

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ**

**ANDRESSA MARIA COELHO FERREIRA**

**APLICAÇÃO DE RESÍDUOS DE LODO DE PAPEL NA PREPARAÇÃO DE  
COMPÓSITOS COM CINZA DE MADEIRA E CAL RESIDUAL:  
CARACTERIZAÇÃO E ENSAIOS NORMATIZADOS**

**CURITIBA**

**2012**

**ANDRESSA MARIA COELHO FERREIRA**

**APLICAÇÃO DE RESÍDUOS DE LODO DE PAPEL NA PREPARAÇÃO DE  
COMPÓSITOS COM CINZA DE MADEIRA E CAL RESIDUAL:  
CARACTERIZAÇÃO E ENSAIOS NORMATIZADOS**

Tese de doutorado apresentada como requisito para obter o título de Doutora em Engenharia Mecânica do curso de doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná, na área de concentração Fenômenos de Transporte e Mecânica dos Sólidos.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Lúcia Leite Ribeiro Okimoto.

Co-orientador: Prof<sup>o</sup>. Dr. Vsévolod Mymrine.

**CURITIBA**

**2012**

## TERMO DE APROVAÇÃO

ANDRESSA MARIA COELHO FERREIRA

### APLICAÇÃO DE RESÍDUOS DE LODO DE PAPEL NA PREPARAÇÃO DE COMPÓSITOS COM CINZA DE MADEIRA E CAL RESIDUAL: CARACTERIZAÇÃO E ENSAIOS NORMATIZADOS

Tese aprovada como requisito parcial à obtenção de grau de Doutora em Engenharia Mecânica, área de concentração Fenômenos de Transporte e Mecânica dos Sólidos, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Eduardo Leite Krüger  
UTFPR  
Examinador externo

Prof. Dr. Carlos Cziulik  
UTFPR  
Examinador externo

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Thaís Helena S. Flores-Sahagun  
UFPR  
Examinadora interna

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Virgínia S. de C. B. Kistmann  
UFPR  
Examinadora externa

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Lúcia Leite Ribeiro Okimoto  
UFPR  
Presidente da Banca Examinadora

Curitiba, 18 de junho de 2012.

Dedico este trabalho aos meus pais José dos Santos Ferreira e Daisy Coelho Ferreira, aos meus irmãos Roseli Ferreira dos Santos, José Augusto Coelho Ferreira e Luís Ricardo Coelho Ferreira e ao meu noivo Guilherme Gonçalves Damin da Silva; pelo constante apoio e carinho.

## **AGRADECIMENTOS**

A Professora Dra. Maria Lúcia Leite Ribeiro Okimoto pela orientação, colaboração, paciência e incentivo durante a realização desta tese.

Ao Professor Dr. Vsévolod Mymrine, meu co-orientador, pelos ensinamentos e apoio sem os quais esta tese não teria sido desenvolvida.

A minha amiga Juliana Fontanari de Carvalho Loro pelo carinho e incentivo; e pela paciência e compreensão durante este processo.

Aos professores e coordenadores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFPR pela oportunidade de ter cursado o doutorado neste programa.

Ao funcionário do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFPR, Marcio Brandani Tenório, pela ajuda nos momentos difíceis e burocráticos desta empreitada.

Ao pesquisador da EMBRAPA, Dr. Helton Damin da Silva pela oportunidade de desenvolver uma tese sobre o tema desta pesquisa.

Ao LABERG (Laboratório de Ergonomia) da UFPR, por ceder o espaço físico para realização deste trabalho.

Ao LAMIR (Laboratório de Minerais e Rochas) da UFPR, pela colaboração no desenvolvimento das análises químicas e mineralógicas deste trabalho.

Ao LEA (Laboratório de Eletroquímica Aplicada) da UFPR, que nos emprestou seu espaço e seus equipamentos para o desenvolvimento dos compósitos.

Ao CNPq pela bolsa concedida para a realização desta pesquisa.

“Viver e não ter a vergonha de ser feliz, cantar  
a beleza de ser um eterno aprendiz.”  
(Eterno Aprendiz – Gonzaguinha)

## RESUMO

Com o aumento da população, cresce também o consumo de produtos industrializados e conseqüentemente o volume de resíduos depositados em aterros. O destino final destes rejeitos é hoje um problema a ser enfrentado em curto prazo por parte das empresas. O presente trabalho propõe a formulação de um compósito utilizando os resíduos de lodo de papel, cinza de madeira e cal na geração de produtos com aplicabilidade na construção civil. Foram caracterizados os resíduos utilizados e posteriormente montados compósitos com nove composições diferentes para realização dos ensaios de resistência mecânica à compressão, absorção de água, granulometria, fluorescência de raios-x, difração de raios-x e análise térmica diferencial e gravimétrica para avaliar o desempenho de cada composição. Os resultados indicam que os compósitos desenvolvidos proporcionam viabilidade de uso no desenvolvimento de produtos para a construção civil. Sendo que o compósito de número seis, com 58% de lodo de papel, 30% de cinza de madeira e 12% de cal foi o que apresentou maior linearidade no seu comportamento físico-químico e mecânico. Conclui-se que a incorporação destes três resíduos produz um compósito apropriado para o desenvolvimento de materiais com aplicabilidade na construção civil, minimizando assim os impactos ambientais pela disposição destes resíduos em aterros.

**Palavras-chave:** Resíduos de lodo de papel, cinzas de madeira e cal. Construção civil. Aterro sanitário.

## **ABSTRACT**

Nowadays along with population growth increases consumption of manufactured goods and consequently increases the volume of wastes on landfills. The correct destiny of these wastes it is now a problem to be faced on short term by most companies. The present work purpose new composite using paper sludge, wood ash lime for building usage. Featured wastes were used and then assembled composites with nine different compositions for the tests of mechanical strength, water absorption, particle size, x-ray fluorescence, x-ray diffraction, differential thermal analysis and gravimetric to evaluate each composition performance. The results indicate that the composites developed provide feasibility for developing products and building usage. Whereas the composition number six, containing 58% of paper sludge, 30% of wood ash and 12% lime presented the greatest linearity behavior in physical-chemical and mechanical. Based on this study we come up with a conclusion that the incorporation of these residues produces a composite suitable for development of materials with applicability in construction, therefore minimizing the environmental impact due to this wastes disposal on waste landfills.

**Keywords:** Paper sludge, wood ash and lime. Hydraulic tiles. Waste landfills.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mistura de lodo de papel, cinza de madeira e cal. ....	36
Figura 2 - Pesagem da mistura de lodo de papel, cinza de madeira e cal utilizada em cada molde. ....	37
Figura 3 - Molde para prensagem da mistura de lodo de papel, cinza de madeira e cal. ....	37
Figura 4 - Prensagem da mistura de lodo de papel, cinza de madeira e cal. ....	38
Figura 5- Mistura de lodo de papel, cinza de madeira e cal após prensagem. ....	38
Figura 6- Corpos de prova moldados com dimensão de 20mm x 20mm. ....	39
Figura 7 - Ensaio de compressão simples em MPa dos corpos de provas conforme NBR-5738/03. ....	40
Figura 8 - Amostra no início do esmagamento na máquina de compressão. ....	40
Figura 9 - Amostra no final do esmagamento na máquina de compressão. ....	40
Figura 10 - Corpos de prova do bloco de vedação desta pesquisa e blocos de vedação de solo-cimento. ....	55

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resultado da distribuição granulométrica da cal residual. ....	58
Quadro 2 - Resultado da distribuição granulométrica da cal virgem. ....	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Porcentagem dos resíduos de lodo da ETE, cinza de madeira e cal para cada compósito desenvolvido.....	35
Tabela 2 - Caracterização da amostra bruta, da lixiviação e da solubilização do Lodo da ETE.....	48
Tabela 3 – Resultados do ensaio da fluorescência de raios-x do lodo da ETE.....	49
Tabela 4 – Resultado do ensaio da difratometria de raios-x do lodo da ETE.....	49
Tabela 5 - Resultado do ensaio de fluorescência de raios-x do resíduo de cinza de madeira.....	50
Tabela 6 - Resultado do ensaio de difratometria de raios-x do resíduo de cinza de madeira.....	50
Tabela 7 - Resultado do ensaio de fluorescência de raios-x da cal residual.....	51
Tabela 8 - Resultado do ensaio de difratometria de raios-x da cal residual.....	52
Tabela 9 - Resultados de resistência aos ensaios de compressão, por idades, dos compósitos desenvolvidos.....	53
Tabela 10 - Resultados de resistência aos ensaios de compressão do bloco de solo-cimento.....	55
Tabela 11- Resultados de resistência aos ensaios de compressão, na idade de 28 dias, com as amostras secas e úmidas, dos compósitos desenvolvidos.....	56
Tabela 12 - Resultados do ensaio de absorção de água dos compósitos 3, 6 e 9, na idade de 28 dias.....	57
Tabela 13 - Resultado da distribuição granulométrica da cinza de madeira.....	59
Tabela 14 - Resultado da distribuição granulométrica do compósito 3 (L=65%, C=25%, Ca=10%).....	60
Tabela 15 - Resultado da distribuição granulométrica do compósito 6(L=58%, C=30%, Ca=12%).....	61

Tabela 16 - Resultado da distribuição granulométrica do compósito 9 (L=40%, C=40%, Ca=20%) .....	62
Tabela 17 - Resultados da análise térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (TG) durante a hidratação e a cura da composição 9.....	64

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curvas dos resultados de resistência aos ensaios de compressão, por idades, dos compósitos desenvolvidos.....	54
Gráfico 2 - Resultado da distribuição granulométrica do compósito 3 (L=65%, C=25%, Ca=10%).....	60
Gráfico 3 - Resultado da distribuição granulométrica do compósito 6 (L=58%, C=30%, Ca=12%).....	61
Gráfico 4 - Resultado da distribuição granulométrica do compósito 9 (L=40%, C=40%, Ca=20%).....	62
Gráfico 5 - Resultados da análise térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (TG) durante a hidratação e a cura da composição 9. ....	64
Gráfico 6 - Curvas de TG da composição 9 nas idades de 1, 3, 7, 14, 28, 60, 90 e 180 dias de cura. ....	66

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1	DELIMITAÇÃO DO TEMA	15
1.2	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E PROBLEMÁTICA	16
1.3	JUSTIFICATIVA	17
1.4	OBJETIVOS	19
1.4.1	Geral	19
1.4.2	Específicos	19
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	20
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>21</b>
2.1	RESÍDUOS INDUSTRIAIS	21
2.2	RESÍDUOS DE PAPEL	22
2.3	RESÍDUOS DE CINZA DE MADEIRA	25
2.4	RESÍDUOS DA PRODUÇÃO DA CAL	26
2.5	APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DE PAPEL	28
2.6	PROPRIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS E MECÂNICAS DOS RESÍDUOS	31
<b>3</b>	<b>MÉTODO</b>	<b>33</b>
3.1	ESTRATÉGIA DE PESQUISA	33
3.2	CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA	34
3.3	DESENVOLVIMENTO DA ESTRATÉGIA	34
3.3.1	Identificação e quantificação do resíduo de lodo da ETE	34
3.3.2	Desenvolvimento e preparo dos corpos de prova	35
3.3.3	Resistência mecânica a compressão	39
3.3.4	Absorção de água	41
3.3.5	Granulometria	42
3.3.6	Análise química e mineralógica dos compósitos	43
3.3.6.1	Fluorescência de raios-x	44
3.3.6.2	Difração de raios-x	44
3.3.6.3	Análise térmica diferencial (ATD) e gravimétrica (ATG)	45
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>47</b>

4.1	RESÍDUO DE LODO DE PAPEL .....	47
4.2	RESÍDUO DE CINZA DE MADEIRA.....	50
4.3	RESÍDUO DA PRODUÇÃO DA CAL .....	51
4.4	RESULTADOS E ANÁLISES DOS COMPÓSITOS PROPOSTOS .....	52
4.4.1	Resistência mecânica à compressão .....	52
4.4.2	Absorção de água.....	56
4.4.3	Granulometria.....	57
4.4.4	Comparação da Análise Térmica Diferencial (ATD) e Gravimétrica (ATG) das Amostras.....	63
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>68</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>70</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Desde a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD) em 1992, quando a Agenda 21 foi redigida, o conceito de Desenvolvimento Sustentável vem sendo introduzido nas discussões sobre progresso em todos os setores da sociedade (CIB, 2000).

Segundo Manzini e Vezzoli (2002), a conscientização acerca dos problemas ambientais segue um percurso que vai do tratamento da poluição à interferência nos processos produtivos, ligando o tecnicamente possível ao ecologicamente necessário.

A preocupação em relação à produção e utilização de materiais e os seus aspectos ambientais vêm ao encontro do conceito de Desenvolvimento Sustentável, que busca o equilíbrio entre os desenvolvimentos econômico e social, sem ultrapassar os limites da resiliência ambiental (VEZZOLI, 2007).

Com o aumento da população brasileira, cresce também o consumo de produtos industrializados e conseqüentemente o volume de resíduos industriais depositados em aterros.

A conseqüência do acúmulo de resíduos industriais envolve sérios riscos de contaminação por transporte ou disposição inadequada. Assim, o estudo de novas alternativas para o tratamento dos inúmeros efluentes industriais produzidos passou a ser uma das principais armas de combate ao fenômeno de contaminação antropogênica (FREIRE et al. 2000).

O destino final dos rejeitos industriais é hoje um problema a ser enfrentado em curto prazo por parte das empresas. Estas, numa primeira etapa, investiram em insumos de produção, dando prioridade para o processo produtivo sem considerar as perdas (BUTTER, 2003).

O presente trabalho busca explorar a incorporação de três resíduos industriais - lodo de papel, cinza de madeira e resíduo da produção da cal - no desenvolvimento de compósitos, pesquisando suas propriedades físicas, químicas e mecânicas, a fim de compatibilizar os aspectos tecnológicos, funcionais, formais e mercadológicos dos compósitos desenvolvidos com a viabilidade de geração de produtos para a construção civil.

Kindlein Júnior et al. (2003) afirmam que o futuro exige uma nova postura com a questão ambiental, a qual deve ser inserida no desenvolvimento de produtos industriais a fim de satisfazer as questões que envolvem a gestão ambiental e o desenvolvimento sustentável.

Deve-se analisar e organizar o ciclo de vida dos produtos, de forma que cada vez mais o lixo seja transformado em insumo, substituindo, até o limite possível os recursos naturais para a preservação do meio ambiente (MAZZER, et al., 2004).

## 1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O tema tratado é entendido dentro do contexto das ciências tecnológicas, mais especificamente da Engenharia. Envolve conceitos interdisciplinares de sustentabilidade e ecologicamente correto, mas sua linha está direcionada à Construção Civil. Traz uma delimitação temporal de estudos e pesquisas realizadas dentro do período de 2007 a 2012, e espacialmente delimita-se a casos brasileiros.

No que se refere ao aproveitamento de resíduos industriais, não se atém a todos os possíveis, e sim ao lodo de papel, cinza de madeira e cal.

Com relação à pesquisa propriamente dita, enquadra-se na linha de Engenharia de Materiais e Fabricação, do programa de Pós Graduação em Construção Civil da Universidade Federal do Paraná. Busca-se a proposição dos compósitos relacionados no objetivo geral do trabalho, ficando a pesquisa limitada a proposição de compósitos para a confecção de blocos de vedação na construção civil. Os ensaios com os compósitos gerados são limitados, mas suficientes para o lançamento proposto. No geral, o norte da pesquisa é a busca de resultados inéditos e originais. Preocupa-se com os compósitos para desenvolver tais blocos, e não com os blocos propriamente ditos.

## 1.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E PROBLEMÁTICA

Os resíduos são uma constante na produção industrial, e podem ser classificados em líquidos sólidos e gasosos. Para efeitos deste estudo consideram-se os resíduos industriais sólidos, dentre os quais se aborda o lodo de papel, as cinzas de madeira e a cal. Abordam-se esses pela quantidade produzida e, ainda, pela prevalência durante todo o ano nas indústrias nacionais. Nas fornalhas notam-se as cinzas, nos moinhos de calcário e cimento notam-se a cal e, ainda, nas indústrias de papel nota-se o lodo de papel. Em cada qual se nota as particularidades próprias, não eximindo o caráter poluidor de nenhum.

