,88 (1,36)

Figura 24 – Corpos-de-prova submetidos ao ensaio de resistência à compressão (a) destaque para a plasticidade do compósito com 30% de resíduo; (b) ruptura do corpo-de-prova com 5% de resíduo; (c) compósito T₃B com nichos de resíduo

Nas figuras 25 e 26 pode-se visualizar a resistência à compressão por empresa. Verifica-se que para o resíduo da empresa “A” um acréscimo para todos os traços avaliados na idade de 28 dias quando comparado a idade de 7 dias. Já para a idade de 91 houve um decréscimo para os todos os traços, com destaque para o traço T₁A, que apresentou diminuição de 60% na sua resistência à compressão. Já para a empresa “B”, o traço T₁B se destaca por não apresentar o mesmo comportamento dos demais, ou seja, a resistência à compressão aos 28 dias diminui quando comparada a idade de 7 dias e aumenta cerca de 85% na idade de 91 dias quando comparada a idade de 28 dias.

Figura 25 – Resistência à compressão do compósito da empresa “A” em função da idade

Figura 26 – Resistência à compressão do compósito da empresa “B” em função da idade

Quanto às idades estudadas é possível verificar pelas Figuras 27, 28 e 29 que há uma diminuição da resistência à compressão com maiores percentuais de incorporação de resíduo para as duas empresas, situação que pode ser explicada em função da quantidade máxima de fibras e material inorgânico ideal para a incorporação junto a matrizes de cimento. Isto ocorre, pois o comportamento não é homogêneo, ou seja, não há relação proporcional entre o aumento da quantidade de incorporação do resíduo e a queda da resistência a compressão. Há, portanto a presença de uma quantidade máxima de resíduo que pode ser incorporada e que preserva a mínima resistência à compressão necessária para diversas aplicações do compósito. Esta quantidade máxima incorporada foi denominada de ponto ótimo.

Figura 27 – Resistência à compressão do compósito aos 7 dias de idade

Pela Figura 27 verifica-se um decréscimo na resistência a compressão aos 7 dias quando se aumenta a quantidade de resíduo incorporada. Os traços com resíduo da empresa “B” são em geral mais resistentes quando comparados aos traços com resíduo da empresa “A”, exceto para o traço T1, que apresentou diferença de 1,43 MPa.

Já a Figura 28, apresenta a resistência à compressão aos 28 dias onde também se apresenta a tendência mostrada na Figura 27, com decréscimo na resistência a compressão a medida que se incorpora maior quantidade de resíduo. Nesta idade todos os traços avaliados com resíduo da empresa “A” mostraram-se mais resistentes quando comparados aos traços da empresa “B”.

Figura 28 – Resistência à compressão do compósito aos 28 dias de idade

A resistência à compressão dos compósitos avaliados na idade de 91 dias é mostrada na Figura 29, onde se verifica uma clara diferença entre os traços avaliados para as duas empresas estudadas. A empresa “A” apresenta decréscimo da resistência a medida que se aumenta a incorporação de resíduo, situação presente também nas idades de 7 e 28 dias, como visto anteriormente.

Já para a empresa “B” os traços T_1 e T_2 apresentam diferença de 1,84 MPa na resistência a compressão, respectivamente. Enquanto que os traços T_3 e T_4 apresentam diferença de 0,32 MPa. O caulim presente em maior quantidade no resíduo da empresa “B” pode explicar este comportamento, sugerindo, portanto um ponto ótimo de incorporação que pode vir a implementar a resistência na idade de 91 dias, em consequência do tamanho das partículas do caulim utilizados nas indústrias de papel (0,5 a 1,0 μ). Oliveira et al. (2004) afirmam que a finura do caulim influi na resistência à compressão de argamassas de cimento, assim como melhores resultados podem ser obtidos com a incorporação de até 30% de caulim calcinado nas finuras de #200 e #325.

Figura 29 – Resistência à compressão do compósito aos 91 dias de idade

Os resultados da resistência à compressão não permitem grande diferenciação entre os dois resíduos estudados dentro das idades de 7 e 28 dias. Entretanto, para cada idade estudada existe um ponto ótimo de incorporação de resíduo. Este ponto ótimo foi definido em função da comparação entre os resultados obtidos de resistência a compressão para cada idade e o limite mínimo de resistência à compressão estipulada pela NBR 7184 - Blocos vazados de concreto simples para alvenaria sem função estrutural - Resistência a compressão, com a média para 6

corpos-de-prova em 2,5 MPa. Esta norma foi escolhida em função da necessidade de um padrão de comparação para a resistência à compressão e pode indicar o uso futuro deste compósito em um elemento construtivo que não tenha função estrutural. A linha paralela ao eixo x, na Figura 30 ilustra esta comparação e indica, portanto, o ponto ótimo para cada idade do compósito e para as duas empresas avaliadas.

Para 7 dias de idade do compósito, o limite de incorporação é de 12% para os resíduos das duas empresas estudadas. Já aos 28 dias para o resíduo da empresa “A” a incorporação máxima encontra-se em 19% e do resíduo da empresa “B” em 13%. Aos 91 dias a máxima incorporação é de 15% para o resíduo da empresa “A” e 14% para o resíduo da empresa “B”.

Deste modo, ao padronizar a incorporação máxima de resíduo em 12% garante-se que o compósito resultante apresentará condições favoráveis para o uso como blocos de vedação, sem função estrutural. Esta indicação de uso se dá em função da resistência à compressão, que em todas as idades estudadas encontra-se acima do limite estipulado pela NBR 7184.

Figura 30 – Resultados da resistência à compressão nas idades estudadas (7, 28 e 91 dias) nas duas empresas: “A” (à esquerda) e “B” (à direita)

A análise estatística para esta propriedade foi diferenciada. Isto ocorreu devido aos parâmetros avaliados, além da variação do resíduo das duas empresas e dos traços (% de incorporação do resíduo) foram avaliadas as idades dos compósitos dentro de cada traço.

Inicialmente foi realizada a análise de variância dos dados obtidos junto à resistência a compressão. O valor do F obtido indicou interação tripla significativa entre os traços avaliados, as empresas estudadas e as idades, como indica a Tabela 36. Isto pode indicar que há a existência de um efeito diferenciado do resíduo das empresas, dada a combinação entre as idades e os traços aplicados.

