UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ZOOTECNIA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS

CELSO YOJI KAWABATA

**Aproveitamento de cinzas da queima de resíduos
agroindustriais na produção de compósitos fibrosos e
concreto leve para a construção rural**

CELSO YOJI KAWABATA

Aproveitamento de cinzas da queima de resíduos agroindustriais na produção de compósitos fibrosos e concreto leve para a construção rural

Tese apresentada à Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Doutor em Zootecnia.

Área de Concentração: Qualidade e Produtividade Animal

Orientador: Prof. Dr. Holmer Savastano Junior

FICHA CATALOGRÁFICA

preparada pela

Biblioteca da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo

K22a

Kawabata, Celso Yoji

Aproveitamento de cinzas da queima de resíduos agroindustriais na produção de compósitos fibrosos e concreto leve para a construção rural / Celso Yoji Kawabata - Pirassununga, 2008. 165 f.

Tese (Doutorado) -- Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos -- Universidade de São Paulo.

Departamento de Zootecnia.

Área de Concentração: Qualidade e Produtividade Animal.

Orientador: Prof. Dr. Holmer Savastano Junior.

Unitermos: 1. Casca de arroz, cinza 2. Bagaço de cana-de-açúcar 3. Cama de frango, cinza I. Título.

DEDICATÓRIA

À minha família,

Aos meus pais, *Kokichi (in memorian)* e *Toshiko*,
pela educação fornecida.

Aos meus irmãos, *Márcia*, *Luciana* e *Cassiano*,
cunhados, *Massamitsu*, *William* e *Samara* e
sobrinhos, *Vitor*, *Beatriz* e *Renato*
pelo total apoio.

Dedico

AGRADECIMENTOS

- Ao Professor Doutor *Holmer Savastano Júnior* minha gratidão pela orientação, oportunidade e confiança em 10 anos de convivência e trabalho em grupo.
- À Professora Doutora *Joana Sousa Coutinho* e ao Professor Doutor *Afonso Serra Neves* co-orientadores nesta tese, pela disposição no auxílio dos trabalhos desenvolvidos em Portugal.
- Ao Professor Doutor *Romildo Dias Toledo Filho* e Professor Doutor *Luiz Roberto Prudêncio Júnior* pelos conselhos e auxílios no início dos trabalhos no doutorado.
- Ao Professor Doutor *Vanderley Moacyr John* por colocar à disposição o laboratório e equipamentos na Escola Politécnica/USP.
- Ao Professor Doutor *Eduardo Valência Morales* e Professor Doutor *Osny Pelegrino Ferreira* pelas sugestões e presença no exame de qualificação.
- À Professora Doutora *Giovana Tommaso* pelos ensinamentos durante o Programa de Aperfeiçoamento de Ensino.
- À *Fundação de Amparo à Pesquisa no Estado de São Paulo – Fapesp* pela concessão da bolsa de estudos e auxílio à pesquisa para realização desta pesquisa.
- À *Pró-Reitoria de Pós-Graduação da Universidade de São Paulo* pelo auxílio fornecido.
- Às empresas *Maxit*, *CIMPOR* e *Infibra* pela doação materiais.