Abordando o caso dos resíduos sólidos, Naumoff e Peres (2000) dizem que são provenientes de diversas indústrias e que, para todos os fins, são representados por cinzas, lodos, óleos, resíduos alcalinos ou ácidos, plásticos, papéis, madeiras, fibras, borrachas, metais, escórias, vidros e cerâmicas. Oferecem o risco de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e afins, devendo receber tratamento adequado por ocasião de sua deposição, apresentando-se também como inertes e não inertes. O tratamento deles tem sido geralmente em aterros sanitários ou por incineração.

A produção de resíduos sólidos industriais é relevante no Brasil, sendo frágil, porém, a sua quantificação exata. Conforme Costa (2007) tem acarretado um passivo ambiental que prejudica as pessoas e o meio ambiente; visto que além de intoxicá-las polui a água, o solo e o ar (ainda causa desequilíbrios no meio ambiente por suas deposições inadequadas). Isto tudo, apesar das leis e fiscalizações estarem cada vez mais rígidas. Com relação aos resíduos industriais sólidos, tem-se que são prevalentes no contexto dos resíduos industriais (geram problemas devido à sua deposição, sendo complexo o tratamento e a destinação final).

Neste sentido, e visto que os resíduos sólidos industriais acabam poluindo o solo e o ambiente, ainda causando efeitos danosos à população pelo trato inadequado destes, tem-se a preocupação base deste projeto: “A reutilização de resíduos sólidos industriais para evitar problemas como os em aterros sanitários inadequados”. Como reutilizar? Para que reutilizar? Quais os resíduos sólidos industriais devem ser reaproveitados?

Assim sendo, e com o contexto da reutilização de resíduos sólidos industriais, passa-se a suas aplicabilidades. Parte-se da premissa de que o desenvolvimento de novos materiais na engenharia se faz importante, não só pela questão de custos, mas, e principalmente, pela questão ecológica e de sustentabilidade.

Partindo da premissa que os resíduos sólidos industriais de lodo de papel, cinza de madeira e cal são bastante oriundos nas indústrias brasileiras, este trabalho busca oferecer uma aplicabilidade a isso na Construção Civil, mais especificamente na geração de novos materiais. Sua problemática é: Como os resíduos industriais (lodo de papel, cinza de madeira e cal) podem ser aproveitados na Construção Civil?

### 1.3 JUSTIFICATIVA

Justifica-se a importância e relevância deste trabalho, visto que seus resultados poderão ser úteis à sociedade, ao meio ambiente, à construção civil, à educação e à ciência.

Com relação à sociedade, pode-se dizer que o reaproveitamento dos resíduos industriais, em pauta, com a devida retirada deles do meio ambiente, reduzem problemas de odores, insetos, roedores e afins. Desta forma reduz-se a probabilidade de proliferação de doenças e, ainda, aumenta-se a qualidade de vida das pessoas que moram perto dos aterros sanitários que dispõe incorretamente esses resíduos. Afinal, o cheiro exalado pela decomposição desses resíduos, ainda mais quando molhados, é algo que incomoda o ser humano. Sem dizer que gases prejudiciais à saúde (carbônico e amônia), são liberados na atmosfera.

Já com relação ao meio ambiente, tem-se que a redução dos resíduos industriais lançados indevidamente em aterros sanitários evitaria poluição. O solo deixaria de absorver substância liberadas pelos resíduos (chorume), o que evitaria a contaminação do lençol freático. A água seria menos contaminada pelos resíduos que escorrem na superfície da terra (por ação das chuvas). O ar seria menos contaminado por gases tóxicos liberados pela deposição de resíduos a céu aberto.

Ainda sobre a Construção Civil, os resultados do trabalho podem lhe dar um caráter mais ecológico e ideologicamente sustentável. Afinal, o reaproveitamento de resíduos industriais teria uma produção contínua (de grande escala), melhorando a

qualidade de vida dos moradores e o meio ambiente no entorno dos aterros sanitários, e na geração de blocos de vedação para a construção de moradias.

No que se refere à ciência, a propositura dos compósitos avança no estado atual do conhecimento, possibilitando a produção de pesquisas e, assim, geração de conhecimento. Inovações podem advir de estudos destes compósitos, além disso, novos conhecimentos e aplicações. Novas concepções industriais podem surgir, assim como também novas formas de se encarar as matérias primas para os materiais de construção já existentes, como o barro, recurso natural não renovável utilizado como matéria prima para a fabricação de tijolos.

Por fim, e com relação à educação, tem-se que novos materiais de construção são alvo de interesse na educação em cursos de engenharia. No caso, e envolvendo os conceitos de sustentabilidade e preocupando-se com o meio ambiente e destinação de resíduos industriais que causam problemas à população. Existe ainda a possibilidade de estes materiais impulsionarem novos estudos interdisciplinares buscando uma unificação interdisciplinar no ensino superior da Engenharia.

## 1.4 OBJETIVOS

O trabalho conta com seis objetivos, sendo um geral e cinco específicos. Os objetivos específicos possibilitam um acúmulo de conhecimentos a favor do objetivo geral.

### 1.4.1 Geral

Propor a formulação de compósitos aproveitando resíduos industriais de lodo de papel, cinza de madeira e cal para a geração de produtos com aplicabilidade na construção civil.

### 1.4.2 Específicos

- a) Caracterizar os resíduos que serão trabalhados;
- b) Montar os compósitos para os ensaios;
- c) Verificar a resistência mecânica à compressão, a absorção de água e a granulometria dos compósitos;
- d) Avaliar a fluorescência de raios-x, a difração de raios-x e a análise térmica diferencial e gravimétrica dos compósitos;
- e) Indicar qual composto é mais adequado para a aplicação na construção civil.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho é desenvolvido segundo cinco capítulos, incluindo dentre estes a Introdução e as Conclusões.

O primeiro capítulo, “Introdução”, faz uma apresentação breve do trabalho. Começa por uma contextualização acerca do tema, abordando dentre outras a questão dos depósitos irregulares em aterros sanitários, a poluição por eles causada e danos ambientais. Passa à formulação do problema e problemática (saindo da observatória de problemas que ocorrem na realidade fática e transpondo isso para um problema de pesquisa). Após mostra a importância e relevância do trato do tema e os resultados do trabalho (para efeitos ambientais, sociais, educacionais). Na seqüência mostra os objetivos da pesquisa e, finalmente, apresenta a disposição da estrutura do trabalho.

O segundo capítulo, “Revisão Bibliográfica”, parte da idéia de se mostrar que a solução do problema de fato é inédita e original. Para isso, faz um apanhado no tempo e no espaço acerca de como o problema levantado tem sido resolvido. Para efeitos de delimitação, abrange obras e pesquisas no período de 2007 a 2010, e com enfoque nos desenvolvimentos do Brasil, Estados Unidos e Europa.

O terceiro capítulo, “Método”, mostra como a pesquisa foi realizada. Parte da caracterização da pesquisa (enquadrando-a nas diretrizes básicas de fonte de dados, finalidade, procedimentos e técnicas); para a estratégia de pesquisa (que são os passos simplificados de como a pesquisa foi conduzida) e, após isso, vai para o desenvolvimento da estratégia.

O quarto capítulo “Resultados e Discussões” apresenta os resultados da pesquisa bem como a análise dos mesmos. Utiliza de técnicas de tabulação e de gráficos para a apresentação dados e, para a análise, faz uso de modos quantitativos e qualitativos. Vale-se de meios matemáticos e estatísticos, além de interpretações próprias do autor que é importante para feitos de contribuição para a ciência dentro das argumentações feitas.

O quinto capítulo, “Conclusões”, apresenta o cumprimento dos objetivos do trabalho (geral e específicos), de tal sorte a apresentar as dificuldades de pesquisa, suas limitações e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre o tema. Envolve uma identificação acerca de resíduos industriais, abordando principalmente resíduos de papel, de cinzas de madeira e da produção da cal (através de suas principais características e propriedades).

### 2.1 RESÍDUOS INDUSTRIAIS

Resíduo é todo material descartado nas cadeias de produção e consumo, que por limitações tecnológicas ou de mercado, não apresentam valor de uso ou econômico e podem causar impactos negativos se manejados de forma incorreta (CETESB, 1985). Pode ser redefinido no sentido de entendê-lo como matéria-prima de um novo processo, e ainda classificado quanto a sua origem: comercial, domiciliar, de serviços públicos, hospitalar, portos, aeroportos, terminais rodoviários e ferroviários, industriais, radioativos, agrícolas e entulhos; 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; quanto a sua granulometria e outros (NBR 10004, 2004).

Considera-se resíduo sólido industrial todo resíduo que resulte de atividades industriais e se encontre nos estados sólidos, semi-sólidos, gasoso – quando contido e líquido – cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgoto ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnicas ou economicamente viáveis em face da melhor tecnologia disponível. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água e aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição (CONAMA 313, 2002).

Minimizando a quantidade de resíduos, os custos de tratamento e disposição são menores; desta forma, diminui a quantidade de matéria-prima utilizada na produção e dos insumos de energia necessários. Assim, reduzem-se a quantidade de material extraída do meio ambiente, os custos nas indústrias e os passivos e

impactos ambientais (CYBIS et al., 2007). Estas políticas de produção mais limpa integram os objetivos ambientais aos dos processos produtivos, propondo um crescimento econômico sustentável, com uma excelente proposta ambiental e constituindo um bom negócio para as indústrias.

Segundo Cybis et al. (2007), entre as indústrias em nível mundial, a construção civil é uma das mais importantes, acarretando grandes quantidades de perdas em seus processos. O uso dos resíduos e desperdícios, próprios e de outras indústrias, torna-se um desafio para seus administradores, que tentam minimizar os custos de materiais e insumos a serem usados nos projetos. Para Ângulo (2000), a reciclagem de resíduos faz parte do desenvolvimento sustentável na construção civil.

## 2.2 RESÍDUOS DE PAPEL

O Brasil é o 4º maior produtor mundial de celulose e o 11º maior produtor mundial de papel, além de ser um dos 15 maiores mercados mundiais consumidores desses produtos. Um total de 235 empresas de papel e celulose opera 268 unidades industriais localizadas em 17 estados brasileiros, gerando 109 mil empregos diretos, sendo 66 mil nas indústrias e o restante na produção florestal (BELLOTE et al., 2003). Num cenário onde o grande volume de resíduos sólidos industriais gerados pelo setor de papel e o alto custo do seu manejo estimulam pesquisas em busca de soluções para o seu gerenciamento (PAIVA, 2007).

A indústria de papel gera diversos tipos de resíduos e em quantidades bastante significativas. Porém, a maioria destas indústrias ainda deposita estes resíduos em aterros industriais ou urbanos dos municípios onde estão localizadas (CORAZZA, 1996), sendo que este sistema de gestão gera altos custos com tratamento, transporte e disposição além de riscos ambientais como a contaminação do solo e do lençol freático (NOLASCO, 1993).

Segundo Pereira (2002), os aterros industriais necessitam de segurança em seu gerenciamento, para que não ocorra contato dos resíduos com o solo ou percolação de líquidos para o aquífero livre. Se houver contaminação do meio ambiente em áreas próximas, a empresa responsável responde judicialmente e deve

monitorar as águas subterrâneas, mesmo depois de encerrada a capacidade de ocupação do aterro.

Até meados da década de 80, a preocupação ambiental no setor de papel baseava-se no tratamento de efluentes e de odores derivados do processo de fabricação para atender as legislações ambientais brasileiras e reduzir os conflitos com a população do entorno destas fábricas (LARS et al., 1996).

De acordo com Paiva (2007), a partir da década de 90 governos e setores industriais vêm revendo esta política ambiental e estes sistemas de gestão de resíduos, buscando gradativamente a gestão integrada de resíduos, ou seja, priorizando ações que buscam a redução dos resíduos produzidos e o seu aproveitamento.

Soluções para minimizar a geração de resíduos, recuperação de matérias-primas e reuso da água são os novos desafios para as indústrias de papel. Entretanto, problemas relacionados 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, que estão depositados em inúmeros aterros industriais e urbanos (TANIZE, 2004).

Como exemplo, pode-se citar o vazamento do lodo de ETE (Estação de Tratamento de Efluentes) na Votorantim Papel e Celulose em 2005, que atingiu e contaminou um córrego nas proximidades, além de interditar uma estrada vicinal que liga o município de Jacareí ao de Guararema (O VALE PARAIBANO, 2005).

Acidentes como estes ocorrem freqüentemente e são cada vez mais preocupantes, pois à medida que a produção de papel cresce os números relativos à geração de resíduos também aumentam na mesma proporção (BELLOTE et al., 2003). E surge a necessidade de soluções que possibilitem a diminuição da quantidade de disposição destes resíduos em aterros ganhando mais credibilidade junto ao setor industrial. O aproveitamento destes, além de reduzir o risco ambiental, pode também, reduzir os custos com transporte e disposição, melhorar a imagem da empresa e possibilitar a busca para o desenvolvimento de novos materiais e produtos (NOLASCO, 1993).

Segundo Hoffman (2000), mudanças nos processos de gerenciamento de resíduos são fundamentais para implantar estratégias de otimização de uso desse material na própria cadeia produtiva ou em outras, de uma forma sistêmica,

promovendo a integração dos setores industriais e diminuindo os impactos ambientais negativos na produção e no ciclo de vida do produto.

Ainda observa-se que o grande desafio encontrado pelas empresas do setor de papel é equacionar os interesses econômicos às demandas dos órgãos certificadores e fiscalizadores. Isto ocorre, em função dos custos operacionais embutidos nas atividades relacionadas à gestão de resíduos, principalmente na sua disposição (PAIVA, 2007).

De acordo com Lebéis (2003), resíduos quando não tratados ou descartados na natureza acarretam problemas como o comprometimento de mananciais e poluição do solo e da água. Além de conseqüências implícitas quando os descartes são realizados em aterros próximos aos centros urbanos como, a degradação da paisagem urbana e a desvalorização das propriedades vizinhas. Mesmo para as fábricas atuais e mais modernas que possuem alguma forma de tratamento de efluentes, antes de lançá-los no meio ambiente, os requerimentos legais relativos ao gerenciamento dos resíduos industriais têm se tornado mais restritivos fazendo-se necessário investigar alternativas para melhorar os processos de tratamento e disposição final destes efluentes (REZENDE et al., 2000).

O setor de papel e celulose é considerado um setor industrial bastante impactante e poluente. Este é fortemente criticado e pressionado por entidades ambientalistas, visando uma mudança no seu processo industrial (FAILLACE, 1996). Ainda segundo Faillace (1996), o processo de reciclagem de papel gera resíduos que são depositados em aterros, buscando-se sempre alternativas de usos mais nobres para esses resíduos, com o intuito de evitar ou reduzir passivos ambientais.

Os resíduos de papel depositados nos aterros das indústrias são basicamente constituídos por lodos primários e secundários. De acordo com Costa (2007), o lodo primário é composto de fibras de resíduos de madeira, com alto teor de carbono e baixo nível de nutrientes. O secundário, normalmente já passou por tratamento microbiológico, o que facilita a sua decomposição.

A composição química dos resíduos das fábricas de papel reciclado depende do tipo de aparas utilizadas no processo. Segundo Balbinot Junior et al. (2006), o lodo resultante é composto por fibras de cor acinzentada, classificados como classe II-A – não inerte pela ABNT. Após receber tratamento biológico, resulta em um

material pastoso, homogêneo, de coloração acinzentada e apresentam altos teores de matéria orgânica (NOLASCO et al., 2005).

### 2.3 RESÍDUOS DE CINZA DE MADEIRA

É formado durante o processo de queima em caldeiras de geração de vapor e utilizado como componente do substrato usado em viveiros de mudas e como matéria prima para a fabricação de carvão ativado. Também é utilizado como agente pozolânico do cimento, além de indústrias de pré-moldados e em recuperação de áreas degradadas (LENZI, 2001).