Tabela 36 – Análise de variância

Causa de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	Pr(>F)
Idade	2	11,16	5,58	368,58	<.0001
Traço	4	136,07	34,02	2247,08	<.0001
Empresa	1	0,65	0,65	42,93	<.0001
Idade * traço	8	2,12	0,26	17,52	<.0001
Idade * empresa	2	1,03	0,52	34,17	<.0001
Traço * empresa	4	0,56	0,14	9,30	<.0001
Idade * traço * empresa	8	1,34	0,17	11,10	<.0001
Resíduo	154	2,24	0,02		
Total	179	155,18			

Em função da dúvida da existência ou não dos efeitos diferenciados citados anteriormente, deu-se sequência a análise estatística, optando-se pela realização da decomposição da interação tripla significativa. Esta se deu pelo desdobramento dos graus de liberdade do resíduo pela análise de regressão, de forma a indicar dentro de cada idade analisada os traços que permitem a mínima resistência à compressão exigida pela norma NBR 7184.

Verificou-se resposta quadrática a interação empresa x traço (Figura 30), isto revela que há diferença significativa estatisticamente entre a origem do resíduo (empresa) e os traços estudados.

Entretanto com a comparação dos resultados obtidos de resistência a compressão e os limites da NBR 7184 é possível afirmar que independentemente da origem do resíduo (empresa “A” e “B”) o limite máximo de incorporação é de 12% em massa em argamassas de cimento.

2.3.2.2 Avaliação da durabilidade do compósito

Visualmente, os corpos de prova submetidos ao processo de envelhecimento acelerado apresentaram pequenas alterações: todos os traços apresentaram coloração alterada (amarelada) como pode ser observado na Figura 31a; e os compósitos com maior teor de resíduo (20% e 30%), desenvolveram saliências discretas nas superfícies expostas (Figuras 31b e 31c). Resultado similar foi encontrado por Savastano Jr. (1997).

(a)

(b)

(c)

Figura 31 – Comparação visual entre os corpos de prova submetidos ao envelhecimento acelerado junto àqueles tratados sob condições normais

A Figura 32 apresenta os resultados da porosidade dos corpos-de-prova, com e sem o processo de envelhecimento, identificados como Env e Amb, respectivamente.

Figura 32 – Variação da porosidade devido ao envelhecimento acelerado

Como é esperado, o aumento do teor de fibras aumenta significativamente a porosidade do compósito (NEVES, 2003), fato constatado nos corpos de prova tratados em ambiente de laboratório (Amb). O inverso ocorreu com os compósitos submetidos ao envelhecimento “acelerado” (Env), que apresentaram redução da porosidade com o aumento do teor de resíduo. Este resultado foi similar ao encontrado por Tonoli (2006), que atribuiu este comportamento às condições de ensaio “acelerado” (alta temperatura e umidade), que modificaram a forma e quantidade dos produtos hidratados, resultando na redução dos vazios introduzidos pela adição do resíduo. Os resultados concordam com aqueles obtidos por Mehta e Monteiro (1994).

Silva (2002) verificou, em compósitos curados ao ar, que o envelhecimento acelerado favoreceu a continuidade da hidratação da matriz dos corpos de prova. Hannant e Hughes (1986), apud Tonoli (2006), sugerem que o envelhecimento acelerado proporciona um efeito cicatrizante nas microfissuras formadas durante a cura, com o seu preenchimento por produtos de hidratação. Os resultados apresentados por esses pesquisadores, mostram a importância da hidratação completa do cimento antes de submeter os compósitos aos ensaios de envelhecimento.

Segundo Neves (2003), a porosidade apresenta relação direta com a resistência à compressão, quanto maior o seu valor, menor será a resistência à compressão oferecida pelo material.

A Figura 33 apresenta os resultados das resistências à compressão dos corpos-de-prova, com e sem o processo de envelhecimento, identificados como Env e Amb, respectivamente.

Figura 33 - Variação da resistência à compressão simples devido ao envelhecimento “acelerado”

Os resultados da resistência à compressão após o processo de envelhecimento “acelerado” (ciclos de molhagem e secagem em relação ao material mantido em ambiente normal), comparados aos da resistência à compressão sem o processo de envelhecimento adotado, indicam que ocorreu ganho de resistência à compressão do compósito submetido ao envelhecimento acelerado. Essa constatação sugere que, provavelmente, o processo de molhagem e secagem proporcionou uma maior hidratação do cimento, modificando a forma e quantidade dos produtos hidratados, resultando em ganho rápido de resistência para o compósito, especialmente porque a cura úmida durou apenas 7 dias (NEVES, 2003).

Como enfatizado por Swamy (1990), a hidratação continuada da matriz cimentícia pode promover melhora nas propriedades mecânicas após os ensaios de envelhecimento. Esse comportamento, também foi relatado por John (1997), que alerta para o mascaramento dos efeitos da degradação, pelo ganho de resistência devido à hidratação. Isso pode levar a uma subestimação do processo de degradação no curto prazo. Para evitar conclusões inadequadas, a análise microestrutural é fundamental.

Outra constatação interessante é que os traços mais ricos em resíduo apresentaram um ganho maior de resistência após o envelhecimento, em comparação aos demais traços. Este comportamento pode ser atribuído à maior concentração de fibras nestes compósitos, que por apresentar alto poder de absorção, facilitam a entrada de água no material possibilitando assim uma maior hidratação.

Isso é evidenciado na figura 32, na qual os corpos de prova envelhecidos, nos traços 20% e 30% de resíduo em relação à argamassa de cimento e areia, apresentaram respectivamente

ganho de 80% e 90% da resistência à compressão, em relação aos compósitos mantidos em ambiente de laboratório. Enquanto os traços 5% e 10% apresentaram ganho de apenas 13% e 20% respectivamente da resistência.

A diminuição da porosidade através do envelhecimento pode ter sido responsável pelo aumento da resistência à compressão do compósito.