- Aos funcionários *Fernando, Manuel e Paula* do laboratório da FEUP pelos auxílios nos ensaios.
- Aos funcionários *Zaqueu e Ronaldo* do Laboratório FZEA pelos auxílios nos ensaios.
- À "*Dona*" *Maria Teresa* secretária da FEUP, pelos auxílios prestados.
- Às funcionárias *Ciça, Conceição, Érica, Estelinha, Layla, Paula e Sandra* da FZEA pela ajuda sempre que necessária.
- Aos amigos de pós-graduação da FEUP: *Fernando, Luis, Miguel, Ricardo, Sérgio e Simão* pela companhia durante um período inesquecível e de grande aprendizado.
- Aos amigos de pós-graduação da FZEA, em especial: *Aline, Aya, Henrique, Juliana Pola, Juliana Victorino, Ligia, Márcia, Thiago Delgado e Thiago Previero* pelo auxílio, companhia e incentivo.
- Aos amigos do laboratório FZEA: *Camila, Gustavo, Maldonado, Melissa e Sérgio* pela ajuda e trabalho em grupo.
- Ao amigo *Guilherme Chagas Cordeiro* pelo auxílio.
- Ao amigo *Cléber Marcos Ribeiro Dias* pela ajuda no preparo das amostras na Escola Politécnica da USP.
- Ao amigo *Aristides Correia dos Santos* pela constante ajuda e tratamento das imagens da tese.
- Agradeço por fim a *TODOS* aqueles que acreditaram no meu trabalho e que aqui não foram citados, mas com certeza, lembrados em algum momento, por todo apoio conseguido neste período.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABELAS.....	vii
RESUMO.....	ix
ABSTRACT.....	x
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 JUSTIFICATIVAS.....	4
1.2 OBJETIVOS.....	5
2 RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS.....	6
3 CAMA DE FRANGO.....	10
3.1 COMPOSIÇÃO DA CAMA DE FRANGO.....	12
3.2 USO DA CAMA COMO FERTILIZANTE E SUAS IMPLICAÇÕES.....	14
3.3 USO DA CAMA PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS.....	16
4 BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR.....	18
5 CASCA DE ARROZ.....	23
5.1 O ARROZ.....	23
5.1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	23
5.1.2 CARACTERÍSTICAS.....	23
5.2 CINZA DE CASCA DE ARROZ.....	27
5.2.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS.....	27
5.3 APLICAÇÕES DA CCA E CASCA DE ARROZ.....	29
5.3.1 CONSTRUÇÃO CIVIL.....	31
6 INCINERAÇÃO CONTROLADA DE RESÍDUOS.....	34
7 ADIÇÕES.....	36
7.1 EVOLUÇÃO DO FABRICO DE LIGANTES E CONCRETO.....	36

7.2 MATERIAIS POZOLÂNICOS	39
8 CINZAS DE RESÍDUOS VEGETAIS	43
9 AGREGADO LEVE	46
9.1 CLASSIFICAÇÃO	46
9.2 AGREGADO LEVE DE ARGILA EXPANDIDA	47
10 CONCRETO LEVE	49
10.1 DEFINIÇÕES	49
10.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO CONCRETO LEVE	49
10.3 DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO DO CONCRETO LEVE	50
10.4 APLICAÇÃO DOS CONCRETOS LEVES	51
11 COMPÓSITOS FIBROSOS	53
12 MATERIAIS E MÉTODOS	55
12.1 OBTENÇÃO DOS MATERIAIS	55
12.2 ANÁLISE BROMATOLÓGICA DOS RESÍDUOS	56
12.3 QUEIMA DOS MATERIAIS	56
12.4 MOAGEM DAS CINZAS	58
12.5 ANÁLISE QUÍMICA DAS CINZAS	59
12.6 ANÁLISE FÍSICA DAS CINZAS	60
12.7 APLICAÇÃO DAS CINZAS EM MATERIAIS A BASE DE CIMENTO	61
12.7.1 PRODUÇÃO DOS COMPÓSITOS FIBROSOS	61
12.7.1.1 MATERIAIS	61
12.7.1.2 PRODUÇÃO	64
12.7.2. CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS FIBROSOS	66
12.7.3 PRODUÇÃO DO CONCRETO LEVE	71
12.7.3.1 MATERIAIS	71
12.7.4 CARACTERIZAÇÃO DA ARGILA EXPANDIDA	75
12.7.5 ANÁLISES FÍSICAS DAS CINZAS E DO CIMENTO PORTLAND	80
12.7.6 PRODUÇÃO DO CONCRETO LEVE	80
12.7.7 ENSAIOS DOS CONCRETOS	84
12.7.7.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	84
12.7.7.2 RESISTÊNCIA À FLEXÃO	85
12.7.7.3 RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS	85
12.7.7.4 ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE	88
12.7.7.5 CARBONATAÇÃO	89