De acordo com Maltz (2003), a grande quantidade de resíduos de cinzas provenientes da queima de caldeiras tornou-se um problema, pois é um material particulado fino, capaz de espalhar-se por quilômetros. O mesmo possui reatividade com o solo, sendo usadas como corretivo, mesmo que de forma empírica, tornando-se um problema ambiental de solução complexa. Os processos de combustão, sejam eles efetuados em caldeiras para produzir calor, em centrais térmicas de produção de eletricidade ou em unidades de incineração de resíduos sólidos urbanos ou de resíduos industriais, geram novos resíduos, tais como as cinzas, as poeiras e as escórias. Consoante o tipo de processo, também o tipo de resíduo pode ser diferenciado. Por exemplo: Cinzas volantes de centrais térmicas – são as partículas resultantes da combustão do carvão e que são arrastadas no forno, tendo que ser retiradas em sistema de despoeiramento por precipitação eletro-estática.

São constituídas por óxidos de silício e de alumínio, contendo ainda uma grande variedade de outros metais, como ferro e cálcio, em teores mais reduzidos. É um resíduo que confere propriedades interessantes aos cimentos, por ter características pozolânicas. Por esse motivo, é um resíduo correntemente utilizado na formulação de cimentos. Cinzas volantes de incineradoras de resíduos sólidos urbanos – é um resíduo rico em silicato de cálcio, contendo ainda óxidos de ferro, sódio, alumínio e potássio. Devido à presença de sódio, de potássio e de sulfatos, estas cinzas não são incorporadas na produção de cimentos (CHIES et al., 2003).

## 2.4 RESÍDUOS DA PRODUÇÃO DA CAL

Segundo Guimarães (2002), a cal é um produto de grande expressão para os setores industriais e sociais, principalmente quando se conhece o amplo leque de que dele se utilizam, graças à sua dupla capacidade – reagente químico e aglomerante-ligante. Quando virgem e hidratada, está dentre os dez produtos de origem mineral de maior consumo mundial (devido a sua multiplicidade de aplicações).

O Brasil tem baixo consumo per – capita da cal (aproximadamente 36 kg/ano), apesar do considerável nível de produção (de 5 a 6 milhões de ton/ano). Este índice está acima do consumo médio mundial, em torno de 25 kg/ano, em um volume que o consumo de cal pode ser considerado como índice de desenvolvimento de um Estado (GUIMARÃES, 2002).

Observa-se que a produção de calcário no Paraná passou de cerca de 8 milhões de toneladas em 1989, para mais de 12 milhões em 2000. (REBELO et al., 2003).

O homem conheceu a cal no período Paleolítico da Idade da Pedra. Neste período as grutas ou cavernas, cavidades naturais geralmente em rochas carbonatadas, geradas por fenômenos geológicos ocorridos nas eras passadas, serviam de abrigo para a defesa das espécies e contra as intempéries (GUIMARÃES, 2002).

Como elemento químico é relativamente recente. Contudo, alguns dos seus compostos são conhecidos desde tempos remotos. Os gregos empregavam a cal como aglomerante, o mesmo acontecendo com os etruscos e depois com os romanos que usavam a cal apagada (CaOH - hidróxido de cálcio), a cal hidráulica e a cal viva (CaO - óxido de cálcio) nas construções (PETRUCCI, 1976). Tanto os gregos como os romanos sabiam que a adição de certas terras de origem vulcânica às argamassas de cal e areia melhorava sua resistência mesmo quando submetidas à ação da água.

Os gregos empregavam, com esse intuito, as terras vulcânicas da ilha de Santorim. O material correspondente dos construtores romanos era uma cinza vulcânica encontrada em pontos diversos da baía de Nápoles. O exame das construções dos séculos IX a XI revelou que a arte de fabricar o aglomerante

achava-se quase completamente perdida, sendo a cal usada em fragmentos mal queimados e sem adição de pozolanas. Do século XII em diante, a qualidade foi melhorando e, nas obras que ficaram principalmente nas construídas depois do século XIV, encontram-se excelentes argamassas (PETRUCCI, 1976).

Apesar de ser considerado o produto manufaturado mais antigo da humanidade são cada vez mais freqüentes as descobertas de novas aplicações para a cal (GUIMARÃES, 1985).

No sul do Brasil e Paraná o calcário predominante é o dolomítico. A atual importância econômica e social da extração e transformação de calcários na Região Metropolitana de Curitiba lhe confere uma natureza estratégica regional (REBELO et al., 2003).

A obtenção de cal ocorre em fornos que transformam a calcita (carbonato de cálcio –  $\text{CaCO}_3$ ), o calcário calcítico, magnesiano ou dolomítico (dolomita), (carbonato de cálcio e magnésio  $\text{CaCO}_3 \text{MgCO}_3$ ) em cal virgem (óxido de cálcio e magnésio –  $\text{CaO.MgO}$ ), com posterior hidratação, no caso da cal hidratada (hidróxido de cálcio e magnésio –  $\text{Ca(OH)}_2$  e  $\text{Mg(OH)}_2$ ).

A cal hidratada é um dos principais elementos das argamassas porque promove uma série de benefícios para a edificação. Ela tem poder aglomerante, assim como o cimento, que une para sempre os grãos de areia das argamassas. A cal hidratada é fina e leve, e por isso permite o preparo de maior quantidade de argamassa (com a redução do custo do  $\text{m}^3$ ). Suas partículas são finas, e ao serem misturadas com água funcionam como lubrificante (reduzindo o atrito entre os grãos de areia). O resultado é a melhor trabalhabilidade (ou liga), boa aderência e maior rendimento na mão-de-obra. As argamassas à base de cal hidratada têm resistência suficiente quanto à compressão e aderência, tanto para assentamentos como para revestimentos, para atender as normas técnicas (JEFFERSON, 2007).

Ainda segundo Jefferson (2007), por ser um produto alcalino, a cal hidratada impede a oxidação nas ferragens e, também por essa sua característica, atua como agente bactericida e fungicida. Além disso, evita que se formem manchas e apodrecimento precoce dos revestimentos. Proporciona economia de tinta com um acabamento mais liso e de cor clara e é compatível com qualquer tipo de tinta e outros acabamentos (como fórmica, lambris, papéis de parede).

É importante ressaltar, ainda, que as argamassas à base de cal hidratada têm baixo módulo de elasticidade, ou seja, absorvem melhor as pequenas movimentações das construções (evitam trincas, fissuras e até o descolamento, ou queda dos revestimentos). Argamassas à base de cal hidratada podem durar centenas de anos, ou até mais. Os exemplos para comprovar essa característica são muitos, dentre entre eles a milenar Via Ápia (na Itália) e a Casa das Retortas, na capital paulista.

Conforme aparece nas estatísticas mundiais, a cal compreende seis produtos resultantes da calcinação de calcários magnesianos / dolomitos – hidratados ou não. Estes produtos são: cal virgem cálcica (óxido de cálcio –  $\text{CaO}$ ), cal hidratada cálcica (hidróxido de cálcio –  $\text{Ca(OH)}_2$ ), cal virgem dolomítica (óxidos de cálcio e de magnésio –  $\text{CaO.MgO}$ ), cal dolomítica hidratada normal tipo N (hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio –  $\text{Ca(OH)}_2.\text{Mg(OH)}_2.\text{MgO}$ ), cal dolomítica hidratada especial tipo S (hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio –  $\text{Ca(OH)}_2.\text{Mg(OH)}_2$ ), utilizadas em argamassas, os tipos intermediários (classificados como cales magnesianas) das cales cálcicas e dolomíticas e a cal hidráulica utilizada em estruturas (PETRUCCI, 1976).

## 2.5 APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DE PAPEL

O desenvolvimento de compósitos com potencial aplicação em diferentes tipos de componentes é de grande interesse para o setor industrial e para a sociedade. Do ponto de vista tecnológico e social, resulta em novos materiais baseados em modelos mais sustentáveis e com menor custo de produção e, sob a ótica ambiental, contribui com a redução do volume disposto em aterros (diminuindo os riscos de contaminação do solo e degradação da paisagem urbana).

O lodo da estação de tratamento de efluentes (ETE), das indústrias de papel possui características que favorecem seu aproveitamento na construção civil, ou seja, não sazonalidade, pequena variação na composição química, não periculosidade, grande capacidade de incorporação em materiais e grande volume em pontos fixos de emissão (NOLASCO, 1997).

Algumas aplicações do uso do lodo da indústria de papel no Brasil foram desenvolvidas por Maia (1999), que procurou utilizar o lodo de papel, oriundo de ETE, como carga do material como componentes de substratos para a produção de mudas de *Pinus taeda*. Outra finalidade é a aplicação do lodo de celulose, proposto por Wolff (2007), na substituição de argila por lodo de celulose na fabricação da cerâmica vermelha.

As vantagens no uso dos resíduos do lodo da ETE das indústrias de papel em materiais de construção são objeto de diversas pesquisas e pesquisadores. Nolasco (1993) aponta a economia de água, pois este resíduo é naturalmente úmido. Soroushian et al. (1995) e Sarigaphuti et al. (1993) afirmam que a presença de fibras celulósicas tende a diminuir as micro-fissuras características em materiais cimentícios.

Thomas et. al. (1987), desenvolveram um compósito com o lodo da ETE de uma indústria de papel reciclado visando o uso na construção civil como blocos ou painéis. Eires et al. (2005) utilizaram este mesmo resíduo como agregado junto a fibra de celulose e em testes de compressão em seu compósito, denominado de “hempcrete”, atingiu 8 MPa de resistência a compressão aos 28 dias.

Nolasco (1997) testou diferentes traços, entre 10% a 30% de resíduo de lodo de ETE de papel na produção de componentes cerâmicos para vedação, como blocos e tijolos. Os resultados mostraram a viabilidade econômica e técnica na utilização deste resíduo, devido aos ganhos de resistência a impactos, coesão e trabalhabilidade; e, economia de água, argila e energia elétrica na produção.

Lebéis (2003) fez um estudo adicionando lodo da ETE em argamassa de cimento com composições incorporando de 0% a 20% de resíduo em relação à massa de cimento. Fez a caracterização química e física do resíduo e ensaios de 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 nos compósitos. Os resultados apresentaram um aumento na resistência à compressão axial e na tração por compressão diametral quando incorporados 5% de resíduo. Já, para os compósitos com 10% e 15% de resíduos o autor indica o uso destes para o enchimento de lajes e regularização de pisos.

Battistelle (2002) estudou a utilização do lodo da ETE na fabricação de adobe (tijolo sem queima). Foram desenvolvidos tijolos com 0%, 10%, 15%, 20%, 25%,

30% e 40% em volume de resíduo. O autor desenvolveu ensaios de retração, absorção de água, resistência à compressão simples, intemperismo, gotejamento, verificação da ação do fogo como também as características acústicas e térmicas.

Naik e Krauss (1998) realizaram ensaios de compressão e flexão aos 28 dias de cura das amostras e constataram que a incorporação de 1,2% de resíduo do lodo da ETE como adição em concretos promove importantes ganhos nas suas propriedades mecânicas.

O Instituto Americano do Concreto recomenda o uso de fibras de polpa Kraft como reforço em materiais cimentícios (TONOLI, 2006). Goroyias et al. (2004), também citam a produção de painéis com resíduos da indústria de papel com vantagens nas características mecânicas.

A experiência acumulada sobre o assunto indica que ainda é grande a necessidade de maiores informações e de melhor entendimento do comportamento dos principais constituintes dos efluentes de fábricas de papel.

De acordo com Rezende et al. (2000), os estudos realizados com a utilização do lodo oriundo da ETE podem ser importantes para que sejam evitados erros operacionais e prejuízos ambientais, além de melhorar as concepções de projetos, tornando-os sustentáveis ao longo do tempo.

A reciclagem dos resíduos provenientes das indústrias de papel vem se consolidando como uma prática importante para a sustentabilidade seja atenuando o impacto ambiental gerado ou reduzindo a quantidade de resíduos produzidos.

A combinação da cal com cinzas volantes e uma pequena porcentagem de gesso calcinado reduz o tempo de endurecimento do material. A aplicação desta técnica pode ser usada na fabricação de tijolos com a vantagem de redução de consumo energético e na redução desses resíduos (AMBALAVAN et al., 1996).

Uma pesquisa realizada no norte do Vietnã para a obtenção de novos materiais utilizando resíduos industriais está empregando o pó de cal com cimento Portland de baixa qualidade para produção de compósito de cimento obtendo um novo material de alto desempenho (STROEVEN et al., 2001).

É bastante discutido o uso de materiais alternativos derivados de resíduos industriais por produtos na manufatura do cimento Portland. Resíduos como calcário e carbonatos à base de cal são utilizados pelas indústrias do cimento na

clinkerização para a conservação de energia térmica e otimização da produção (BHATTY et al. 2004).

A habitação é um grande problema mundial atualmente. O material mais comumente usado na fabricação de casas é o tijolo de argila queimado. Uma quantidade significativa de combustível é consumida na fabricação desses tijolos. Além disso, a contínua remoção de camadas superficiais do solo, na produção convencional de tijolos, cria sérios problemas ambientais. Segundo Kumar (2002), estudos da possibilidade de produção de tijolos e blocos vazados com uso de cinzas volantes, cal e gesso apresentaram resultados de resistência suficiente para a aplicação na construção civil e na produção de casas de baixo custo.

Nos Estados Unidos, é aplicada uma técnica de solidificação/estabilização de solos contaminados por resíduos perigosos utilizando o cimento Portland, pó dos fornos de cimento, a cal, pó dos fornos de cal e cinzas volantes. Estes materiais são usados sozinhos ou combinados (JOINT, 2002). De acordo com Singh et. al.(2006), cimentos de edificações de baixo custo podem ser obtidos pela combinação de resíduos industriais como cinzas volantes, borra de cal, gesso, cimento Portland e ativadores químicos. O emprego do novo material está sendo apresentado para uso na Índia. A cal é considerada um material de cimentação não hidráulico, ou seja, um composto que substitui a água e que pode ser usado no endurecimento do cimento (CALLISTER, 2002).

## 2.6 PROPRIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS E MECÂNICAS DOS RESÍDUOS

O comportamento mecânico adequado e a manutenção do desempenho dos compósitos ao longo do tempo dependem de alguns fatores considerados importantes na sua estrutura interna e estão relacionados à capacidade 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 (SILVA, 2002).

De acordo com Paiva (2007), a partir da análise química do resíduo é possível levantar possibilidades de aproveitamento que respeitem tanto a legislação vigente quanto os aspectos éticos que envolvem o gerenciamento de resíduos. As

propriedades físicas exigidas por um material compósito referem-se a sua massa específica, sua porosidade, absorção de água e os aspectos visuais apresentados pelos materiais (SILVA et al., 2005).

E as propriedades mecânicas como a resistência a compressão é uma das formas de avaliação da compatibilidade e da degradação do material, podendo ser utilizadas para a avaliação da qualidade de um compósito, sendo seu controle facilmente exequível por um laboratório devidamente equipado para tal finalidade (LEVY, 2001).

De acordo com Teixeira (2002), as propriedades físicas mais importantes para a caracterização do resíduo de papel é a determinação do teor de matéria orgânica, o teor de umidade natural e a compressibilidade do material. O teor de umidade natural é um importante índice a ser avaliado, pois dá a base para a prerrogativa de economia de água nos processos produtivos. Entretanto, ele afeta a compactação, a resistência e a condutividade hidráulica do material (MOO-YOUNG; ZIMMIE, 1996).