Figura 34 – Variação da resistência à compressão entre os compósitos submetidos ao envelhecimento “acelerado” junto aqueles que permaneceram sob condições normais

Os resultados obtidos foram, portanto mascarados pelo ensaio de envelhecimento acelerado. Pode-se dizer que as condições do ensaio acelerado (alta temperatura e umidade), aceleram as reações de hidratação do cimento, resultando em um ganho rápido de resistência a compressão. Diante disso, pode-se concluir que os ciclos empregados não se mostraram eficientes na simulação dos agentes ambientais a que são submetidos os compósitos durante o uso. Devido a este resultado optou-se pela não continuação do ensaio nos compósitos da empresa “A”.

3 CONCLUSÕES

- Os resíduos das duas empresas avaliadas têm grande potencial para aproveitamento em compósitos cimentícios para a construção civil em função da sua geração pontual, do grande volume e uniformidade de produção durante o ano, classificação como resíduo classe II-A (NBR 10004) e composição química e física adequadas a este tipo de utilização;
- As características químicas dos resíduos em estudo para as duas empresas avaliadas foram compatíveis com a inserção em matrizes de cimento;
- Foi observada uma tendência de redução da massa específica dos compósitos com o aumento no teor de resíduo incorporado, para as duas empresas avaliadas;
- O resultado da massa unitária do resíduo da empresa “B” foi maior que o resultado da massa unitária para o resíduo da empresa “A”. Esta diferença decorre dos processos produtivos e de tratamento de efluentes hídricos diferenciados empregados nas duas empresas;
- O aumento do teor de resíduo nos compósitos tende a aumentar o índice de vazios para as duas empresas avaliadas, relação que tende a afetar a durabilidade dos compósitos;
- O aumento do teor de resíduo aumenta a absorção de água por imersão e por capilaridade para os compósitos produzidos com material das duas empresas avaliadas. Entretanto, os compósitos com lodo da empresa “A” apresentaram maiores valores de absorção de água em todos os traços avaliados, em função da maior quantidade de fibras celulósicas presentes no resíduo desta empresa quando comparado ao percentual de fibras presentes no resíduo da empresa “B”;
- O resíduo tende a se aglomerar no compósito, fato observado pela análise da microestrutura do compósito;
- A distribuição heterogênea do resíduo na matriz cimentícia afetou a absorção de água e a resistência mecânica;
- Não houve variação significativa entre a retratibilidade dos compósitos, tanto nas porções longitudinais quanto radiais, para as duas empresas avaliadas. Entretanto, maiores valores longitudinais por empresa foram observados nos traços T₄B e T₂A, enquanto que maiores valores radiais por empresa foram observados nos traços T₃A e T₄B;

- Os compósitos apresentaram características de isolamento acústico inferior aos materiais convencionais, para as duas empresas avaliadas;
- A resistência à compressão decresceu na medida em que se incorporou maior quantidade de resíduo, comportamento observado nas 3 idades estudadas (7, 28 e 91 dias) para as duas empresas estudadas.
- O ponto ótimo de incorporação de resíduo à matriz cimentícia nas 3 idades estudadas (7, 28 e 91 dias) para os compósitos das duas empresas foi de 12%, respeitando o limite mínimo de resistência à compressão de 2,5 MPa da norma NBR 7184 - Blocos vazados de concreto simples para alvenaria sem função estrutural;
- A metodologia empregada para a análise da durabilidade do material não foi eficiente, em função do número insuficiente de ciclos empregados no envelhecimento acelerado;
- A incorporação do resíduo do tratamento de efluentes hídricos de indústrias de papel em compósitos cimentícios mostrou-se uma alternativa viável, do ponto de vista tecnológico e ambiental;
- O aproveitamento deste resíduo em matrizes de cimento não apresentou diferenças significativas nas propriedades físicas dos compósitos produzidos com lodos com ligeiras diferenças nas composições químicas, facilitando, portanto o emprego desta técnica em diferentes empresas.

É importante salientar que este foi um estudo inicial que buscou avaliar a possibilidade de aproveitamento deste resíduo em compósitos para serem utilizados na produção de componentes para a construção civil. Entretanto, novos estudos devem ser realizados buscando avaliar o comportamento deste compósito nos diferentes componentes construtivos. Esta informação é fundamental para que se possa desenvolver um produto comercial com vantagens competitivas quando comparado aos similares convencionais, perfazendo assim os objetivos de transferência de tecnologia, diminuição dos custos de materiais de construção e ganhos ambientais.

REFERÊNCIAS

AGOPYAN, V. **Materiais reforçados com fibras para a construção civil nos países em desenvolvimento: uso de fibras vegetais**. 1991. 204 p. Tese (Livre-Docência em Engenharia civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

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., 1997, Cali. **Anais...** Cali: CYTED;Universidad Del Valle, 1997. p. 23-40.

ALKIRE, B. D.; NEWTON, S. M., "Using Paper Mill Sludge as Concrete Admixture," Technical Note, **Journal of the Environmental Engineering Division**, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, v. 101. n. EE3, p. 469-473, June 1975.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento portland**. 7.ed. São Paulo, 2002. 28p. Disponível em: <http://www.abcp.org.br/downloads/arquivos_pdf/BT106_2003.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7251**: agregado em estado seco: determinação da massa unitária. Rio de Janeiro. 1982. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: agregado para concreto. Rio de Janeiro. 1983. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7217**: determinação da composição granulométrica dos agregados. Rio de Janeiro. 1987a. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776**: agregados. determinação da massa específica de agregados para ensaio de agregados miúdos por meio do frasco de chapman. Rio de Janeiro, 1987b. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água por imersão – índices de vazios e massa específica. Rio de Janeiro. 1987c. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: cimento portland – determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro. 1991. 20p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12988**: líquidos livres. Rio de Janeiro. 1993. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 1995. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NB26**: agregados - amostragem. Rio de Janeiro. 2001. 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: resíduos sólidos – classificação, Rio de Janeiro, 2004a. 61 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005**: ensaio de lixiviação. Rio de Janeiro. 2004b. 7p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006**: ensaio de solubilização. Rio de Janeiro. 2004c. 7p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007**: amostragem de resíduos. Rio de Janeiro, 2004d. 21p.