12.7.8 DELINEAMENTO ESTATÍSTICO	90
13 RESULTADOS	91
13.1 ANÁLISES BROMATOLÓGICAS	91
13.2 ANÁLISE QUÍMICA DAS CINZAS	91
13.2.1 ANÁLISE POZOLÂNICA DAS CINZAS	92
13.3 ANÁLISE FÍSICA DAS CINZAS	94
13.3.1 ÁREA ESPECÍFICA DAS CINZAS	94
13.3.2 ESPECTROMETRIA A DISPERSÃO DE ENERGIA	94
13.3.3 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DAS CINZAS	100
13.3.4 DIFRAÇÃO DE RAIOS X DAS CINZAS	101
13.4 COMPÓSITOS FIBROSOS	105
13.4.1 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS COMPÓSITOS	105
13.4.1.1 MÓDULO DE RUPTURA	105
13.4.1.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE	108
13.4.1.3 LIMITE DE PROPORCIONALIDADE	111
13.4.1.4 ENERGIA ESPECÍFICA	114
13.4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS COMPÓSITOS	117
13.4.2.1 ABSORÇÃO APARENTE	117
13.4.2.2 DENSIDADE APARENTE	121
13.4.2.3 POROSIDADE APARENTE	124
13.4.3 INTERFACE FIBRA-MATRIZ	127
13.5 CONCRETO LEVE	130
13.5.1 FLEXÃO	130
13.5.2 COMPRESSÃO	134
13.5.3 RESISTÊNCIA A PENETRAÇÃO DE CLORETOS	138
13.5.4 ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE	140
13.5.5 CARBONATAÇÃO	141
14 DISCUSSÕES	142
14.1 RESÍDUOS	142
14.2 CINZAS	142
14.3 COMPÓSITOS FIBROSOS	145
14.4 CONCRETO LEVE	147
15 CONCLUSÕES	149
16 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	151

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Criação de frangos em galpão com cama	10
Figura 2	Evolução da produção brasileira de bagaço	18
Figura 3	Bagaço de cana-de-açúcar	19
Figura 4	Esquema dos constituintes do arroz	25
Figura 5	Visão externa e interna do forno tipo mufla da Coppe – UFRJ	56
Figura 6	Visão da câmara e detalhe das bandejas com resíduos no interior do forno tipo mufla adquirido na FZEA USP	57
Figura 7	Cinzas de cama de frango antes da moagem (escala com divisões menores em mm e maiores em cm)	58
Figura 8	Produção dos corpos-de-prova: (a) Mistura das matérias-primas (b) Câmara de vácuo (c) Prensagem das placas (d) Placas moldadas	64
Figura 9	Ensaio mecânico de tração na flexão	66
Figura 10	Pesagem do corpo-de-prova imerso em água, durante ensaio	68
Figura 11	Corpos-de-prova imersos em água fria, durante ensaio de envelhecimento acelerado de imersão-secagem	70
Figura 12	Grãos de argila expandida. Escala com divisões menores em mm e maiores em cm na parte superior da régua	71
Figura 13	Realização do ensaio de granulometria segundo a norma NP EN 933-1 (2000)	77
Figura 14	Ensaio para determinação de massa volúmica	78
Figura 15	Ensaio de trabalhabilidade (flow table)	82
Figura 16	Fabricação dos concretos leves em misturadora com movimento planetário da pá	83
Figura 17	Ensaio de resistência a compressão	84
Figura 18	Ensaio de resistência à tração na flexão	85
Figura 19	Profundidade de penetração de cloretos	86
Figura 20	Ensaio de penetração de cloretos	87
Figura 21	Ensaio de absorção por capilaridade: (a) Provetes acondicionados na caixa plástica; (b) Detalhe da absorção de água pelo provete	88
Figura 22	Ensaio de carbonatação	90
Figura 23	Condutividade das cinzas utilizadas	93
Figura 24	Morfologia e análise de EDS do cimento Portland	95
Figura 25	Morfologia e análise de EDS da cinza de casca de arroz (Brasil)	96
Figura 26	Morfologia e análise de EDS da cinza de cama de frango	97
Figura 27	Morfologia e análise de EDS da cinza de casca de arroz (Portugal)	98
Figura 28	Morfologia e análise de EDS da sílica de fumo	99