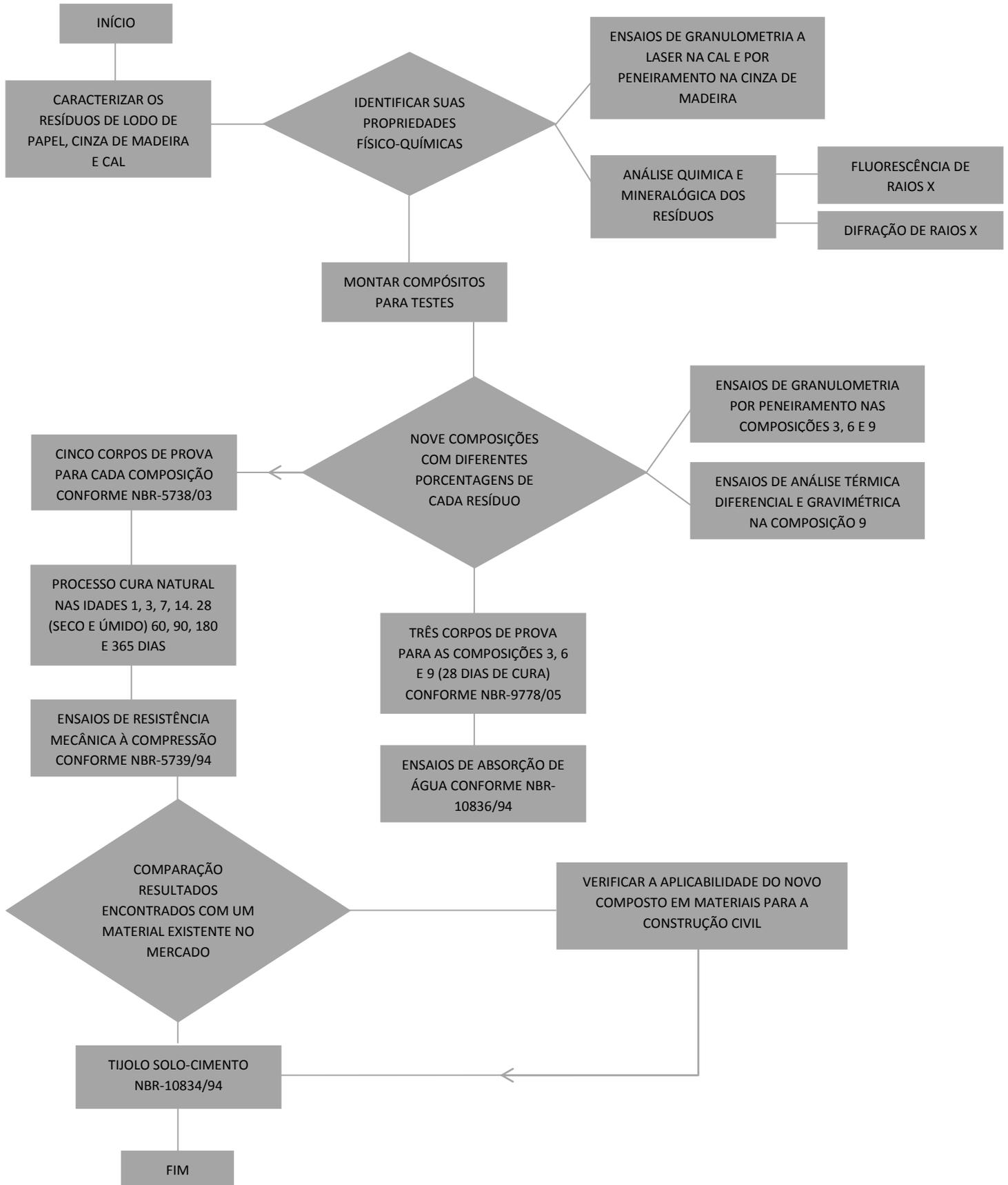
A absorção de água também é uma importante característica de um material, principalmente aqueles que possuem em sua composição fibras naturais, com alta capacidade de absorção de água e risco de deterioração. Este parâmetro pode determinar o uso dos compósitos em diferentes componentes construtivos (PAIVA, 2007). Nota-se que a resistência à compressão é a propriedade mais importante na determinação da qualidade dos materiais (ANDRADE, 1991).

A separação granulométrica mostra as concentrações em que determinadas espécies minerais estão mais concentradas do que outras (ANDRADE, 1991). De acordo com Silva (2002), a homogeneidade dos grãos, ou seja, 100% de grãos com a mesma dimensão poderá resultar uma porosidade mínima, aproximadamente 40%. Grandes quantidades de grãos finos e grossos, e pequenas quantidades de grãos médios proporcionarão menor porosidade e uma maior resistência mecânica.

Segundo Paiva (2007), o conhecimento das propriedades e processamento dos materiais tem como objetivo compreender a natureza dos mesmos estabelecendo conceitos que permitam relacionar suas estruturas com suas propriedades e comportamento para convertê-los em produtos finais.

### 3 MÉTODO

#### 3.1 ESTRATÉGIA DE PESQUISA



## 3.2 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa possui objetivo explicativo analítico, e é caracterizada como uma pesquisa prática. Possui a fonte de dados em laboratório e utiliza de procedimentos experimentais. É utilizada a técnica de observação direta dos dados e o tratamento dos mesmos é por tabulação. A análise dos dados é quanti-qualitativa e a inspiração se dá sob o método indutivo.

## 3.3 DESENVOLVIMENTO DA ESTRATÉGIA

Este tópico mostra como foram desenvolvidos os passos apresentados na estratégia.

### 3.3.1 Identificação e quantificação do resíduo de lodo da ETE

A primeira etapa junto ao setor industrial é a determinação dos dados quantitativos dos resíduos, como a quantidade gerada e os locais de produção, pois é de grande importância para a sua localização dentro do cenário econômico, social e político. Além da quantidade gerada, é também importante neste estágio detectar eventual sazonalidade e volume existente em estoque.

Neste trabalho, o principal resíduo utilizado é o lodo da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) de uma empresa fabricante de papel higiênico e guardanapo de papel, denominados papel Tissue, situada em Rio Negrinho no estado de Santa Catarina.

Esta empresa possui três máquinas de produção de papel com fabricação aproximada de 2.000 toneladas por mês. Utiliza como matéria prima aparas de papel reciclado, proveniente de centros como São Paulo, Curitiba e Rio de Janeiro.

No processo de produção, as aparas são processadas, sofrendo trituração, depuração e refinação. São retiradas todas as impurezas contidas nas aparas como areia, grampos e plástico.

A massa formada de fibras segue para as máquinas formadoras de papel, onde o excedente de água retorna ao processo para se retirar o remanescente de fibras, tendo a água o destino da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE), juntando-se às outras águas que sobram de outros processos na fabricação.

Na ETE, a água sofre adição de polímeros e agentes flotores (Sulfato de Alumínio), para facilitar a decantação e clarificação.

A decantação é feita em diversos tanques, sendo o lodo bombeado para máquinas centrífugas, onde se separa a água do lodo. Cerca de 90% das fibras restantes no lodo são retiradas no processo, que é considerado como processo primário de tratamento.

O lodo centrifugado, com umidade em torno de 60% é composto basicamente por fibras celulósicas não aproveitadas no sistema de produção.

Esta empresa gera aproximadamente 16 toneladas/dia, durante todo o ano, de resíduos de lodo da ETE. Este lodo é centrifugado, carregado e transportado para o aterro industrial da empresa que fica localizado a 3 km da indústria.

### 3.3.2 Desenvolvimento e preparo dos corpos de prova

Para verificar as aplicações tecnicamente viáveis no aproveitamento destes resíduos, de acordo com suas características físico-químicas e mecânicas, foram elaborados nove compósitos com diferentes porcentagens de lodo de papel, cinza de madeira e resíduos da produção da cal, de acordo com a tabela 1.

Tabela 1 – Porcentagem dos resíduos de lodo da ETE, cinza de madeira e cal para cada compósito desenvolvido.

Compósito nº	Composições		
	Lodo (%)	Cinza (%)	Cal (%)
1	55	35	10
2	60	30	10
3	65	25	10
4	48	40	12
5	53	35	12
6	58	30	12
7	50	30	20
8	45	40	15
9	40	40	20

Num primeiro momento, foi necessário misturar o resíduo de lodo de papel à cinza de madeira e à cal, de acordo com as porcentagens estabelecidas em cada compósito. Neste processo foi utilizado um multiprocessador de uso doméstico que possui um sistema de facas e possibilitou a homogeneização adequada da mistura, conforme figura 1.



Figura 1 – Mistura de lodo de papel, cinza de madeira e cal.

Depois, foi necessário pesar a porção que seria utilizada em cada molde elaborado, conforme recomendação da NBR-5738 (ABNT, 2003). Neste caso foram necessários 13 gramas da mistura para cada molde, conforme figura 2.

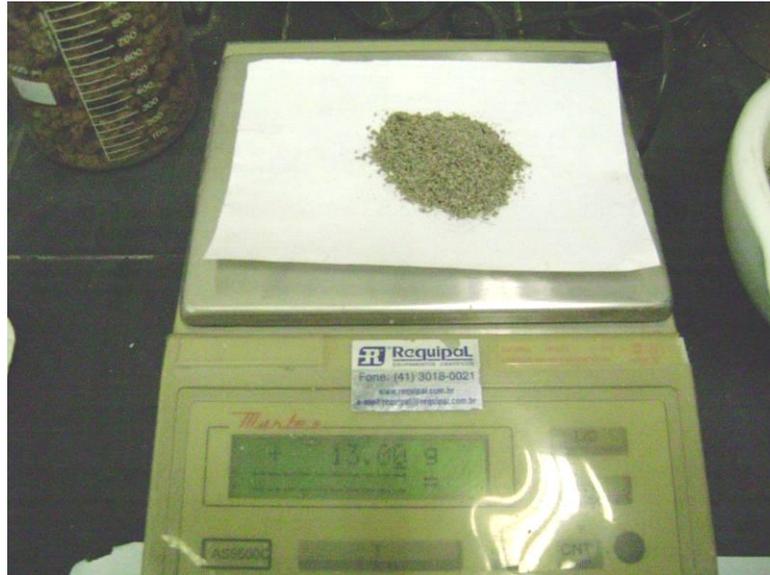


Figura 2 - Pesagem da mistura de lodo de papel, cinza de madeira e cal utilizada em cada molde.

Então, coloca-se a mistura dentro de um molde fabricado em aço, material não absorvente e quimicamente inerte aos resíduos trabalhados, com 20 mm de largura e 60 mm de altura, conforme a figura 3.



Figura 3 - Molde para prensagem da mistura de lodo de papel, cinza de madeira e cal.

Estas misturas foram prensadas por uma prensa hidráulica ST 15 da marca Bovenau, de acordo com a recomendação da norma NBR – 5738 (ABNT, 2003), com uma força de 0,4 MPa. Tal prensagem pode ser verificada nas figuras 4 e 5.



Figura 4 - Prensagem da mistura de lodo de papel, cinza de madeira e cal.



Figura 5- Mistura de lodo de papel, cinza de madeira e cal após prensagem.

Para cada uma das nove composições foram confeccionados cinco corpos de prova por idade, sendo estas: 1, 3, 7, 14, 28 (seco e úmido), 60, 90, 180 e 365 dias; perfazendo um total de 450 corpos de prova nas dimensões de 20mm x 20mm, conforme figura 6.



Figura 6- Corpos de prova moldados com dimensão de 20mm x 20mm.

Após sofrerem um processo de cura natural, a temperatura ambiente, os corpos de prova foram submetidos a ensaios de compressão simples em MPa, conforme recomendação da norma NBR- 5739 (ABNT, 1994).

### 3.3.3 Resistência mecânica a compressão

Para verificar a resistência de cada compósito, os mesmos foram submetidos a ensaios de compressão simples em MPa (com velocidade de 10 mm/minuto) conforme recomendação da norma NBR- 5739 (ABNT, 1994).

A máquina utilizada para este ensaio, nesta pesquisa, foi a EMIC. Esta máquina está conectada a um computador que possui um software instalado, Virmarq, o qual fornece automaticamente os valores de compressão para cada amostra ensaiada (incluindo a média das cinco compressões realizadas para cada composição). Nas figuras 7, 8 e 9, pode-se verificar a máquina de compressão e as amostras sendo esmagadas.



Figura 7 - Ensaio de compressão simples em MPa dos corpos de provas conforme NBR-5738/03.



Figura 8 - Amostra no início do esmagamento na máquina de compressão.



Figura 9 - Amostra no final do esmagamento na máquina de compressão.

### 3.3.4 Absorção de água

Os ensaios de absorção de água foram realizados de acordo com a norma NBR-10836 (ABNT, 1994), no LAMIR (Laboratório de Análise de Minerais e Rochas) da UFPR (Universidade Federal do Paraná).

Para este ensaio a aparelhagem necessária foi: i) uma balança com sensibilidade de 0,4% da amostra da massa a ser ensaiada; ii) uma estufa elétrica capaz de manter a temperatura entre 105°C e 110 °C e iii) um tanque de imersão.

Para o ensaio de absorção de água por imersão, foram preparados três corpos de prova, na idade de 28 dias, conforme especificado na norma NBR- 9778 (ABNT, 2005), das seguintes composições:

- 1) Composição 3, por conter a maior porcentagem de lodo de papel;
- 2) Composição 6, com uma quantidade intermediária de lodo de papel;
- 3) Composição 9, com menor porcentagem de lodo de papel e maior quantidade da cal.

Para comparação dos resultados encontrados, também foram realizados testes de absorção de água nos moldes cortados do bloco de vedação de solo cimento seguindo o mesmo padrão do ensaio realizado nos compósitos.

Primeiro os corpos-de-prova foram colocados na estufa até atingir uma constância de massa, obtendo-se assim a massa seca  $M_1$  (em gramas). Depois, imergimos os corpos-de-prova em um tanque com água à temperatura ambiente durante 24 horas. Após, retira-se da imersão e enxuga-se com pano úmido para determinar a massa saturada  $M_2$ .

Então, calcula-se o valor da absorção, expresso em porcentagem, através da seguinte equação:

$$A\% = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

A = absorção dos corpos-de-prova;

$M_1$  = massa seca;

$M_2$  = massa saturada.

### 3.3.5 Granulometria

Os ensaios de granulometria foram realizados no LAMIR da UFPR. Isto foi feito para os resíduos utilizados, e também nos compósitos 3, 6 e 9 desenvolvidos.

Nos ensaios de granulometria (a laser) foram analisadas 100 gramas de material, já nos ensaios por peneiramento foram analisadas 200 gramas.

Para comparar o resíduo da produção da cal, utilizado nesta pesquisa, realizou-se também um ensaio de granulométrico numa amostra da cal virgem, para poder analisar a diferença. Neste caso, o ensaio de granulometria foi realizado num granulômetro a laser por se tratar de amostras muito finas.

O ensaio de granulometria por peneiramento foi realizado para obter a curva granulométrica do resíduo de cinza de madeira e dos compósitos 3, 6 e 9 desenvolvidos nesta pesquisa.

Nos ensaios de granulometria por peneiras foram utilizados os seguintes materiais:

- a) Jogo de peneiras;
- b) Desagregador;
- c) Balança de duas casas;
- d) Quarteador Jhones;
- e) Becker 1500 ml.

Primeiro quarteia-se e seca-se as amostras em estufa a 70 °C, depois se pesa 200g da amostra já seca. Então, anota-se o peso das peneiras na planilha de granulometria na coluna “peneira” e desagrega-se o material com 500 mL de água, passando pela peneira o sobrenadante. Repete-se o processo até que o sobrenadante fique límpido, podendo assim colocar todo o material do Becker na

peneira. Após peneirar a úmido, forçando a passagem pelas peneiras com água corrente retirando os excessos de amostra das paredes com a mão, sem forçar e repetir o processo em todas as peneiras coloca-se para secar em estufa até 70 °C (por cerca de 15 horas). Retira-se da estufa, espera-se esfriar, pesam-se as peneiras novamente registrando o peso na coluna “peneira + amostra”. Subtrai-se da coluna “peneira + amostra” a coluna “peneira” e anotar os valores na coluna “retido”. A alíquota retida em cada peneira deve ser transferida para uma embalagem plástica anotando-se o respectivo número da amostra, malha peso e lacra-se com fita adesiva. Com esses dados, preenche-se uma planilha e então se obtém o gráfico de distribuição granulométrica.