AZIZ, M.A., PARAMASIVAM, P., LEE, S.L. Natural fibre reinforced concretes in low-cost housing construction. **Housing Science**, v.10, n.4, p.267-78, 1986.

BACKER, P. **Gestão ambiental**: a administração verde. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1995. 266p.

BATTISTELLE, R.A.G. **Análise da viabilidade técnica do resíduo de celulose e papel em tijolos de adobe**. 2002. 98 p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

BEAL, L. L.; MONTEGGIA, L.O.; GIUSTINA, S. V. Optimization of a cardboard paper factory wastewater treatment plant. **Engenharia Sanitária Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 11, n. 3, 2006.

BELLOTE, A.F.J.; SILVA, H.D.; FERREIRA, C.A.; ANDRADE, G.C. Utilização de resíduos da produção de celulose. **REMADE**, Curitiba, v. 77, nov. 2003. Disponível em: <<http://www.remade.com.br/revista/capa.php?edicao=77>>. Acesso em 03 nov. 2006.

BERALDO A.L. Compósitos biomassa vegetal-cimento. In: GHAVAMI K.; TOLEDO FILHO, R.D.; NASCIMENTO W.J. **Materiais não-convencionais para construções rurais**. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba/Marcone, 1997. p.1-48.

BONI M. R.; D'APRILE L; CASA G., Environmental quality of primary paper sludge, **Journal of Hazardous Materials**, B, Amsterdam, v. 108, p.125-128, 2004.

BRACELPA. Associação Brasileira de Papel e Celulose. **Informes Anuais**. São Paulo, 2006. Disponível em: <http://www.bracelpa.org.br/br/anual/perfil_setor2006.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2006.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G. **Química da madeira**. 5. ed. Piracicaba: CALQ, 1988. 125p.

BUDINSKI, K.G. **Engineering materials**: properties and selection. New Jersey: Prentice Hall International, 1996. 653p.

CASSILHA, A.C.; PODLASEK, C.L.; CASAGRANDE JR., E.F.; MENGATTO, S.N.F.; SILVA, M.C. da. Indústria moveleira e resíduos sólidos: considerações para o equilíbrio ambiental. In: SEMANA DE TECNOLOGIA, 2003, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, 2003. 5p.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB. **Resíduos Sólidos Industriais**. São Paulo. CETESB;ASCETESB, 1985 182 p.

CONSTRUÇÕES E AMBIÊNCIA. Pirassununga, 2006. Disponível em: <<http://www.fzea.usp.br/constrambi/>>. Acesso em: 11 nov. 2006.

CORAZZA, R. I. **Inovação tecnológica e demandas ambientais**: notas sobre o caso da Indústria Brasileira de Papel e Celulose. 1996. 151 p. Dissertação (Mestrado em Política Científica e Tecnológica) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.

DEVITO, R.A. **Estudos físicos e mecânicos de telhas de cimento de escória de alto-forno reforçado com fibras celulósicas residuais**. 2003. 62p. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

EIRES, R.; JALALI, S. **Not Conventional Materials for a Sustainable Construction: A Bio-construction System Reinforced with Cellulose Fibres**. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/4735/1/Eires_CN_2005.pdf> Acesso em 11 fev. 2007

FENGEL D.; WEGENER, G. **Wood, chemistry, ultrastructure, reactions**. New York : Waster & Grugter, 1984. 613p.

FLORESTAL CATAGUAZES. Disponível em: <<http://www.florestalcataguanes.com.br/index.html>>. Acesso em: 05 jul 2006.

FOLHA DE SÃO PAULO. População de Campos (RJ) fica sem água após vazamento tóxico. Folha de São Paulo, 01 abr. 2003. Folha Cotidiano, p. 4.

GLENN, J. Paper mill sludge: feedstock for tomorrow. **Progress in Paper Recycling**, Appleton, p. 54-59, May 1998.

GOROYIAS, G.; ELIAS; R. **Research into using recycled waste paper residues in construction products**. Oxon, 2004. Disponível em: <www.wrap.org.uk/document.rm?id=393>. Acesso em: 10 fev. 2007.

GRANDI, L.A.C. **Placas pré-moldadas de argamassa de cimento e pó de serra**. 1995. 128 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.

HEINRICKS, H; BERKENKAMP, R; LEMPFER, K.; FERCHLAND, H. Global review of technologies and markets for building materials. In: INTERNATIONAL INORGANIC-BONDED WOOD AND FIBER COMPOSITE MATERIALS CONFERENCE, 7., 2000, Sun Valley, 2000. **Proceedings...** Moscow: University of Idaho, 2000. 12p.

HOFFMAN, A. **Competitive environmental strategy**: a guide to the changing business landscape, Washington DC: Island Press, 2000. 301p.

JOHN, V. M. ; AGOPYAN, V. ; PECORARO, G. G. et al. Viabilidade de painéis pré-moldados com fibras vegetais para habitação popular. In: SIMPÓSIO IBERO-AMERICANO SOBRE TÉCNICAS CONSTRUTIVAS INDUSTRIALIZADAS PARA HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL, 1993, São Paulo. **Técnicas Construtivas Industrializadas para Habitação de Interesse Social**. São Paulo: IPT, 1993. v. 1. p. 457-466.

JOHN, V.M. **Reciclagem de Resíduos na Construção Civil**: Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. 2000. 113p. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

JONES, R.M. **Mechanics of composite materials**. New York: McGraw-Hill, 1975. 368p.

KLABIN. **Gerenciamento de resíduos sólidos**. Disponível em: <<http://www.klabin.com.br/pt-br/responsabilidadeAmbiental/estacoesDeTratamento-residuosSolidos.aspx>>. Acesso em: 12 fev. 2007.

LARS, S.; ROLAND, M.; SOUSA, F. de; DAHLMAN. Effects os internal process changes and external treatment on effluent chemistry. In: SERVOS, M.R.; MUNKITTRICK, K.R.; CAREY, J.H.; KREEK, G.J.V.D. **Environmental fate and effects of pulp and paper mill effluents**. Delray Beach: St. Lucie Press, 1996. Chap.1, p.3.