Figura 29	Distribuição granulométrica da cinza de casca de arroz	100
Figura 30	Distribuição granulométrica da cinza de cana-de-açúcar	100
Figura 31	Distribuição granulométrica da cinza de cama de frango	101
Figura 32	Difratometria da cinza de casca de arroz	102
Figura 33	Difratometria da cinza de bagaço de cana-de-açúcar	103
Figura 34	Difratometria da cinza de cama de frango	104
Figura 35	Valores do módulo de ruptura (MPa) dos compósitos com diferentes teores e tipos de cinzas aos 28 dias	106
Figura 36	Valores do módulo de ruptura (MPa) dos compósitos com diferentes teores e tipos de cinzas após 100 ciclos de imersão-secagem	107
Figura 37	Valores do módulo de elasticidade (MPa) dos compósitos com diferentes teores e tipos de cinzas aos 28 dias	109
Figura 38	Valores do módulo de elasticidade (MPa) dos compósitos com diferentes teores e tipos de cinzas aos 100 ciclos	110
Figura 39	Valores do limite de proporcionalidade (MPa) dos compósitos com diferentes teores e tipos de cinzas aos 28 dias	112
Figura 40	Valores do limite de proporcionalidade (MPa) dos compósitos com diferentes teores e tipos de cinzas após 100 ciclos	113
Figura 41	Valores de energia específica (kJ/m ²) dos compósitos com diferentes teores e tipos de cinzas aos 28 dias	115
Figura 42	Valores de energia específica (kJ/m ²) dos compósitos com diferentes teores e tipos de cinzas após 100 ciclos	116
Figura 43	Valores de absorção aparente de água (% em massa) dos compósitos com diferentes teores e tipos de cinzas aos 28 dias	118
Figura 44	Valores de absorção aparente de água (%) dos compósitos com diferentes teores e tipos de cinzas após 100 ciclos	120
Figura 45	Valores de densidade aparente (g/cm ³) dos compósitos com diferentes teores e tipos de cinzas aos 28 dias	122
Figura 46	Valores de densidade aparente (g/cm ³) dos compósitos com diferentes teores e tipos de cinzas após 100 ciclos	123
Figura 47	Valores de porosidade aparente dos compósitos com diferentes teores e tipos de cinzas aos 28 dias	125
Figura 48	Valores de porosidade aparente dos compósitos com diferentes teores e tipos de cinzas após 100 ciclos	126
Figura 49	Imagem da interface fibra-matriz do compósito fibroso produzido sem adição de cinzas	128
Figura 50	Imagem da interface fibra-matriz do compósito fibroso produzido com cinza de casca de arroz	128
Figura 51	Imagem da interface fibra-matriz do compósito fibroso produzido com cinza de bagaço de cana-de-açúcar	129
Figura 52	Imagem da interface fibra-matriz do compósito fibroso produzido com cinza de cama de frango	129
Figura 53	Valores de resistência à flexão dos compósitos com diferentes tipos de cinzas aos 3 dias	131
Figura 54	Valores de resistência à flexão dos compósitos com diferentes tipos de cinzas aos 7 dias	131