Para o resíduo de lodo de papel não foi possível realizar o ensaio, pois o mesmo é pastoso e muito úmido para ensaios de granulometria por peneiramento e no método a laser causava o entupimento do granulômetro.

### 3.3.6 Análise química e mineralógica dos compósitos

A análise química e mineralógica dos compósitos foi realizada pelo uso de metodologia corrente e adaptadas aos equipamentos laboratoriais disponíveis. Os ensaios laboratoriais foram realizados por técnicos do LAMIR (Laboratório de Análise de Minerais e Rochas) da UFPR (Universidade Federal do Paraná), e com acompanhamento desta equipe de pesquisa que posteriormente analisou os dados.

Para a análise química e mineralógica dos compósitos, utilizou-se o compósito 9, para todas as idades após a ruptura nos ensaios de compressão.

Esta composição foi escolhida por apresentar o teor máximo de resíduo da produção de cal (20%), além de porcentagens iguais de lodo de papel (40%) e cinza de madeira (40%). Nesta composição se tornam mais visíveis os processos de reconstrução dos componentes mineralógicos devido à quantidade da cal.

### 3.3.6.1 *Fluorescência de raios-x*

A análise por fluorescência de raios X é um método de análise elementar qualitativo e quantitativo que se aplica à identificação de praticamente todos os elementos.

Utiliza-se uma fonte de radiação X para ionizar os níveis internos dos átomos constituintes da amostra, por efeito fotoelétrico. Na reorganização do átomo e regresso ao estado fundamental, estes átomos podem libertar o excesso de energia através da emissão de um fóton X, de energia igual à diferença de energia de ligação dos níveis entre os quais se deu a transição.

Quando essa radiação incide em um material, vários fenômenos acontecem e o feixe é atenuado, tanto por absorção como por espalhamento. A absorção é mais significativa e cresce com o número atômico da substância.

A energia de absorção provocará a remoção total de elétrons no material irradiado, que por sua vez se rearranjará e emitirá a radiação secundária denominada fluorescente. Desta forma, podem-se quantificar os elementos com padrões adequados.

### 3.3.6.2 *Difração de raios-x*

O uso da técnica de difração de raios-x tem a finalidade de identificar quais são as espécies cristalinas das amostras estudadas.

No método de difração de raios-x, o difratograma apresenta um grande número de picos, o que facilita a identificação das composições mineralógicas, principalmente no caso de misturas, onde pode haver superposição de alguns picos, mas nunca de todos.

A difração de raios-x é usada como ferramenta nos equipamentos de fluorescência de raios-x para separação dos diferentes comprimentos de onda emitidos pela amostra excitada por raios x.

A técnica de DRX oferece um modo conveniente para determinar a análise mineralógica dos sólidos cristalinos. Se um material é exposto a raios X de um comprimento de onda específico, as camadas de átomos difratam os raios e produzem um padrão de picos que é característico do mineral. A escala horizontal (ângulo de difração) de um padrão DRX típico fornece o espaçamento do arranjo cristalino, e a escala vertical (altura do pico) fornece a intensidade do raio difratado.

### 3.3.6.3 *Análise térmica diferencial (ATD) e gravimétrica (ATG)*

Análise térmica é um termo que abrange um grupo de técnicas nas quais uma propriedade física ou química de uma substância, ou de seus produtos de reação é monitorada em função do tempo ou temperatura, enquanto a temperatura da amostra (sob uma atmosfera específica) é submetida a uma programação controlada.

O método de análise térmica diferencial consiste na comparação da temperatura da amostra a uma amostra inerte de referência. Esta técnica elimina os efeitos da taxa de aquecimento e outros distúrbios externos que podem alterar a temperatura da amostra e, também, suprime a alta temperatura de ambos os materiais, possibilitando a captação e ampliação de sinais menores.

Ao longo do programa de aquecimento, as temperaturas da amostra e da referência se mantêm iguais até que ocorra uma alteração física ou química na amostra. Se a reação for exotérmica, a amostra irá liberar calor, ficando por um curto período de tempo com uma temperatura maior que a referência. E, se a reação for endotérmica a temperatura da amostra será temporariamente menor que a referência.

A curva ADT é registrada com a temperatura ou o tempo na abscissa e  $\mu\text{V}$  na ordenada. A diferença de temperatura é dada em  $\mu\text{V}$  devido ao uso de termopares em sua medição.

A análise térmica gravimétrica consiste no aquecimento da amostra em velocidade constante em ligação com uma balança de precisão, o que permite o

registro das variações de massa em função da temperatura. É instrumento de pesquisa útil, trabalhando em paralelo com a análise térmica diferencial.

Os ensaios foram realizados no LAMIR/UFPR, realizados com amostras de massa da ordem de 500 mg com aquecimento na taxa de 10°C/minuto até 1000°C, em cadinho de alumina sob uma atmosfera de oxigênio na vazão de 50 ml/min.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados e as discussões da pesquisa. Parte de tabulações acerca dos materiais singulares que compõe os compósitos e, na seqüência, vai para a análise dos mesmos. Também, traz a questão dos compósitos e dos testes neles realizados.

### 4.1 RESÍDUO DE LODO DE PAPEL

A idéia de trabalhar com o resíduo de lodo da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) surgiu de uma parceria com a EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) de Curitiba que nos apresentou uma empresa fabricante de papel higiênico e guardanapo de papel, denominados papel Tissue, situada em Rio Negrinho no estado de Santa Catarina. Esta empresa gera uma grande quantidade deste resíduo que é depositado num aterro sanitário. Porém, este aterro já está no limite de sua capacidade e a empresa gostaria de encontrar um destino para o aproveitamento deste resíduo.

De acordo com a tabela 2, o resultado analítico da amostra de lodo da ETE, enviada ao SENAI em Curitiba para a emissão de um parecer técnico, verifica-se que, embora a análise na amostra bruta indicasse a presença de mercúrio, a caracterização do extrato da lixiviação demonstrou que o mercúrio lixiviado atende aos limites do Anexo F da NBR-10004/04, demonstrando que não confere periculosidade a este resíduo.

No entanto, a caracterização do extrato do ensaio de solubilização desta mesma amostra indicou que as concentrações de fenóis totais, alumínio, bário, ferro e manganês são superiores aos limites definido pelo Anexo G da norma NBR-10004/04 e sendo assim, o resíduo analisado é considerado, Classe II-A (não inerte).

Tabela 2 - Caracterização da amostra bruta, da lixiviação e da solubilização do Lodo da ETE.

PARÂMETRO	AMOSTRA LODO ETE	LIMITES NBR-10004/04
<b>CARACTERIZAÇÃO AMOSTRA BRUTA</b>		
pH em água	8,60	2,0 – 12,5
Umidade a 65°C	0,90%	—
Umidade a 105°C	1,55%	—
Cinzas	55,54%	—
Matéria orgânica	42,92%	—
Carbono total	23,84%	—
Nitrogênio total	0,03%	—
Enxofre total	0,04%	—
Fósforo total	0,23%	—
Fenóis totais	5,35 mg/kg	—
Coliformes totais	5,07x10 <sup>2</sup> NMP/100g (peso seco)	—
Coliformes fecais	40,62 NMP/100g (peso seco)	—
Alumínio	13,30 g/kg	—
Arsênio	<49,94 mg/kg	—
Bário	94,76 g/kg	—
Berílio	<1,00 mg/kg	—
Boro	<499,45 mg/kg	—
Cádmio	<9,99 mg/kg	—
Cálcio	150,04 g/kg	—
Chumbo	10,99 mg/kg	—
Cobalto	<9,99 mg/kg	—
Cobre	49,14 mg/kg	—
Cromo total	7,09 mg/kg	—
Ferro	2,48 g/kg	—
Magnésio	1,76 g/kg	—
Manganês	44,35 mg/kg	—
Mercúrio	0,18 mg/kg	—
Molibdênio	<9,99 mg/kg	—
Níquel	<9,99 mg/kg	—
Potássio	136,79 mg/kg	—
Prata	<4,99 mg/kg	—
Selênio	<49,94 mg/kg	—
Sódio	171,54 mg/kg	—
Zinco	265,22 mg/kg	—
<b>CARACTERIZAÇÃO LIXIVIADO</b>		
Arsênio	<0,0025 mg/L	1,00 mg/L
Bário	2,13 mg/L	70,00 mg/L
Cádmio	<0,10 mg/L	0,50 mg/L
Chumbo	<0,05 mg/L	1,00 mg/L
Cromo total	0,05 mg/L	5,00 mg/L
Mercúrio	<0,001 mg/L	0,10 mg/L
Prata	<0,05 mg/L	5,00 mg/L
Selênio	<0,005 mg/L	1,00 mg/L
<b>CARACTERIZAÇÃO SOLUBILIZADO</b>		
Cloretos	123,76 mg/L	250,00 mg/L
Fenóis totais	0,11 mg/L	0,01 mg/L
Detergente	0,49 mg/L	0,50 mg/L
Nitrato	1,50 mg/L	10,00 mg/L
Sulfato	<0,10 mg/L	250,00 mg/L
Alumínio	7,74 mg/L	0,20 mg/L
Arsênio	<0,0025 mg/L	0,01 mg/L
Bário	0,89 mg/L	0,70 mg/L

Cádmio	<0,0005 mg/L	0,005 mg/L
Chumbo	0,005 mg/L	0,01 mg/L
Cobre	<0,10 mg/L	2,00 mg/L
Cromo total	<0,05 mg/L	0,05 mg/L
Ferro	12,93 mg/L	0,30 mg/L
Manganês	0,26 mg/L	0,10 mg/L
Mercúrio	<0,001 mg/L	0,001 mg/L
Prata	<0,05 mg/L	0,05 mg/L
Selênio	<0,005 mg/L	0,01 mg/L
Sódio	12,95 mg/L	200,00 mg/L
Zinco	0,10 mg/L	5,00 mg/L

**Fonte:** Senai (2009).

Para corroborar com o resultado do parecer técnico enviado pelo SENAI, foram realizados ensaios de caracterização química, conforme tabela 3 e mineralógica, conforme tabela 4, no resíduo de lodo da ETE. Estes ensaios foram desenvolvidos no LAMIR (Laboratório de Análise de Minerais e Rochas) da UFPR (Universidade Federal do Paraná).

Como se pode observar na tabela 3 são apresentados em maiores concentrações o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxido de cálcio (Ca) e o dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>).

Tabela 3 – Resultados do ensaio da fluorescência de raios-x do lodo da ETE.

ÓXIDOS	%
CO <sub>2</sub>	55,40
CaO	25,10
SiO <sub>2</sub>	10,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,60
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,50
MgO	0,40
TiO <sub>2</sub>	0,40
SO <sub>3</sub>	0,20
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,10
K <sub>2</sub> O	0,10

E, o ensaio de Difractometria de raios-x do lodo, tabela 4 apresenta a composição dos minerais presentes na amostra.

Tabela 4 – Resultado do ensaio da difratometria de raios-x do lodo da ETE.

NOME DO COMPOSTO	FÓRMULA QUÍMICA DO MATERIAL
Óxido de Cálcio	CaO
Calcita	Ca (CO <sub>3</sub> )
Caolinita	Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>
Alumínio	Al

Analisando as tabelas 3 e 4, nota-se que o resíduo do lodo da estação de tratamento de efluentes (ETE) é um material com grande quantidade de orgânicos e com alto teor de umidade, em torno de 60%. Possui teor de 55,4 % de CO<sub>2</sub>, Oxido de Cálcio não hidratado (CaO), dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>) e traços de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO.

#### 4.2 RESÍDUO DE CINZA DE MADEIRA

A caracterização química, tabela 5 e mineralógica, tabela 6, do resíduo de cinza de madeira foram realizadas no LAMIR (Laboratório de Análise de Minerais e Rochas) da UFPR (Universidade Federal do Paraná).

Observando os resultados da Fluorescência de raios-x da cinza de madeira, na tabela 5, verifica-se maiores concentrações de dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>), óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

Tabela 5 - Resultado do ensaio de fluorescência de raios-x do resíduo de cinza de madeira.

ÓXIDOS	%
SiO <sub>2</sub>	36,60
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,80
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,60
CaO	15,10
CO <sub>2</sub>	3,10
K <sub>2</sub> O	2,60
TiO <sub>2</sub>	2,30
MgO	1,70
Na <sub>2</sub> O	1,50
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,90
MnO	0,60
SO <sub>3</sub>	0,40
BaO	0,30
Cl	0,10
ZrO <sub>2</sub>	0,10
SrO	0,10

E, o ensaio de Difractometria de raios-x da cinza de madeira, tabela 6, apresenta a composição dos minerais presentes na amostra.

Tabela 6 - Resultado do ensaio de difratometria de raios-x do resíduo de cinza de madeira.

NOME DO COMPOSTO	FÓRMULA QUÍMICA DO MATERIAL
Óxido de Ferro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Quartzo	SiO <sub>2</sub>
Óxido de Alumínio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Silício de Cálcio	Ca <sub>2</sub> Si
Silicato de Cálcio	Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub>
Silicato de Hidróxido de Cálcio	Ca <sub>6</sub> Si <sub>6</sub> O <sub>17</sub> (OH) <sub>2</sub>

Proveniente dos processos de queima de caldeiras é um material inorgânico e poroso que ajuda a absorver a umidade encontrada no resíduo de lodo de papel. O Paraná gera aproximadamente 500 m<sup>3</sup>/dia destas cinzas durante o ano todo.

Seu teor de CO<sub>2</sub> é de 3,1% e é composto de óxidos de cálcio (CaO), de silício (SiO<sub>2</sub>), de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

#### 4.3 RESÍDUO DA PRODUÇÃO DA CAL

A caracterização química, tabela 7 e mineralógica, tabela 8, do resíduo da produção da cal foram realizadas no LAMIR (Laboratório de Análise de Minerais e Rochas) da UFPR (Universidade Federal do Paraná).

Observando os resultados da Fluorescência de raios-x, na tabela 7, verifica-se maiores concentrações de óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio (MgO) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

Tabela 7 - Resultado do ensaio de fluorescência de raios-x da cal residual.

ÓXIDOS	%
CaO	52,60
MgO	27,00
CO <sub>2</sub>	17,30
SiO <sub>2</sub>	2,10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,20
K <sub>2</sub> O	0,10
MgO	0,10

O ensaio de Difractometria de raios-x do resíduo de produção da cal, tabela 8, apresenta a composição dos minerais presentes na amostra.

Tabela 8 - Resultado do ensaio de difratometria de raios-x da cal residual.

NOME DO COMPOSTO	FÓRMULA QUÍMICA DO MATERIAL
Óxido de Cálcio	CaO
Portlandita	Ca (OH) <sub>2</sub>
Óxido de Silicato de Cálcio	Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub>
Calcita	Ca (CO <sub>3</sub> )
Quartzo	SiO <sub>2</sub>

O resíduo da produção da cal apresentou um teor de 17,3 % de CO<sub>2</sub>, caracterizando-se como sendo de baixa reatividade. Sua produção é de aproximadamente 10 ton/mês durante todo o ano. Por se tratar de um material ligante, trabalha melhor com material inorgânico (cinza de madeira).

Conforme tabela 7, a cal residual aqui empregada é constituída de óxido de cálcio não hidratado (CaO), óxido de magnésio não hidratado (MgO) e traços de óxidos Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

#### 4.4 RESULTADOS E ANÁLISES DOS COMPÓSITOS PROPOSTOS

Na seqüência, são apresentadas as características e propriedades mecânicas, físicas e químicas dos compósitos formulados.

##### 4.4.1 Resistência mecânica à compressão

Foram submetidos a ensaios de resistência mecânica à compressão cinco corpos de prova de cada composição em cada idade avaliada. Na tabela 9, pode-se verificar a média e o desvio padrão de cada compósito nas idades de 1, 3, 7, 14, 28, 60, 90, 180 e 365 dias, de cada compósito desenvolvido, com diferentes proporções de lodo de papel, cinza de madeira e cal.

Tabela 9 - Resultados de resistência aos ensaios de compressão, por idades, dos compósitos desenvolvidos.