LEBÉIS, V.D.L. **Viabilidade do uso do resíduo da fabricação do papel em argamassas**. Campinas, 2003. 115p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

LEVY, S.M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. 2001. 194 p. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

LIMA G.; BATISTA A.; MALHERIROS R.; LUCENA J. C.; CUNHA A.; PORTELA C.; ALVES R. **Roteiro Complementar de Licenciamento e Fiscalização Indústria de Papel e Celulose**, Publicações Projeto CPRH, Recife 1998. 95p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto - estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994. 573p.

MENON, A.; MENON, A. Enviropreneurial marketing strategy: the emergence of corporate environmentalism as market strategy, **Journal of Marketing**, Oklahoma, v.61 n.5, p.51-67 1997.

MOUNTEER, A.H. **Caracterização de lodos ativados e de efluentes de branqueamento ECF e TCF de polpa kraft de eucalipto**. 2000. 104 p. Dissertação (Doutorado em Microbiologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2000.

NAIK, T. R.; KRAUS, R. N. **Development of Concrete Utilizing Paper Mill Residual Solids** Center for By-Products Utilization, University of Wisconsin-Milwaukee, 15p. nov. 1998.

NAIK, T.R.; CHUN Y.; KRAUS, R.N. **Use of residual solids from pulp and paper mills for enhancing strength and durability of ready-mixed concrete**. Final Report for the Period Jan. 1, 2000 to June 30, 2003.

NEITHALATH, N. Damage assessment in cellulose–cement composites using dynamic mechanical characteristics. **Cement & Concrete Composites**, Sheffield, v. 28, p. 658–667, Aug. 2006.

NEITHALATH, N.; WEISS J.; OLEK J. Acoustic performance and damping behavior of cellulose–cement composites. **Cement & Concrete Composites**, Sheffield, v.26, p. 359–370, May. 2004

NEVES, C.M.M. Componentes habitacionais de argamassa celulósica e espuma de poliuretano In: ROCHA, J.C.; JOHN, V.M. **Utilização de resíduos na construção habitacional**. Porto Alegre: Coletânea Habitar Antac, 2003. cap. 6, p. 176-217.

NOLASCO, A.M. **Utilização de resíduos da indústria de papel na produção de materiais para a construção civil**. 1993. 117p. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

NOLASCO, A.M. Aproveitamento do resíduo da indústria de papel na produção de bloco cerâmico. In: WORKSHOP SUL-AMERICANO SOBRE USOS ALTERNATIVOS DE RESÍDUOS DE ORIGEM FLORESTAL E URBANA, 1997, Curitiba. **Anais...** Curitiba: EMBRAPA/CNPQ, 1997a. p.117-120.

NOLASCO, A.M. Tratamento biológico de efluentes da indústria de celulose e papel por aeração estendida modificada. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL 1997. São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 1997b. p. 465-474.

NOLASCO, A M. **Resíduos sólidos**. Piracicaba: Departamento de Ciências Florestais, 2006. 1 v.

NOLASCO, A.M.; PIRES,E.C.; SPRINGER, A.M. Uso de resíduos urbanos e industriais como fontes de nutrientes e condicionadores de solos florestais. **O Papel**, São Paulo, v.61, n.9, p.70-76, 2000.

OLIVEIRA, M.P.; NÓBREGA, A F.; CAMPOS, MS; BARBOSA, N.P. Estudo do caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento portland. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE MATERIAIS E TECNOLOGIAS NÃO CONVENCIONAIS: HABITAÇÕES E INFRA-ESTRUTURA DE INTERESSE SOCIAL. **Anais...** Pirassununga, 2004. 10p.

O VALEPARAIBANO, Acidente Ambiental: Cetesb multa a VCP após aterro romper em Jacareí. **O ValeParaibano**, São José dos Campos, São Paulo, 13 set. 2005. Região Jacareí. Disponível em: <<http://jornal.valeparaibano.com.br/2005/09/13/>>. Acesso em 15 set. 2005.

PERA, J.; AMROUZ, A., Development of Highly Reactive Metakaolin from Paper Sludge. **Advanced Cement Based Materials**, Quebec, v. 7, n. 2, p. 49-56, Mar. 1998.

PHILIPP, P.; D'ALMEIDA, M.L.O. **Celulose e papel:** tecnologia de fabricação da pasta celulósica. 2. ed. São Paulo: IPT, 1988. 964 p.

PIMENTEL, L.L.; BERALDO, A.L.; SAVASTANO Jr, H. Utilização de Polímeros em Compósito Biomassa vegetal – cimento. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. 2004, São Paulo. **Resumos...** São Paulo: Tecart editora 2004. 1 CD ROM.

PIOTTO, Z.C. **Eco-eficiência na Indústria de Celulose e Papel - Estudo de Caso**. 2003. 379 p. Dissertação (Doutorado em Engenharia Sanitária) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

PIZZOL, S.J.S.; BACHA, C.J.C. Evolução, estrutura e desafios da indústria de celulose no Brasil. **Preços Agrícolas**, Piracicaba, v. 12, n. 137, p. 3-13, 1998.

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

SÃO PAULO (Estado) Secretaria do Meio Ambiente. **Política nacional de resíduos sólidos**. São Paulo, 1998. 1 v.

SARIGAPHUTI, M.; SHAH, S. P.; VINSON, K. D. Shrinkage cracking and durability characteristics of cellulose fiber reinforced concrete ACI. **Materials Journal**, Detroit, v. 90, n. 4, p. 309-318, 1993.

SAVASTANO Jr., H. **Materiais à base de cimento reforçados com fibra vegetal. Reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo**. 2000. 152p. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

SAVASTANO Jr., H. ; JOHN, V.M.; AGOPYAN, V.; FERREIRA, O.P. Weathering of vegetable fibre-clinker free cement composites. **Materials and Structures**, Cachan, v. 135, n.245, p. 64-68, 2002.

SHARMAN, W. R.; VAUTIER, B. P. Accelerated durability testing of autoclaved wood-fiber-reinforced cement-sheet composites. **Durability of Building Materials**. Amsterdam Elsevier, Amsterdam, 1986, p. 255-275.