Figura 55	Valores de resistência à flexão dos compósitos com diferentes tipos de cinzas aos 28 dias	132
Figura 56	Valores de resistência à flexão dos compósitos com diferentes tipos de cinzas aos 90 dias	132
Figura 57	Valores de resistência à flexão dos compósitos com diferentes tipos de cinzas nas diferentes idades de ensaio	133
Figura 58	Valores de compressão dos compósitos com diferentes tipos de cinzas aos 3 dias	135
Figura 59	Valores de resistência à compressão dos compósitos com diferentes tipos de cinzas aos 7 dias	135
Figura 60	Valores de resistência à compressão dos compósitos com diferentes tipos de cinzas aos 28 dias	136
Figura 61	Valores de resistência à compressão dos compósitos com diferentes tipos de cinzas aos 90 dias	136
Figura 62	Valores de resistência à compressão dos compósitos com diferentes tipos de cinzas nas diferentes idades de ensaio	137
Figura 63	Coeficiente de difusão para as cinzas em estudo	139
Figura 64	Regressão linear aos resultados dos ensaios de absorção por capilaridade	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Composição da cama de frango (em base seca)	13
Tabela 2	Composição percentual da cama de frango (em base seca) com diferentes tipos de material absorvente	14
Tabela 3	Produção brasileira de bagaço de cana-de-açúcar (em milhões de ton): de 1990 até 2006	19
Tabela 4	Composição média da casca de arroz	24
Tabela 5	Composição química habitual da casca de arroz	25
Tabela 6	Composição química (% em massa) das cinzas	43
Tabela 7	Teores de cinza para diferentes resíduos agrícolas	45
Tabela 8	Avaliação da atividade pozolânica pela medida da condutividade	59
Tabela 9	Composição química do cimento CP II-E	61
Tabela 10	Características das fibras residuais de polpa de eucalipto	62
Tabela 11	Características do calcário	63
Tabela 12	Formulações dos compósitos reforçados com fibras (% em massa)	65
Tabela 13	Série de peneiras CEN	75
Tabela 14	Série de peneiras ASTM	76
Tabela 15	Quantidades (em gramas) utilizadas para a fabricação das argamassas	81
Tabela 16	Traços em peso (em relação à massa de ligante)	81
Tabela 17	Análises bromatológicas das amostras dos resíduos (% MS 100%)	91
Tabela 18	Valores das análises químicas das amostras das cinzas dos resíduos (% em massa)	92
Tabela 19	Atividade pozolânica encontrada para cada cinza	93
Tabela 20	Resultados de determinação de área específica pelo método BET	94
Tabela 21	Identificação das fases cristalinas presentes na cinza de bagaço de cana-de-açúcar	103
Tabela 22	Identificação das fases cristalinas presentes na cinza de cama de frango	104
Tabela 23	Médias $\pm$ erros padrão do módulo de ruptura (MPa) para os compósitos com diferentes tipos de cinzas aos 28 dias	105
Tabela 24	Médias $\pm$ erros padrão do módulo de ruptura (MPa) obtidos para os diferentes tipos de cinzas após 100 ciclos de envelhecimento acelerado de imersão-secagem	106
Tabela 25	Médias globais do módulo de ruptura (MPa) obtidos para os diferentes tipos de cinzas e diferentes idades de ensaio	107
Tabela 26	Médias $\pm$ erros padrão do módulo de elasticidade (MPa) obtidos para os compósitos com diferentes tipos de cinzas aos 28 dias	108
Tabela 27	Médias globais do módulo de elasticidade (MPa) obtidos	109