Composições	Parâmetros Estatísticos	Resistência (MPa) x Idade (dias)								
		1	3	7	14	28	60	90	180	365
1	Média	4,23	7,09	<b>11,34</b>	13,39	8,05	9,95	10,75	11,95	10,41
	Desvio Padrão	0,32	1,08	1,16	0,85	0,60	1,43	0,42	0,70	0,99
2	Média	<b>4,84</b>	5,82	9,80	14,05	11,35	12,11	11,71	11,84	9,79
	Desvio Padrão	0,35	0,38	0,37	1,00	1,81	0,40	0,90	1,92	0,68
3	Média	4,71	7,02	10,44	<b>14,29</b>	11,63	14,50	12,26	11,06	10,32
	Desvio Padrão	0,32	1,39	1,85	0,93	1,24	1,39	3,00	2,27	0,82
4	Média	3,52	5,16	8,00	10,04	9,68	9,31	10,00	9,16	7,78
	Desvio Padrão	0,48	0,67	0,21	0,78	0,79	0,89	0,73	1,60	1,41
5	Média	3,32	4,77	7,61	10,45	13,25	14,70	15,07	15,91	14,08
	Desvio Padrão	0,18	0,38	0,65	0,23	0,17	0,78	1,25	1,19	0,25
6	Média	4,25	6,26	8,56	12,44	<b>15,74</b>	<b>17,70</b>	<b>19,81</b>	<b>18,59</b>	16,97
	Desvio Padrão	0,41	0,68	0,76	0,68	1,57	1,30	0,92	1,46	0,98
7	Média	3,25	5,21	8,83	9,87	12,43	13,06	14,98	16,61	<b>17,66</b>
	Desvio Padrão	0,27	1,01	0,70	1,38	0,37	0,37	1,09	0,94	1,40
8	Média	3,86	<b>7,60</b>	11,30	12,83	11,91	12,66	12,88	12,69	13,29
	Desvio Padrão	0,49	0,86	1,08	0,68	0,76	1,17	0,62	1,43	0,91
9	Média	2,59	7,44	10,10	11,63	9,25	9,93	12,00	13,35	12,82
	Desvio Padrão	0,31	0,55	0,73	0,79	0,41	0,79	1,23	0,88	1,45

Para uma melhor visualização e comparação, os resultados da tabela 9 foram colocados no gráfico 1.

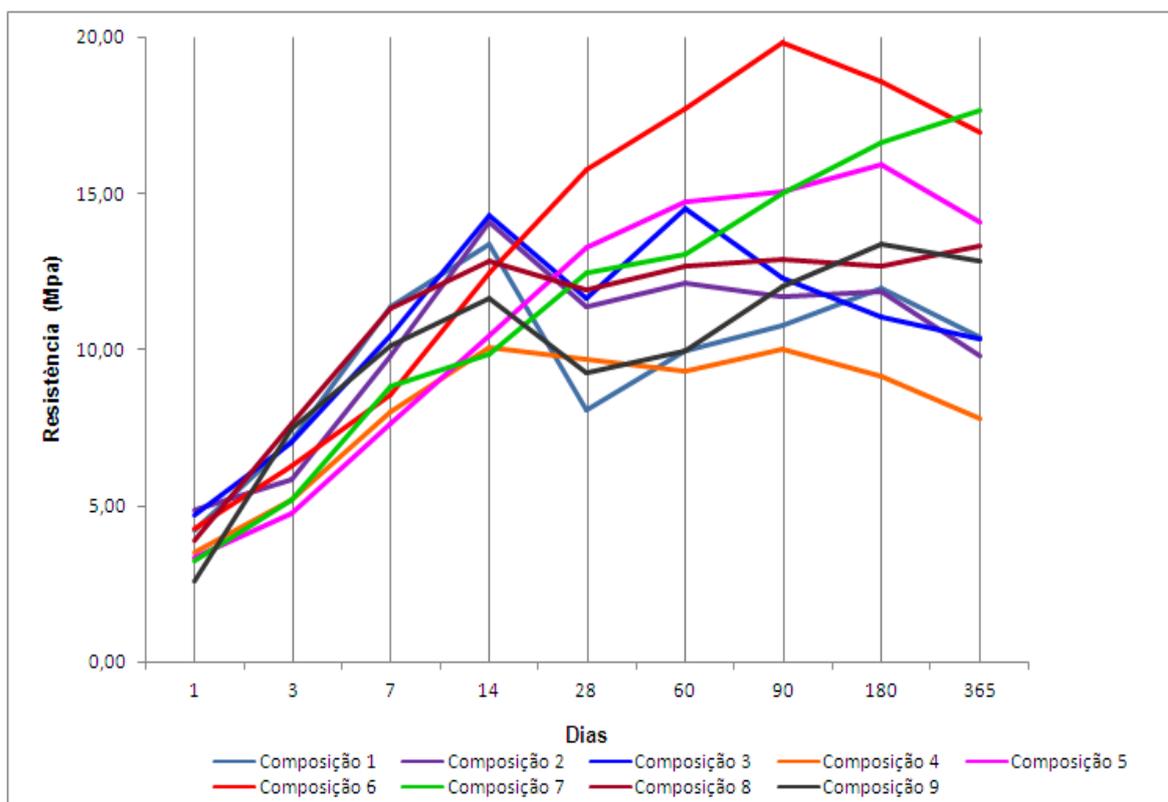


Gráfico 1 - Curvas dos resultados de resistência aos ensaios de compressão, por idades, dos compósitos desenvolvidos.

Analisando a tabela 9 e o gráfico 1, para os corpos de prova das composições 1, 2, 3 e 4 (com maiores proporções de lodo de papel e menor quantidade de cal), verifica-se que a resistência cresce até 14 dias e depois começa a cair.

Já, nas composições 5, 6, 7, 8 e 9, onde há uma diminuição da porcentagem do lodo de papel e um incremento da proporção da cal, a resistência mecânica atinge picos até a idade de 180 dias. Ressalta-se que o compósito 6, que possui quantidade intermediária de lodo de papel (58%) e cal (12%), possui valores de resistência à compressão com maior linearidade de crescimento.

A utilização das porcentagens de lodo de papel, cinza de madeira e cal do compósito 6, no desenvolvimento do novo produto para a construção civil, o “tijolo de papel”, permite um aproveitamento satisfatório do resíduo de lodo de papel e da cal na sua produção.

Para comparar os resultados de resistência mecânica à compressão, encontrados nos compósitos da pesquisa, denominados de “tijolo de papel”, com

alguma norma vigente para blocos de vedação, foi necessário cortar tijolos de solo-cimento, comercializados no mercado nacional, com o mesmo diâmetro e altura dos moldados para feitos comparativos, ver figura 10.



Figura 10 - Corpos de prova do bloco de vedação desta pesquisa e blocos de vedação de solo-cimento.

Após a moldagem, realizaram-se os ensaios de compressão com os corpos de prova de solo-cimento da mesma forma como realizado nos nove compósitos desta pesquisa. Estes valores podem ser visualizados na tabela 10.

Tabela 10- Resultados de resistência aos ensaios de compressão do bloco de solo-cimento.

Corpos de Prova	Resistência (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão
1	1,80	1,68	0,20
2	1,94		
3	1,56		
4	1,69		
5	1,43		

Comparando os resultados de resistência encontrados nos “tijolos de papel” com os de solo-cimento e com a norma brasileira NBR-10834 (ABNT, 1994), que estabelece um valor mínimo de 2,0 MPa para blocos de vedação de solo-cimento, verifica-se que os todos os compósito desenvolvidos possuem valores acima dos recomendados, conforme tabela 9 em um dia de cura.

Também foram realizados ensaios de resistência mecânica à compressão, nos nove compósitos com 28 dias de idade, com as amostras secas a temperatura ambiente, e úmida, imersa em água durante 24 horas.

Na tabela 11 verifica-se que a resistência dos compósitos cai em média 40% quando submetidos à umidade. Porém, mesmo com esta queda abrupta da resistência dos compósitos úmidos os mesmos ainda possuem valores superiores aos recomendados pela norma brasileira NBR-10834 (ABNT, 1994) que estabelece um valor mínimo de 2,0 MPa para blocos de vedação de solo-cimento.

Tabela 11- Resultados de resistência aos ensaios de compressão, na idade de 28 dias, com as amostras secas e úmidas, dos compósitos desenvolvidos.

Composições	Parâmetros Estatísticos	Resistência (MPa)		Perda de Resistência (%)
		28 dias seco	28 dias úmido	
1	Média	8,05	3,26	40,50
	Desvio Padrão	0,60	0,51	
2	Média	11,35	4,24	37,36
	Desvio Padrão	1,81	0,33	
3	Média	11,63	5,08	43,68
	Desvio Padrão	1,24	0,58	
4	Média	9,68	3,60	37,19
	Desvio Padrão	0,79	0,43	
5	Média	13,25	5,38	40,60
	Desvio Padrão	0,17	0,20	
6	Média	15,74	6,72	42,69
	Desvio Padrão	1,57	0,17	
7	Média	12,43	5,82	46,82
	Desvio Padrão	0,37	0,45	
8	Média	11,91	4,78	40,13
	Desvio Padrão	0,76	0,28	
9	Média	9,25	5,05	54,59
	Desvio Padrão	0,41	0,38	

#### 4.4.2 Absorção de água

Conforme descrito no método, foram realizados ensaios de absorção de água nos compósitos 3, 6 e 9. Estes ensaios foram realizados conforme a NBR 10836 (ABNT, 1994), e assim comparados com a NBR 10834 (ABNT, 1994). Esta recomenda que a média dos valores de absorção de água seja igual ou menor que

20% e os valores individuais sejam iguais ou menores que 22%, na idade de 28 dias de cura.

Tabela 12- Resultados do ensaio de absorção de água dos compósitos 3, 6 e 9, na idade de 28 dias.

		Idade de 28 dias			
Composições	Corpos de prova	Peso seco (g) após 24 h de secagem em estufa a 105±5°C	Peso úmido (g) após 24 h de secagem em estufa a 105±5°C	Valores individuais de absorção de água (%)	Valor médio de absorção de água (%)
3	1	14,94	17,43	16,66%	15,23%
	2	14,88	17,03	14,45%	
	3	14,82	16,98	14,57%	
6	1	16,41	19,51	18,89%	18,75%
	2	16,31	19,43	19,13%	
	3	16,12	19,06	18,24%	
9	1	19,84	24,46	23,29%	23,06%
	2	19,63	23,91	21,80%	
	3	19,67	24,41	24,10%	

Na tabela 12, verifica-se que nas composições 3 e 6 os valores encontrados, tanto individuais como a média, seguem a recomendação da norma brasileira. Entretanto, o compósito 9, com maior proporção de cal (20%) e menor de lodo da ETE (40%), não atende os valores recomendados.

#### 4.4.3 Granulometria

Os ensaios de granulometria foram realizados no LAMIR da UFPR, para os resíduos utilizados e, também, nos compósitos 3, 6 e 9 desenvolvidos.

Nos ensaios de granulometria a laser foram analisados 100 gramas de material, já nos ensaios por peneiramento foram 200 gramas.

Para comparar o resíduo da produção da cal utilizado nesta pesquisa, realizou-se o ensaio de granulometria também numa amostra da cal virgem, para poder analisar a diferença entre os materiais. Neste caso o ensaio de granulometria foi realizado num granulômetro a laser por se tratar de amostras muito finas.

Analisando os quadros 1 e 2 que apresentam os resultados de granulometria da cal residual e da cal virgem, verifica-se que o diâmetro médio das partículas da cal residual é de 52,71 micrômetros enquanto a da cal virgem é de 39,57 micrômetros, ou seja, o diâmetro dos grãos da cal residual utilizada nesta pesquisa são maiores que o diâmetro dos grãos da cal virgem.

Cliente:	Andressa Ferreira		Peneiramento	Laser		
Material:	Cal		Equipamento	Granulômetro CILAS 1064		
Nº Lamir	118/09 C		Tempo de Ultrasom	60 segundos		
Nome da Amostra	Cal		Técnica	Elisiane R. Pescini		
Massa Inicial (g)	100,00		Data:	17/6/09		
MALHAS (TYLER)	ABERTURA (mm)	PORCENTAGEM RETIDA (%)	% EQUIVALENTE	% ACUMULADA ACIMA	% ACUMULADA ABAIXO	
35	0,425	0,00	-	-	100,00	
42	0,355	0,00	-	-	100,00	
48	0,280	0,00	-	-	100,00	
80	0,180	0,00	-	-	100,00	
100	0,150	0,00	-	-	100,00	
170	0,090	19,87	19,87	19,87	80,13	
200	0,075	10,17	10,17	30,04	69,96	
250	0,063	9,66	9,66	39,70	60,30	
270	0,053	8,20	8,20	47,90	52,10	
325	0,043	7,13	7,13	55,03	44,97	
400	0,036	4,97	4,97	60,00	40,00	
500	0,028	5,27	5,27	65,27	34,73	
635	0,020	5,50	5,50	70,77	29,23	
	0,010	6,55	6,55	77,32	22,68	
	0,006	4,52	4,52	81,84	18,16	
	0,003	7,44	7,44	89,28	10,72	
	0,001	5,77	5,77	95,05	4,95	
menor 0,001	0,000	4,95	4,95	100,00	0,00	
MASSA FINAL (g):		100,00	Micrômetros			
			Diâmetro 10%	2,77	Diâmetro 90%	109,71
			Diâmetro 50%	49,68	Diâmetro médio	52,71

Quadro 1 - Resultado da distribuição granulométrica da cal residual.

Cliente:	Andressa Ferreira		Peneiramento	Laser		
Material:	Cal virgem		Equipamento	Granulômetro CILAS 1064		
Nº Lamir	118/09 G		Tempo de Ultrasom	0 segundos		
Nome da Amostra	Cal virgem		Técnica	Elisiane R. Pescini		
Massa Inicial (g)	100,00		Data:	2/6/09		
MALHAS (TYLER)	ABERTURA (mm)	PORCENTAGEM RETIDA (%)	% EQUIVALENTE	% ACUMULADA ACIMA	% ACUMULADA ABAIXO	
35	0,425	0,00	-	-	100,00	
42	0,355	0,00	-	-	100,00	
48	0,280	0,00	-	-	100,00	
80	0,180	0,36	0,36	0,36	99,64	
100	0,150	0,91	0,91	1,27	98,73	
170	0,090	7,86	7,86	9,13	90,87	
200	0,075	5,37	5,37	14,50	85,50	
250	0,063	6,42	6,42	20,92	79,08	
270	0,053	7,05	7,05	27,97	72,03	
325	0,043	8,42	8,42	36,39	63,61	
400	0,036	6,74	6,74	43,13	56,87	
500	0,028	8,98	8,98	52,11	47,89	
635	0,020	11,33	11,33	63,44	36,56	
	0,010	17,47	17,47	80,91	19,09	
	0,006	7,23	7,23	88,14	11,86	
	0,003	4,53	4,53	92,67	7,33	
	0,001	2,34	2,34	95,01	4,99	
menor 0,001	0,000	4,99	4,99	100,00	0,00	
<b>MASSA FINAL (g):</b>		<b>100,00</b>	Micrômetros			
			Diâmetro 10%	4,9	Diâmetro 90%	87,12
			Diâmetro 50%	29,74	Diâmetro médio	39,57

Quadro 2 - Resultado da distribuição granulométrica da cal virgem.

Já a granulometria no resíduo da cinza de madeira e nos compósitos foi feita por ensaios de granulometria por peneiramento. E, para o resíduo de lodo de papel não foi possível realizar este ensaio, pois o mesmo é muito úmido para ensaios de granulometria por peneiramento e no método a laser causava o entupimento do granulômetro.

A tabela 13 apresenta os resultados da granulometria do resíduo da cinza de madeira.

Tabela 13- Resultado da distribuição granulométrica da cinza de madeira.