SILVA, A.C. **Estudo da durabilidade de compostos reforçados com fibras de celulose**. 2002. 128p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

SILVA, C.M. **Meio-ambiente: protagonista no setor**. [Entrevista]. Celulose on line, Ribeirão Preto, 2006. Disponível em: <<http://www.celuloseonline.com.br/Entrevista/Entrevista.asp?IDEntrevista=216&iditem=97>>. Acesso em: 15 nov. 2006.

SILVA, R.P.; BARROS, M.M.S.B.; PILEGGI, R.G.; JOHN, V. M. Avaliação do comportamento da argamassa no estado fresco através dos métodos de mesa de consistência, dropping ball e squeeze flow. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 6., 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ANTAC, 2005. p. 106- 120.

SOH, Y.S.; SOH, S.Y.; LEE, D.S. Use of Paper Sludge Ash in Concrete Products. **INTERNATIONAL RILEM Workshop on Disposal and Recycling of Organic and Polymeric Construction Materials**, London, p. 271-278, 1995.

SOROUSHIAN, P. Secondary reinforcement—adding cellulose fibers. **Concrete International: Design & Construction**, Farmington Hills, v. 19, n. 6, p. 28-34, 1997.

SOROUSHIAN, P.; MARIKUNTE, S. Reinforcement of Cement-Based Materials with Cellulose Fibers, Thin-Section **Fiber Reinforced Concrete and Ferrocement**, ACI Special Publication SP-124, ACI, Detroit, MI, 1990. p. 99-123.

SOROUSHIAN, P.; MARIKUNTE, S. Long-term durability and moisture sensitivity of cellulose fiber reinforced cement composites. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FIBRE REINFORCED CEMENT AND CONCRETE, 4. 1992, Sheffield. **Proceedings...** London: E & FN Spon, 1992. p.1166-1184.

SOROUSHIAN, P.; MARIKUNTE, S., Durability Characteristics of Cellulose Fiber Reinforced Cement Composites, **Fiber Reinforced Concrete: development and innovations**, Detroit, p. 73-89, 1994.

SOROUSHIAN, P.; MARIKUNTE, S.; WON, J., Statistical Evaluation of Mechanical and Physical Properties of Cellulose Fiber Reinforced Cement Composites, **ACI Materials Journal**, Detroit, v. 92, n. 2, p. 172-180, 1995.

SWAMY, R.N. Vegetable fiber reinforced cement composites - a false dream or a potential reality? In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON VEGETABLE PLANTS AND THEIR FIBRES AS BUILDING MATERIALS, 2., 1990, Salvador. **Proceedings...** [S.l.], Chapman and Hall, p.3-9.

TANIZE, C.C. **Um estudo sobre os impactos do acidente ambiental “Cataguazes de papel” sobre as comunidades de pescadores de foz do Rio Paraíba do Sul.** Disponível em: <www.anppas.org.br/encontro/segundo/papers/GT/GT17/gt17_tanize_costa.pdf>. Acesso em: 2 abr. 2006.

THOMAS, C.O.; THOMAS, R.C.; HOVER, K.C. Wastepaper fibers in cementitious composites. **Journal of Environmental Engineering**, New York, v. 113, n. 1, p. 16-31, 1987.

TONOLI, G.H.D. **Aspectos produtivos e análise do desempenho do fibrocimento sem amianto no desenvolvimento de tecnologia para telhas onduladas.** 2006. 154p. Faculdade de Zootecnia e Ciências de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2006.

VOTORANTIM CELULOSE E PAPEL. **Desempenho Ambiental** Disponível em: <http://www.vcp.com.br/sitevcp/appl/investidores/relatorio_anual/2005/des_ambiental.asp>. Acesso em: 12 fev. 2007.

ANEXOS

Anexo A

HIDROLABOR LABORATÓRIO DE CONTROLE DE QUALIDADE S/C LTDA.

Consultoria e Análises em Água, Alimentos e Efluentes

INTERESSADO: PAPIRUS INDÚSTRIA DE PAPEL S/A

CIDADE: LIMEIRA - SP

COLETADO POR: HIDROLABOR

MATERIAL: MASSA FLOTADA

EXAME Nº: 03/16402

DATA COLETA: 18/12/03

EXAMES FÍSICO - QUÍMICOS

NORMA ABNT - NBR 10.004

ENSAIO DE SOLUBILIZAÇÃO

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

Parâmetro	Unidade	VMP	LIMITE DE QUANTIFICAÇÃO	Resultado
Alumínio	mg Al /L	0,2	0,1	< LQ
Arsênio	mg As /L	0,05	0,05	< LQ
Bário	mg Ba /L	1,0	0,5	< LQ
Cádmio	mg Cd /L	0,005	0,001	< LQ
Chumbo	mg Pb /L	0,05	0,01	< LQ
Cobre	mg Cu /L	1,0	0,01	< LQ
Crômio Total	mg Cr /L	0,05	0,01	< LQ
Manganês	mg Mn /L	0,1	0,01	0,33
Mercúrio	mg Hg /L	0,001	0,0005	< LQ
Prata	mg Ag /L	0,05	0,05	< LQ
Selênio	mg Se /L	0,01	0,01	< LQ
Sódio	mg Na /L	200,0	0,01	18,0
Zinco	mg Zn /L	5,0	0,01	< LQ
Ferro	mg Fe /L	0,3	0,01	0,38
Cianetos	mg CN /L	0,1	0,005	< LQ
Cloretos	mg Cl /L	250,0	1	2,0
Dureza	mg CaCO ₃ /L	500,0	1	48,0
Fenóis	mg C ₆ H ₅ OH /L	0,001	0,001	< LQ
Fluoretos	mg F /L	1,5	0,1	0,07
Nitratos	mg NO ₃ /L	10,0	0,1	0,19
Sulfatos	mg SO ₄ /L	400,0	0,1	11,23
Surfactantes	mg LAS /L	0,2	0,1	1,56

VMP = Valores Máximos Permitidos

< LQ = menor que o limite de quantificação

Nota:

Os resultados obtidos têm significações restrita e se referem tão somente a amostra analisada.