	para os diferentes tipos de cinzas aos 28 dias de ensaio	
Tabela 28	Médias $\pm$ erros padrão do módulo de elasticidade (MPa) obtidos para os compósitos com diferentes tipos de cinzas após 100 ciclos	110
Tabela 29	Médias $\pm$ erros padrão do limite de proporcionalidade (MPa) obtidos para os compósitos com diferentes tipos de cinzas aos 28 dias	111
Tabela 30	Médias $\pm$ erros padrão do limite de proporcionalidade (MPa) obtidos para os compósitos com diferentes tipos de cinzas após 100 ciclos	112
Tabela 31	Médias globais do limite de proporcionalidade (MPa) obtidos para os diferentes tipos de cinzas e diferentes idades de ensaio	113
Tabela 32	Médias $\pm$ erros padrão de energia específica (kJ/m^2) obtidos para os compósitos com diferentes tipos de cinzas aos 28 dias	114
Tabela 33	Médias $\pm$ erros padrão de energia específica (kJ/m^2) obtidos para os compósitos com diferentes tipos de cinzas após 100 ciclos	115
Tabela 34	Médias globais da energia específica (kJ/m^2) obtidos para os diferentes tipos de cinzas e diferentes idades de ensaio	116
Tabela 35	Médias $\pm$ erros padrão de absorção aparente de água (% em massa) para os compósitos com diferentes tipos de cinzas aos 28 dias	118
Tabela 36	Médias globais de absorção aparente (%) obtidos para os diferentes tipos de cinzas aos 28 dias	119
Tabela 37	Médias $\pm$ erros padrão de absorção aparente de água (% em massa) para os compósitos com diferentes tipos de cinzas após 100 ciclos de envelhecimento acelerado	119
Tabela 38	Médias $\pm$ erros padrão de densidade aparente (g/cm^3) obtidos para os compósitos com diferentes tipos de cinzas aos 28 dias	121
Tabela 39	Médias $\pm$ erros padrão de densidade aparente (g/cm^3) obtidos para os compósitos com diferentes tipos de cinzas após 100 ciclos	122
Tabela 40	Médias globais de densidade aparente (g/cm^3) obtidos para os diferentes tipos de cinzas e diferentes idades de ensaio	123
Tabela 41	Médias $\pm$ erros padrão de porosidade aparente obtidos para os compósitos com diferentes tipos de cinza aos 28 dias	124
Tabela 42	Médias $\pm$ erros padrão de porosidade aparente obtidos para os diferentes tipos de cinzas aos 100 ciclos	125
Tabela 43	Médias $\pm$ erros padrão de resistência à flexão (MPa) obtidos para os compósitos com diferentes tipos de cinzas às diferentes idades	130
Tabela 44	Médias $\pm$ erros padrão de resistência à compressão (MPa) obtidos para os compósitos com diferentes tipos de cinzas às diferentes idades	134
Tabela 45	Resultados (em Coulombs) da permeabilidade aos cloretos aos 90 dias	138
Tabela 46	Coeficientes de absorção por capilaridade obtidos	140

RESUMO

KAWABATA, C.Y. **Aproveitamento de cinzas da queima de resíduos agroindustriais na produção de compósitos fibrosos e concreto leve para a construção rural**. 2008. 165 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2008.

O presente trabalho teve como objetivo estudar a viabilidade da utilização de cinzas de resíduos agroindustriais (bagaço de cana-de-açúcar, cama de frango e casca de arroz) como aditivos minerais substitutos ao cimento Portland, na produção de compósitos fibrosos e concreto leve. As cinzas foram obtidas através da queima e moagem controlada dos resíduos, e tiveram suas características químicas e físicas analisadas. Além do “compósito referência” (0% de substituição), os compósitos fibrosos foram produzidos com teores de substituição de cimento Portland de 10%, 15% e 20%, e os concretos leves foram produzidos com 10% de substituição. Foram realizados ensaios físicos e mecânicos nos compósitos fibrosos e concreto leve. Os resultados mostraram que as cinzas de casca de arroz apresentaram propriedades pozolânicas e que podem ser empregadas para a produção dos compósitos fibrosos e concretos leve. No estudo com compósitos fibrosos, os resultados físicos e mecânicos em sua maioria indicaram que a cinza de casca de arroz apresentou os melhores resultados. Como não apresentaram propriedades pozolânicas, as cinzas de bagaço de cana-de-açúcar e cama de frango, mesmo apresentando bons resultados, podem ser utilizadas como “*micro-fillers*”. No estudo com concreto leve, a cinza de casca de arroz também se apresentou como melhor substituto para o cimento Portland por apresentar os melhores resultados nos ensaios realizados.