ABERTURA (mm)	MASSA RETIDA (g)	% PESO
2,360	17,23	8,62
1,180	27,63	13,82
0,355	70,26	35,13
0,180	38,87	19,44
0,090	18,29	9,14
0,063	4,59	2,29
0,044	4,24	2,12
passante	18,89	9,45

Analisando a tabela 13 pode-se verificar que a 68,39% da amostra possui granulometria variando entre 1,180 e 0,180 mm sendo destes, 35,13% com granulometria de 0,355 mm.

As tabelas 14, 15, e 16 e os gráficos 2, 3 e 4 apresentam os resultados de granulometria para os compósitos 3 (Lodo (L) = 65%, Cinza (C) = 25% e Cal (Ca) = 10%); compósito 6 (Lodo (L) = 58%, Cinza (C) = 30% e Cal (Ca) = 12%) e compósito 9 (Lodo (L) = 40%, Cinza (C) = 40% e Cal (Ca) = 20%).

Tabela 14 - Resultado da distribuição granulométrica do compósito 3 (L=65%, C=25%, Ca=10%).

ABERTURA (mm)	MASSA RETIDA (g)	% PESO
2,360	67,53	33,77
1,180	51,43	25,72
0,355	24,23	12,12
0,180	2,86	1,43
0,090	1,21	0,6
0,063	0,34	0,17
0,044	0,54	0,27
passante	51,86	25,93

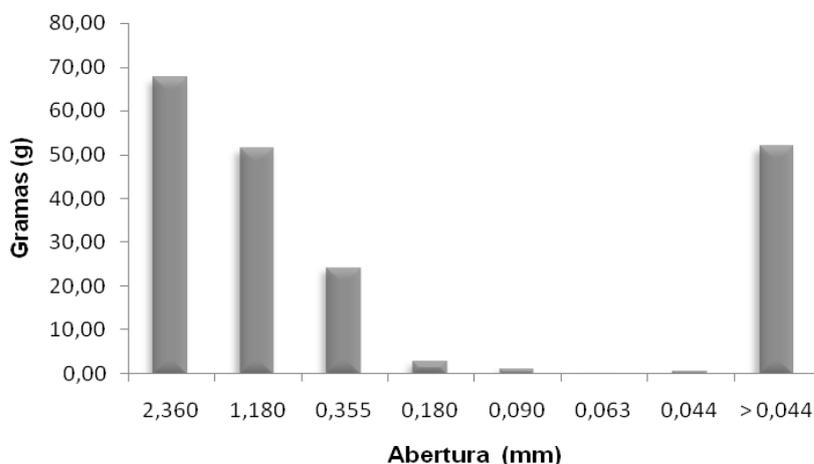


Gráfico 2 - Resultado da distribuição granulométrica do compósito 3 (L=65%, C=25%, Ca=10%).

Tabela 15 - Resultado da distribuição granulométrica do compósito 6 (L=58%, C=30%, Ca=12%).

ABERTURA (mm)	MASSA RETIDA (g)	% PESO
2,360	9,15	4,58
1,180	82,16	41,08
0,355	42,90	21,45
0,180	8,44	4,22
0,090	2,10	1,05
0,063	0,48	0,24
0,044	0,38	0,19
passante	54,39	27,20

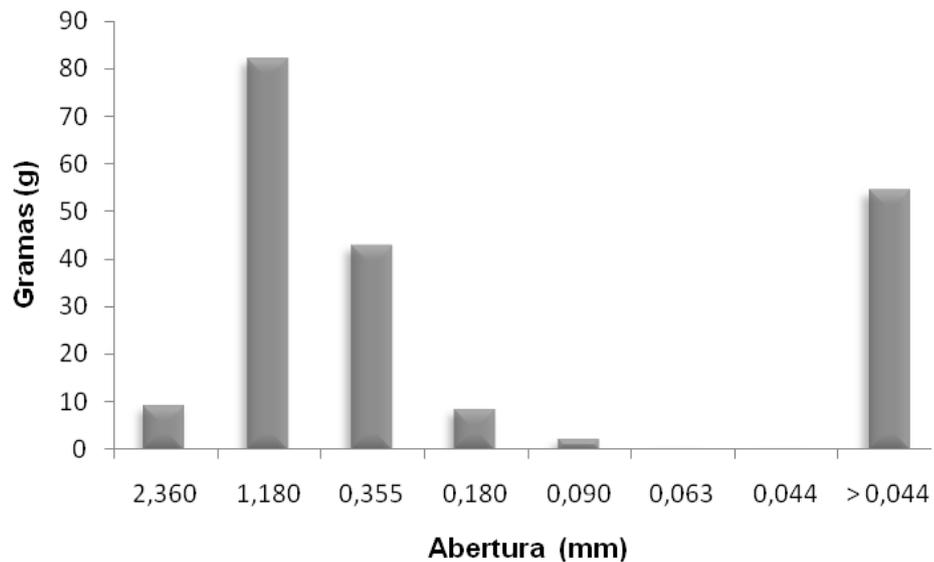


Gráfico 3 - Resultado da distribuição granulométrica do compósito 6 (L=58%, C=30%, Ca=12%).

Tabela 16 - Resultado da distribuição granulométrica do compósito 9 (L=40%, C=40%, Ca=20%).

ABERTURA (mm)	MASSA RETIDA (g)	% PESO
2,360	6,26	3,13
1,180	21,64	10,82
0,355	93,70	46,85
0,180	40,00	20,00
0,090	19,59	9,79
0,063	3,70	1,85
0,044	3,01	1,51
passante	12,10	6,05

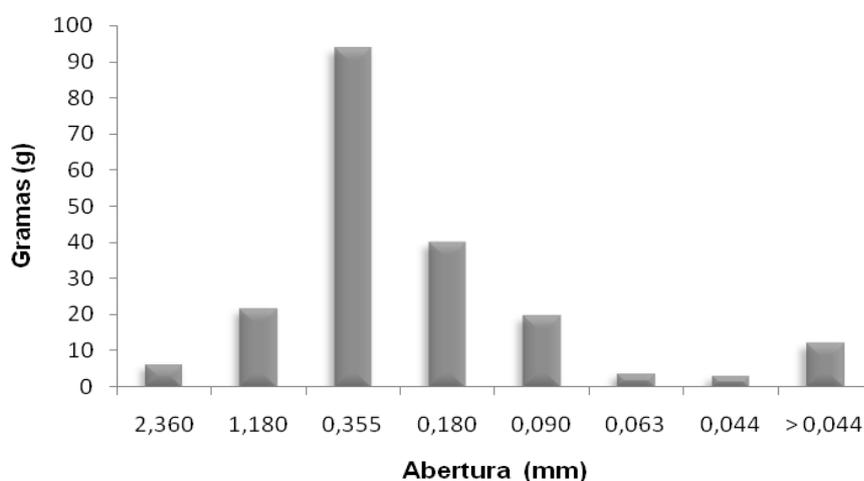


Gráfico 4 - Resultado da distribuição granulométrica do compósito 9 (L=40%, C=40%, Ca=20%).

Comparando os gráficos 2, 3 e 4 e as tabelas 14, 15 e 16, verifica-se que 59,49% dos grãos do compósito 3; que possui na sua composição 65% de lodo de papel, 25% de cinza de madeira e 10% de cal; está entre 2,360 e 1,180 mm (a maior parte, 33,77%, possui granulometria de 2,360 mm e a porcentagem de passante é de 25,93%).

No compósito 6, com 58% de lodo de papel, 30% de cinza de madeira e 12% de cal; 62,53% dos grãos está entre 2,360 e 1,180 mm (a maior parte, 41,08%, possui granulometria de 1,180 mm e a porcentagem de passante é de 27,20%).

Já, no compósito 9; com 40% de lodo de papel, 40% de cinza de madeira e 20% de cal; 66,85% dos grãos está entre 1,180 e 0,355 mm (a maior parte 46,85% possui granulometria de 0,355 mm e a porcentagem de passante é de 6,05%).

Através dos resultados, pode-se concluir que à medida que se aumenta a quantidade da cal e diminui-se a do lodo o diâmetro dos grãos diminui e a porcentagem de passante também é menor.

#### 4.4.4 Comparação da Análise Térmica Diferencial (ATD) e Gravimétrica (ATG) das Amostras

O gráfico 5 e a tabela 17, apresentam os resultados da análise térmica diferencial da composição 9, por conter maior quantidade de cal e tornar mais visível os processos de reconstrução dos componentes mineralógicos, (nas idades de 1, 3, 7, 14, 28, 60, 90 e 180 dias de cura). Analisando os resultados, pode-se verificar que ocorrem visíveis transformações das propriedades mecânicas deste compósito.

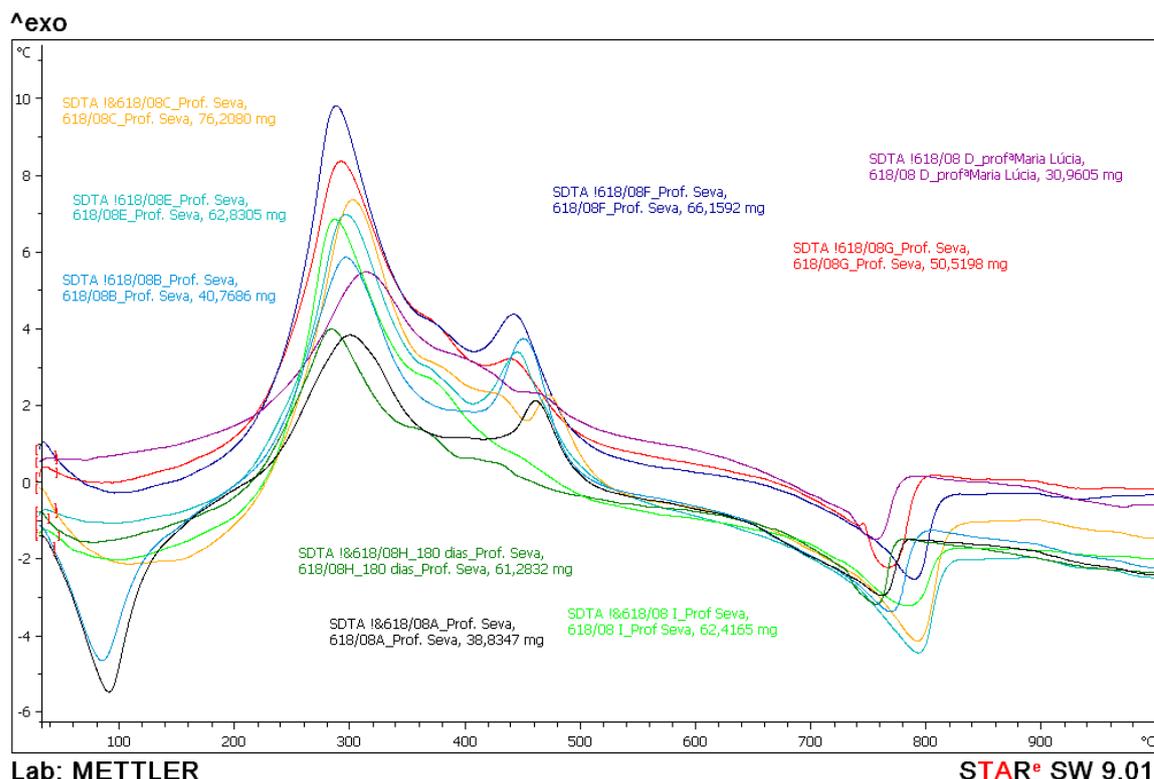


Gráfico 5 - Resultados da análise térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (TG) durante a hidratação e a cura da composição 9.

Tabela 17 - Resultados da análise térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (TG) durante a hidratação e a cura da composição 9.

Idade (dias)	de cura	Endo-efeito (1)		Exo-efeito (2)		Exo-efeito(3)		Endo-efeito (4)		Perda
		Pico	Perda	Pico	Perda	Pico	Perda	Pico	Perda	
		T°C		T°C	de	T°C		T°C		
1	A	84,8	12,2	303,8	2,5+1,1	462,4	0,6	718,7	11,5	27,9
3	B	78,8	9,5	301,8	5,4	453,4	0,8	765,6	11,8	27,5
7	C	104,5	2,0	309,3	5,0	464,2	0,8	787,5	12,6	20,4
14	D	98,8	2,3	319,1	7,3	-	1,0	754,1	13,5	24,1
28	E	92,2	2,2	302,9	6,9	448,0	0,8	788,2	14,8	24,7
60	F	97,5	2,2	285,4	7,2	442,9	2,4	788,3	13,1	24,9
90	G	86,7	2,1	292,2	9,0	441,0	3,0	766,8	13,5	27,7
180	I	76,0	2,1	281,5	8,4	421,5	3,0	756,2	14,9	28,4

Notas:

Endo-efeito (76-104°) – evaporação de água de poros;

Exo-efeito (281-319) – queima de papel;

Exo-efeitos (421-462) – queima de celulose;

Endo-efeito (718-788°) – desintegração de estruturas de carbonatos (calcita, dolomita, entre outros.)

No primeiro dia de cura, o pico endotérmico encontra-se na temperatura de 84,8° C (com perda de 12,2% de peso do corpo de prova). No 3° o pico tem a mesma configuração, porém seu extremo muda para a posição de até 78,8°C com perda de peso em 9,5%. Isso significa uma diminuição do teor de água livre em razão de evaporação parcial.

Já, como pode ser visualizado no gráfico 5, no 7° dia e nas idades seguintes de cura dos corpos de prova, as curvas mudam sua configuração e passam a apresentar temperaturas maiores, com picos no extremo de 104,5°C. Estas mudanças podem acontecer pela evaporação parcial da água a temperatura ambiente ou pela transferência de parte da água no nível de maior ligação com partículas sólidas do compósito.

A redistribuição de água praticamente parou no 7° dia, e a curva chegou quase na horizontal. A perda de peso continuou até os 180 dias no nível de 2,0 – 2,3%.

O pico exotérmico apresentou seu extremo na temperatura de 303,8°C, no 1° dia de cura, o que tem origem na oxidação e queima de papel residual de lodo de ETE com perda de peso de 3,6%. Inicialmente bastante achatado e largo, o pico no 7° dia passa a ser mais alto e agudo. Seu extremo muda para a posição na escala de temperaturas instáveis, mas com a tendência comum de diminuição até 281,5°C no 180° dia de cura.

Provavelmente, este fato pode ser explicado pela diminuição total de água nos corpos de prova e pela diminuição da temperatura de combustão espontânea do papel. Também, há uma evolução da perda de peso de 3,6 até 8,4% com aumento de idade dos corpos de prova.

Outro pico exotérmico, no primeiro dia de cura, é de 462,4°C. Aí ocorre pela oxidação e combustão espontâneas de celulose do Lodo da ETE. O extremo deste pico também flutua gradualmente, quase sem saltos, à temperatura de até 421,5°C. Isto ocorre pela diminuição da energia térmica para início de combustão espontânea com diminuição de umidade do material. A perda de peso inicial é de 0,6% com crescimento no 180° dia de até 3,0%.