METODOLOGIA

Solubilização de resíduos: De acordo com ABNT - NBR 10006

"Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater" - 20th edition

Sorocaba, 19 de Janeiro de 2004

 Clemente Reinaldo Sannazzaro CRF8 5305
 Carlos Augusto Pauletti CRF8 15082

1/4

HIDROLABOR LABORATÓRIO DE CONTROLE DE QUALIDADE S/C LTDA.

Consultoria e Análises em Água, Alimentos e Efluentes

INTERESSADO: PAPIRUS INDÚSTRIA DE PAPEL S/A
EXAME Nº: 03/16402
CIDADE : LIMEIRA - SP
DATA COLETA: 18/12/03
COLETADO POR: HIDROLABOR
MATERIAL: MASSA FLOTADA
EXAMES FÍSICO – QUÍMICOS
NORMA ABNT - NBR 10.004
ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO

pH Inicial	8,29
pH Final	5,08
Massa da Amostra (g)	50g
Volume Hac .0,5 N (ml)	30,4
Tempo de Ensaio (h)	28:00h

RESULTADOS
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

Parâmetro	Unidade	VMP	LIMITE DE QUANTIFICAÇÃO	Resultado
Arsênio	mg As /L	5,0	0,5	< LQ
Bário	mg Ba/L	100,0	0,5	< LQ
Cádmio	mg Cd/L	0,5	0,01	< LQ
Chumbo	mg Pb /L	5,0	0,1	< LQ
Crômio Total	mg Cr /L	5,0	0,1	< LQ
Mercurio	mg Hg /L	0,1	0,01	< LQ
Prata	mg Ag /L	5,0	0,1	< LQ
Selênio	mg Se /L	1,0	0,5	< LQ
Fluoretos	mg F /L	150,0	0,1	0,10

VMP = Valores Máximos Permitidos

< LQ = menor que o limite de quantificação

Nota:

Os resultados obtidos têm significações restrita e se referem tão somente a amostra analisada.

METODOLOGIA

Lixiviação de resíduos: De acordo com ABNT – NBR 10005

 "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater" – 19th edition

Sorocaba, 19 de Janeiro de 2004.

 Clemente Reinaldo Sannazzaro CRF8 5305

Carlos Augusto Pauletti CRF8 15082

2/4

HIDROLABOR LABORATÓRIO DE CONTROLE DE QUALIDADE S/C LTDA.

Consultoria e Análises em Água, Alimentos e Efluentes

INTERESSADO: PAPIRUS INDÚSTRIA DE PAPEL S/A
 CIDADE: LIMEIRA - SP
 COLETADO POR: HIDROLABOR
 MATERIAL: MASSA FLOTADA

EXAME Nº: 03/16402
 DATA COLETA: 18/12/03

EXAMES FÍSICO - QUÍMICOS

NORMA ABNT - NBR 10.004

MASSA BRUTA
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

Parâmetro	Unidade	VMP	LIMITE DE QUANTIFICAÇÃO	Resultado
Arsênio	mg As/ Kg	1000	25	< LQ
Berílio	mg Be/ Kg	100	10	< LQ
Chumbo	mg Pb/ Kg	*	10	< LQ
Crômio Hexav.	mg Cr/ Kg	100	10	< LQ
Crômio Trivalente	mg Cr/ Kg	2.500**	10	1,09
Mercurio	mg Hg/ Kg	100	1	< LQ
Selênio	mg Se/ Kg	100	20	< LQ
Vanádio	mg V / Kg	1000	20	< LQ
Cianetos	mg CN/ Kg	1000	1	< LQ
Fenóis	mg C6H5OH/ Kg	10	0,1	< LQ
Níquel	mg Ni /Kg	2.000**	1,0	< LQ
Hidrocarbonetos Líquido ou Bombeáveis a 80°C	g / 100 g	5,0	0,1	< LQ
Umidade	g / 100 g	---	0,1	91,9

OBS.: (*) limite para Chumbo: - em compostos orgânicos = 100 mg Pb/ Kg
 - em compostos minerais = 1000 mg Pb/ Kg
 - VMP = Valores Máximos Permitidos - < LQ = menor que o limite de quantificação
 **California Cold Regulation (Tabela II par. 66261.24 do art. 3 - Tit. 22 - Social Security)

Nota:

Os resultados obtidos têm significações restrita e se referem tão somente a amostra analisada.

Metodologia: Coleta da amostra: de acordo com ABNT - NBR 10007

 "Standard Methods of the Water and Wastewater" 20th Edition"

"USEPA 1986, Test Method for Evaluating Solid Waste Report Number SW - 846, Washington, DC"

Sorocaba, 19 de Janeiro de 2004.

Clemente Reinaldo Sannazzaro CRF8 5305
 Carlos Augusto Pauletti CRF8 15082

HIDROLABOR LABORATÓRIO DE CONTROLE DE QUALIDADE S/C LTDA.
Consultoria e Análises em Água, Alimentos e Efluentes

INTERESSADO: *PAPIRUS INDÚSTRIA DE PAPEL S/A*
CIDADE: LIMEIRA - SP
COLETADO POR: HIDROLABOR
MATERIAL: MASSA FLOTADA

EXAME Nº: 03/16402
DATA COLETA: 18/12/03

CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUO SEGUNDO NORMA ABNT - NBR 10.004

O resíduo não se enquadra na listagem de periculosidade.

Os resultados de manganês, ferro e surfactantes obtidos na análise de solubilizado não atendem os parâmetros estabelecidos pela listagem 8 do anexo H.

Os resultados de obtidos na análise do lixiviado atendem os parâmetros estabelecidos pela listagem 7 do anexo G.

Os resultados obtidos na análise da massa bruta atendem os parâmetros estabelecidos na listagem 9 do anexo I.

CLASSIFICAÇÃO: CLASSE II

OBS: A classificação do resíduo é apenas sugerida, ficando a critério do órgão competente qualquer alteração que se faça necessário.

Sorocaba, 19 de Janeiro de 2004.