Palavras-chave: cinza de casca de arroz, cinza de bagaço de cana-de-açúcar, cinza de cama de frango, aditivos minerais, sustentabilidade.

ABSTRACT

KAWABATA, C.Y. **Use of agro industrials ashes the burning of waste in the production of fiber composite and lightweight concrete for rural construction.** 2008. 165 f. Thesis (Doctoral) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2008.

This research examines the viability of the use of waste agro industrials ashes (sugar cane bagasse, poultry litter and rice husk) and mineral additives substitutes to Portland cement in the production of composite fiber and lightweight concrete. The ashes were obtained through controlled burns and milling waste, and had their chemical and physical characteristics analyzed. Besides the "composite reference" (0% substitution), the fiber composites were produced with levels of replacement of Portland cement, 10%, 15% and 20%, and lightweight concrete were produced with 10% of replacement. Were tested on physical and mechanical fiber composites and lightweight concrete. The results showed that the ashes of rice husk had pozolanic properties and can be used for the production of fiber composite and lightweight concrete. In the study with fiber composites, the results physical and mechanical mostly indicated that the rice husk ash showed the best results. As there had pozolanics properties, the ashes of sugar cane bagasse and poultry litter, even showing good results, can be used as "*micro-fillers*". In the study with lightweight concrete, the ash of rice husk is also presented as a better replacement for Portland cement by presenting the best results in tests.

Key words: rice husk ash, sugar cane bagasse ash, poultry litter ash, mineral additives, sustainability.

1 INTRODUÇÃO

Mundialmente tem-se assistido a um aumento da preocupação com a preservação do meio ambiente, em particular na indústria da construção civil. Várias tentativas de valorização e reciclagem de resíduos têm sido levadas a cabo, contribuindo assim para a prática importante da sustentabilidade, atenuando a degradação ambiental e procurando reduzir a utilização de recursos naturais. Assim têm sido investigados novos materiais e processos que podem ser vantajosos para o setor da construção civil (ÂNGULO *et al.*, 2001; MEHTA & MONTEIRO, 1994; PRUDÊNCIO JUNIOR *et al.*, 2003; SAMPAIO *et al.*, 2000; ZHANG *et al.*, 1996).

O cimento Portland é o constituinte do concreto cuja produção mais contribui para a poluição do ambiente pela emissão de CO₂ para a atmosfera. Para agravar essa situação, a indústria da construção tem a tendência de aumentar e estimular ainda mais a produção de cimento Portland. Torna-se evidente a necessidade de se encontrarem novos materiais de construção, capazes de apresentarem respostas semelhantes ou melhores que os materiais atuais e que cumpram este novo parâmetro do desenvolvimento sustentável.

O fabrico de uma tonelada de cimento liberta para a atmosfera mais de uma tonelada de CO₂, um dos gases que mais contribui para o efeito estufa. A composição do concreto incorpora entre 10 e 15% de cimento (SAMPAIO *et al.*, 2000). Produzem-se atualmente cerca de 2 bilhões tonelada/ano de cimento mundialmente e estima-se que, em 2020, a produção alcance 3 bilhões tonelada/ano (USGS, 2004; WCP, 2004). Para reduzir estas quantidades, espera-se que seja utilizada uma grande quantidade de adições de forma a estabilizar o consumo do clínquer (SAMPAIO *et al.*, 2000).

As mudanças ocorridas no mundo, nas últimas décadas do século XX e no início do século XXI, fruto da revolução tecnológica, da industrialização e do crescimento populacional, tiveram como resultado:

- consumo massivo e mal aproveitado de materiais e de energia não-renováveis;
- poluição inaceitável e descontrolada, provocando danos no ambiente;
- produção desenfreada de resíduos (SWAMY, 2000).