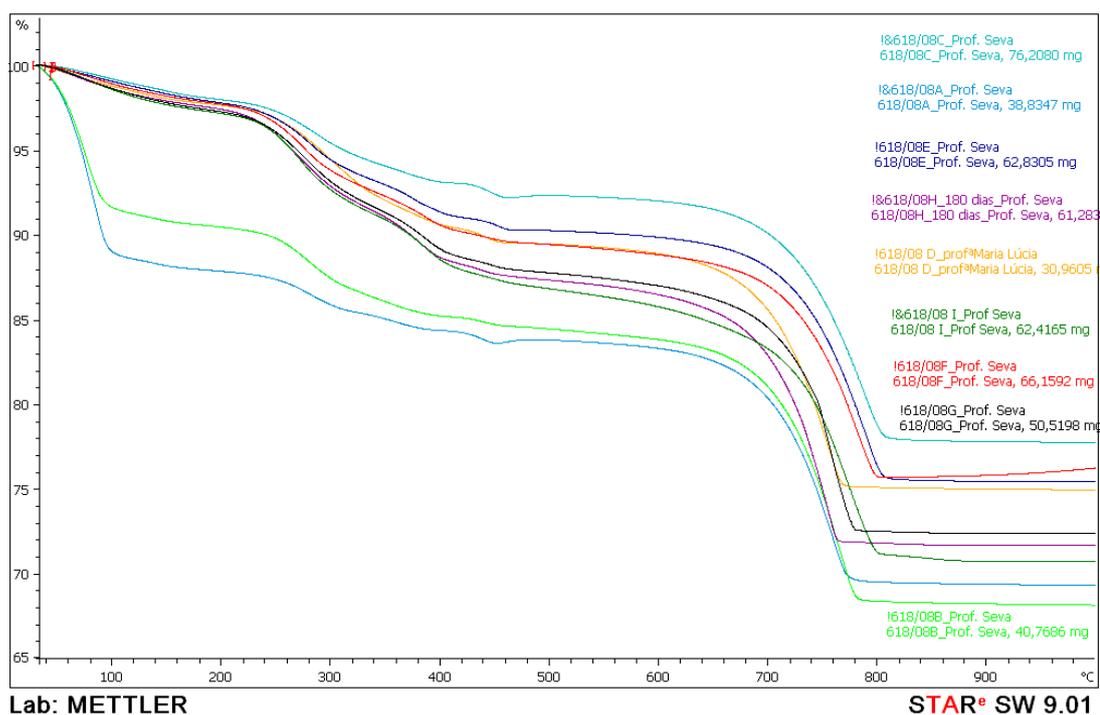


Gráfico 6 - Curvas de TG da composição 9 nas idades de 1, 3, 7, 14, 28, 60, 90 e 180 dias de cura.

O gráfico 6 apresenta as curvas da análise térmica gravimétrica do compósito 9 para as idades de 1, 3, 7, 14, 28, 60, 90 e 180 dias. Estas curvas possuem uma forte inclinação para o lado direito com temperaturas variando entre 500°C até 700°C com significativa perda de peso.

Segundo Mymrine (1974, 1976 e 1978) nesta área das curvas estão localizados os efeitos térmicos de produtos de corrosão alcalino de artigos sólidos de componentes iniciais em formas de carbonatos amorfos como novas formações responsáveis por crescimento de valores de propriedades mecânicas de materiais.

O último pico endotérmico na curva de TG tem extremo na temperatura de 718,7° C no 1° dia de cura e pertence ao processo de liberação de CO<sub>2</sub> com destruição de carbonatos cristalinos durante a queima dos corpos de prova.

Este pico também deriva do crescimento das idades dos corpos de prova, a temperatura cresce até 788,3°C no 60° dia. Esta mudança ocorre pelos processos de aperfeiçoamento das estruturas cristalóquímicas de carbonatos durante o crescimento total deles. Mas a diminuição de posição de extremo de pico para 766,8°C no 90° dia e até 756,2°C no 180° dia pode ser apenas por razão de reconstrução temporária de células cristalinas de carbonatos.

A perda total de peso diminui para 718,7°C, no 1° dia, e em até 20,4% no 7° dia (por razão de evaporação de água). No 14° dia, permanece fixo e aumenta para 28,43% no 180° dia (por causa da parada de perda de peso de evaporação e síntese de carbonatos amorfos e cristalinos).

Através nas análises térmicas, pode-se concluir que durante a hidratação, e cura dos materiais, acontece a redistribuição de água dos componentes úmidos iniciais e água de hidratação das misturas, ou seja, a corrosão alcalina de partículas de componentes sólidos com síntese de novos materiais (principalmente carbonatos amorfos e cristalinos), responsáveis pelo crescimento de valores de propriedades mecânicas dos materiais.

## 5 CONCLUSÃO

Ao final da pesquisa, seus objetivos específicos e geral foram cumpridos.

Após análises físico-químicas e mecânicas nos compósitos, notou-se que os resultados encontrados permitem a substituição de materiais naturais, como matérias-primas de produção de tijolos, por lodo de produção de papel, cinza de madeira e resíduo da cal. Isso diminui riscos ambientais pela disposição destes resíduos em aterros.

Quanto ao comportamento da mistura destes resíduos, verificou-se que a incorporação do lodo de papel, cinza de madeira e cal é apropriado para o uso na construção civil. A geração dos compósitos desenvolvidos para a avaliação de suas corretas incorporações foi adequada, e cumpriu com suas expectativas permitindo assim uma afirmação para o reaproveitamento destes materiais.

Através da avaliação dos compósitos desenvolvidos verificou-se que as propriedades mecânicas e físico-químicas dos mesmos proporcionam viabilidade no uso destes resíduos para o desenvolvimento de um novo produto a ser utilizado na construção civil.

A utilização dos “tijolos de papel”, feitos a partir dos resíduos de lodo de papel, cinza de madeira e cal, além de evitar o processo de queima utilizado nos tijolos cerâmicos e minimizar os impactos ambientais através da redução da extração de recursos naturais, como nos blocos de solo-cimento. Também contribui para aumentar a vida útil dos aterros existentes, disponibilizando estes apenas para o descarte de resíduos sem condições de reciclagem.

Além, da implantação de uma nova matriz econômica do processo de produção de materiais de construção, feitas com matéria-prima de resíduos industriais, geração de novos empregos nas novas fábricas de produção e, formação de recursos humanos especializados na utilização de resíduos industriais para a fabricação destes materiais.

Realizada a pesquisa, foram propostos nove compósitos, sendo que o que apresentou maior linearidade em seu comportamento físico-químico e mecânico foi o compósito de número 6. Este é composto de 58% de lodo de papel, 30% de cinza de madeira e 12% de resíduos da produção de cal em peso.

Como sugestão para trabalhos futuros, pesquisar diferentes aplicabilidades destes compósitos na construção civil, como o desenvolvimento de materiais para o forro, o piso e divisórias internas.

## REFERÊNCIAS

AMBALAVANAN, R.; ROJA, A. Feasibility studies on utilization of waste lime and gypsum with flyash. **Indian Concrete Journal**, v 70, n 11, Nov, p 611-615, 1996.

ANDRADE, A. C. F. **Tijolos de cinza volante e cal** – estudo de desempenho quanto à resistência, absorção, durabilidade e aderência. 1991. 157p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

ÂNGULO, S.C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. São Paulo, 2000. 155p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: concreto – ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10836**: bloco vazado de solo cimento sem função estrutural, determinação da resistência à compressão, Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10834**: bloco vazado de solo cimento sem função estrutural, Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova, Rio de Janeiro, 2003.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica, Rio de Janeiro, 2005.

BALBINOT JUNIOR, A. A; TORRES, A. N. L; FONSECA, J. A. da; TEIXEIRA, J. R; NESI, C. N. Alteração em características químicas de um solo ácido pela aplicação de calcário e resíduo de reciclagem de papel. **Revista de Ciência Agroveterinárias**, Lages, v.5, n.1, p.16-25, 2006.

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

BELLOTE, A. F.J; SILVA, H.D; FERREIRA, C.A; ANDRADE, G.C. Utilização de resíduo da produção de celulose. **REMADE**, Curitiba, v.77, nov. 2003. Disponível em: [WWW.remade.com.br/revista/capa.php?edicao=77](http://WWW.remade.com.br/revista/capa.php?edicao=77). Acesso em 3 de abril de 2008.

BHATTY, J. I.; GAJDA, J. Alternative materials. **World Cement**, v 35, n 12, p 41-48, Dec. 2004.

BUTTER, P. L. **Desenvolvimento de um modelo de gerenciamento compartilhado dos resíduos sólidos industriais no sistema de gestão ambiental da empresa**. 2003. 100p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

CALLISTER Jr, W. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução**, 5ª. São Paulo: Ed. Editora LTC, 2002.

CHIES, F.; ZWONOK, O.; SILVA, N. I. W.; CALARGE, L. M. **Desenvolvimento de blocos e tijolos a partir de cinzas de fundo e cal hidratada: Projeto CIPECAL**. Relatório Final. Porto Alegre, CIENTEC, jun.1999. 199 p.

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

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução Nº313, de 29 de outubro de 2002**. Dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais. Brasília: Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 22 de novembro de 2002.

CORAZZA, R. I. **Inovações tecnológicas e demandas ambientais: notas sobre o caso da indústria brasileira de papel e celulose**. 1996. 151p. Dissertação (Mestrado em Política Científica e Tecnológica) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.

COSTA, E. R. O. **Alterações químicas no solo e na água de percolação após aplicação de resíduos de fábrica de papel reciclado em Pinus Taeda L**. 2007. 138 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

CYBIS, W.; BETIOL, A. H.; FAUST, R. **Ergonomia e usabilidade: conhecimentos, métodos e aplicações**. São Paulo: Novatec, 2007.

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](https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/4735/1/eires_cn_2005.pdf)> Acesso em 11 de maio de 2008.

FAILLACE, S. **Uma leitura da indústria de papel e celulose no Brasil sob a perspectiva da sustentabilidade norte-sul**. Projeto Brasil Sustentável e Democrático. Rio de Janeiro, 1996.

FREIRE, R. S; PELEGRINI, R; KUBOTA, L. T; DURÁN, N. Novas tendências para o tratamento de resíduos industriais contendo espécies organocloradas. **Revista Química Nova**. Campinas, 2000.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal - Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**. 2ª. Ed. – São Paulo: Pini, 2002.

GUIMARÃES, J. E. P. Dimensões do Universo da Cal. In: V Reunião Aberta da Indústria da Cal – o uso da cal na Engenharia Civil, 1985, São Paulo. Anais... São Paulo: Departamento de Engenharia de Construção Civil, 1985.174 p. p1-13.

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](http://www.wrap.org.uk/document.rm?id=393)>. Acesso em 10 de maio de 2008.

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

JEFFERSON, P. C. **Desenvolvimento de um novo material a partir da composição dos resíduos da mineração de varvito e da produção de cal** . 2007. 94p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

JOINT 2002. CSCE/ASCE - **INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL ENGINEERING** - An International Perspective on Environmental Engineering, Jul 21-24 2002, Niagara Falls. Canadian Society for Civil Engineering, 2002. p 675-687.

KINDLEIN JÚNIOR, W; PLATCHECK, E. R; CÂNDIDO, L. H. A. Analogia entre as metodologias de desenvolvimento de produtos atuais, com a proposta de uma metodologia com ênfase no Ecodesign. In: II **Congresso internacional de Pesquisa em Design**, 2003. Rio de Janeiro, 2003.

KUMAR, S. A perspective study on fly ash-lime-gypsum bricks and hollow blocks for low cost housing development. **Construction and Building Materials**, v 16, n 8, p 519-525, Dec. 2002.

LARS, S.; ROLAND, M.; SOUSA, F. de; DAHLMAN. **Effects or 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.

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.

LENZI, J. L. **Influência do uso de cinzas da combustão de carvão mineral em argamassas de revestimento.** 2001. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

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

MAIA, Claudia B. F. Uso de casca de pinus e lodo biológico como substrato para produção de mudas de pinus taeda. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 39, p.81-92, jul./dez. 1999.

MALTZ, R. Ampliação dos conceitos do ambientalista José Antonio Lutzenberger no tratamento de resíduos da Klabin Riocell. In: **Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental**, 5., 2003, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: 2003.

MANZINI, E; VEZZOLI, C. **O desenvolvimento de produtos sustentáveis: os requisitos ambientais dos produtos industriais**. São Paulo: EDUSP, 2002.

MAZZER, C.; CAVALCANTI, O.A. Introdução à gestão de resíduos. **Infarma**. Brasília, v.16, n. 11-12, 2004.

MYMRINE V., PININSKA J. 1978. Hardening process of blast furnace slags on their geoecological utilization. **Stratto da geologia Applicata e Idrogeologia**, v. XIII, pp. 293-298, Bary, Italy.

MYMRINE V.A. 1976. Use of industrial wastes for improvement of soils in different types of construction. **International Geological Congress in Australia**, 25 session, pp. 381-385, Nauka, Moscow.

MYMRINE V.A., WORONKEVITCH S.D., 1974. The effect of carbonate slime content of construction properties of thermal power stations ashes. **Proceedings of second International Congress of International Association of Engineering Geology**, v. 1, pp. 315-319, San-Paulo, Brazil.

MOO-YOUNG, H. K; ZIMMIE, T. F. Geotechnical properties of paper mill sludges for use in landfill cover. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1996.

NAIK, T. R; KRAUS, R. N. **Development of concrete utilizing paper mill residual solids**. Center for by-products utilization, University of Wisconsin-Milwaukee, 15p., novembro de 1998.

NAUMOFF, A. F.; PERES, Clarita Schwartz. **Reciclagem de matéria orgânica**. In: D'ALMEIDA, Maria L. O.; VILHENA, André. Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado. São Paulo: IPT/CEMPRE, 2000.

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/CNPF, 1997, p. 117-120.

NOLASCO, A. M; GUERRINI, I. A; BENEDETTI, V. **Uso de resíduos urbanos e industriais como fonte de nutrientes e condicionadores de solos florestais**.

Aspectos nutricionais de plantio de Pinus. In: GONÇALVEZ, J. L. M; BENEDETTI, V. Nutrição e fertilização florestal. Piracicaba: IPEF, 2005. P.386-414.

O VALE PARAIBANO, Acidente Ambiental: Cetesb multa a VCP após aterro romper em Jacareí. **O Vale Paraibano**, São José dos Campos, São Paulo, 13 set. 2005. Região Jacareí. Disponível em: [HTTP://jornal.valeparaibano.com.br/2005/09/13/](http://jornal.valeparaibano.com.br/2005/09/13/). Acesso em 15 de abril de 2008.

PAIVA, S. N. **Compósito cimento-lodo de ETE de indústria de papel para aplicação na construção civil**. 2007. 110p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2007.

PEREIRA, J. A. **Geração de resíduos industriais e controle ambiental**. Universidade Federal do Pará. Belém: UFPa, 2002.

PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de Construção**. 2ª. edição. Rio de Janeiro: Editora Globo, 1976.

REBELO, A. M. A.; GUIMARÃES, S. B.; NETO, J. M. R. A Exploração Mineral e o Desenvolvimento Paranaense: O Setor de Calcário na Região Metropolitana de Curitiba. **Boletim Paranaense de Geociências**, n. 53, p. 13-26, 2003. Editora UFPR.

REZENDE, A. A. P; MATOS, A. T; SILVA, C. M. **Utilização do efluente de indústria de celulose e papel em irrigação – uma revisão**. Viçosa, Minas gerais: ABTCP-TAPPI, 2000.

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.

SINGH, M.; GARG, M.; SOMANI, K.K. Experimental investigations in developing low cost masonry cement from industrial wastes. **Indian Concrete Journal**, v 80, n 3, p 31-36, March, 2006.

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, R. P; BARROS, M. M. S. B; PILEGGI, R. G; JONH, 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**, 2005, Florianópolis. Anais...Florianópolis: ANTAC, 2005. p.106-120.

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.

STROEVEN, P.; VU, D.D.; BUI, D.D.; DONG, A.V. Research on cementitious materials to promote sustainable developments in Vietnam. In: INTERNATIONAL

CONFERENCE ON CONCRETE AND DEVELOPMENT, 1, Tehran, 2001. **Proceedings**. [s.l.] : Building and Housing Research Center, 2001.

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/paper/GT/GT17/gt17\\_tanize\\_costa.pdf](http://www.anppas.org.br/encontro/segundo/paper/GT/GT17/gt17_tanize_costa.pdf) 2004. Acesso em: 2 de abril de 2008.

TEIXEIRA, P. F. **Investigações sobre as características geotécnicas de um resíduo de papel.** 2002. 106p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

THOMAS, C. O; THOMAS, R. C; HOVER, K. C. Wastepaper fibres 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. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Zootecnia e Ciências de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2006.

VEZZOLI, Carlo. **System Design for Sustainability: Theory, methods and tools for a sustainable “satisfaction-system” design.** Milano: Maggioli Editore, 2007.

WOLFF, E. A substituição da argila por lodo de ETA na produção da cerâmica vermelha. **Anais do 51º. Congresso Brasileiro de cerâmica.** Bahia, Salvador, 2007.