Clemente Reinaldo Sannazzaro CRF8 5305
Carlos Augusto Pauletti CRF8 15082

4/4

Boletim de Análise Nº 0486/03

Ref. Proposta : 3647/02

**Amostra Nº 01265/03
RESÍDUO SÓLIDO INDUSTRIAL**

Análise solicitada:

Caracterização de Resíduo segundo NBR 10004

Requerido por

Votorantim Celulose e Papel
Bairro Monte Alegre
Piracicaba / SP

Realizado por

BIOAGRI AMBIENTAL LTDA.
Rua Aljovil Martini, 201-Piracicaba/SP

Data da Entrada no Laboratório

31.01.03

Data de conclusão

10.02.03

Informações Gerais

- **Descrição da amostra:** Resíduo (Sólido Industrial)
- **Coletor:** Vanderlei – Bioagri Ambiental Ltda
- **Data coleta:** 31.01.03
- **Local de coleta:** Não consta
- **Solicitante:** Edmilson Macedo
- **Métodos de Análise:** As metodologias utilizadas pela BIOAGRI foram baseadas “SW 846-3050B (USEPA 1986, Test Method for Evaluating Solid Waste Report Number 846, Washington, DC” e as referências:
Norma NBR 10004 da ABNT - Classificação de Resíduos Sólidos
Norma NBR 10005 da ABNT - Ensaio de Lixiviação
Norma NBR 10006 da ABNT - Ensaio de Solubilização
Norma NBR 12988 da ABNT – Líquidos Livres

Resultados Analíticos

Parâmetros	Unidade	LQ*	Resultados analíticos da amostra n°.01265/03 Resíduo Sólido Industrial	ABNT NBR 10004 VMP**
1-SOLUBILIZADO				
Arsênio	mg/L	0,05	< LQ	0,05
Bário	mg/L	0,1	0,65	1,0
Cádmio	mg/L	0,005	< LQ	0,005
Chumbo	mg/L	0,05	< LQ	0,05
Cianetos	mg/L	0,1	< LQ	0,1
Cromo Total	mg/L	0,05	< LQ	0,05
Fenóis	mg/L	0,001	0,06	0,001
Fluoretos	mg/L	0,1	0,14	1,5
Mercurio	mg/L	0,001	< LQ	0,001
Nitratos	mg/L	0,1	9,6	10
Prata	mg/L	0,05	< LQ	0,05
Selênio	mg/L	0,01	< LQ	0,01
Alumínio	mg/L	0,05	1,01	0,2
Cloretos	mg/L	5	440	250,0
Cobre	mg/L	0,05	< LQ	1,0
Dureza	mg/L	5	4760	500
Ferro	mg/L	0,05	28,0	0,3
Manganês	mg/L	0,05	3,00	0,1
Sódio	mg/L	0,5	3,5	200,0
Surfactantes	mg/L	0,1	0,10	0,2
Sulfatos	mg/L	5	5	400
Zinco	mg/L	0,05	< LQ	5
pH Inicial			5,4	
pH Final			5,4	
2-LIXIVIADO				
Arsênio	mg/L	0,05	< LQ	5,0
Bário	mg/L	0,1	0,15	100
Cádmio	mg/L	0,05	< LQ	0,5
Chumbo	mg/L	0,05	< LQ	5,0
Cromo Total	mg/L	0,05	< LQ	5,0
Fluoretos	mg/L	0,1	0,10	150,0
Mercurio	mg/L	0,05	< LQ	0,1
Prata	mg/L	0,05	< LQ	5,0
Selênio	mg/L	0,05	< LQ	1,0
pH Inicial			5,4	
pH Final			4,7	
Volume de Ac. Acético 0,5 N	mL		3,0	Até 400
Tempo de Lixiviação	Horas		24	24-28

Parâmetros	Unidade	LQ*	Resultados analíticos da amostra n°.01263/03 Resíduo Sólido Industrial	ABNT NBR 10004 VMP**
3-MASSA BRUTA				
Umidade	%	0,05	34,0	
pH		0,1	5,8	> 2 < 12,5
Berílio	mg/kg	1	< LQ	100
Cromo VI	mg/kg	1	< LQ	100
Mercúrio	mg/kg	1	< LQ	100
Vanádio	mg/kg	1	1,88	1000
Chumbo	mg/kg	1	1,86	1000
Selênio	mg/kg	1	< LQ	100
Arsênio	mg/kg	1	< LQ	1000
Cianetos	mg/kg	1	< LQ	1000
Fenóis	mg/kg	0,5	0,96	10
Hidrocarb.Líquidos/Bombeáveis	%	0,05	< LQ	5
Óleos e Graxas	%	0,05	< LQ	1
Líquidos Livres		Ausente	Ausente	Ausente

LQ*: Limite de Quantificação < LQ: Menor que o Limite de Quantificação

VMP** Valores Máximos Permitidos pela Norma ABNT NBR 10004.

Nota 1: Os resultados das análises referem-se somente à amostra enviada pelo interessado. Este Boletim Analítico só pode ser reproduzido por inteiro e sem nenhuma alteração.

Nota 2: **Interpretação dos resultados:**

Solubilizado: Os parâmetros Fenóis, Alumínio, Cloretos, Dureza, Ferro e Manganês ultrapassaram os Limites Máximos Permitidos. Limites baseados na listagem N°. 8 da ABNT NBR 10.004.

Lixiviado: Os parâmetros não ultrapassaram os Limites Máximos Permitidos. Limites baseados na listagem N°. 7 da ABNT NBR 10.004.

Massa Bruta: Os parâmetros não ultrapassaram os Limites Máximos Permitidos. Limites baseados na listagem N°. 9 da ABNT NBR 10.004.

Em função dos resultados obtidos, dos parâmetros analisados, o resíduo, identificado como **"Resíduo Sólido Industrial"**, deve ser considerado como de Classe II – Não Inerte. Salientamos, portanto que a disposição desse resíduo poderá ser recomendada pelo órgão de controle ambiental. Para a interpretação dos dados obtidos foram consultadas as listagens N°. 7, 8 e 9 da Norma ABNT NBR 10.004.

Nereida Ap. Bongiorno
Coordenadora Técnica

10/10/03
Data

Marcos Donizete Ceccatto
Gerente Técnico

10/10/03
Data