A última consequência dessas mudanças foi a crise relacionada com o aquecimento global, os conflitos humanos e a pobreza mundial. A indústria da construção está envolvida na reabilitação e na regeneração das infra-estruturas. A tecnologia da construção encontra-se diretamente associada com os materiais, a energia e os recursos naturais. Apenas uma construção sustentável poderá evitar a degradação irreparável do ambiente e assim poder-se-á aspirar por um mundo com melhor qualidade de vida (DAVRAZ & GUNDUZ, 2005).

O concreto é presentemente tido como o único material de construção que, em nível mundial, poderá resolver os problemas de reabilitação e regeneração das obras de infra-estrutura. Na realidade, a solução passa pelo concreto sustentável à base de cimento Portland e adições pozolânicas/cimentícias silicosas. Passa ainda por aditivos que propiciam uma rede porosa refinada e impermeabilidade singular que asseguram a integridade, no longo prazo, da construção de concreto armado ou protendido. De fato, a ação coesa entre os constituintes deste tipo de concreto conduz a baixíssima permeabilidade e porosidade, e a elevada resistência aos ataques químicos. Existem vantagens em termos econômicos e técnicos com melhores propriedades do concreto fresco e endurecido, tais como melhoria da trabalhabilidade, redução da segregação, redução da exsudação, redução da retração plástica, redução da fissuração térmica por controle do calor de hidratação e significativa redução da permeabilidade.

Portanto a escolha criteriosa desses materiais torna-se imprescindível para que o concreto seja sustentável. É necessário conhecer e pesquisar todas as possibilidades em termos de materiais pozolânicos e cimentícios e depois combiná-los de uma forma crítica (SWAMY, 2000).

As indústrias de cimento e concreto têm procurado cada vez mais utilizar escórias de siderurgia, materiais inertes ou com atividade pozolânica em suas linhas de produção. Ao substituírem parte do cimento, as escórias e as pozolanas geram, além de economia de energia, a diminuição da poluição produzida durante a fabricação do cimento Portland, pela menor emissão de dióxido de carbono (JOHN, 2000). É também uma alternativa para solucionar o problema da disposição das cinzas no meio ambiente, além de gerar um produto de maior valor agregado sem que haja a produção de um novo resíduo.

Reforçar matrizes frágeis para aumentar a sua capacidade de absorver energia é uma prática que tem sido utilizada desde os princípios da nossa civilização. Uma das maiores preocupações com relação ao uso de fibras naturais como reforço de sistemas à base de cimento está relacionada com a durabilidade dos compósitos, que podem perder resistência e tenacidade com o tempo.

Nos países em desenvolvimento, de um modo geral, não ocorre a divulgação adequada dos conhecimentos científicos gerados, principalmente para aqueles que atuam no meio rural. Construções rurais, por exemplo, não têm despertado grande interesse junto à comunidade científica, sendo limitada a quantidade de pesquisas que priorizem esse setor. Na maioria das vezes, construções rurais ou materiais alternativos para construções são associados, erroneamente, a obras temporárias ou a materiais de baixa durabilidade (BERALDO, 1997).

1.1 Justificativas

Considerando o grande volume de consumo de cimento, qualquer redução terá vantagens ecológicas significativas. Uma das formas de redução deste consumo é por meio de substituições parciais de cimento por materiais cimentícios – pozolânicos ou com propriedades hidráulicas latentes, cuja produção implica menor consumo de energia e acarreta níveis inferiores de poluição. Esta solução é vantajosa, pois esses materiais permitem, em geral, melhoras significativas na durabilidade das estruturas de concreto (SAMPAIO *et al.*, 2000).

Uma combinação criteriosa de materiais pozolânicos/cimentícios, adjuvantes, adições minerais, fibras naturais ou outros constituintes apropriados, podem favorecer o crescimento sustentável associado a repercussões mínimas em termos ambientais.

Se for possível estabilizar a produção de cimento Portland, e substituí-lo parcialmente, na composição de argamassas ou concretos, por outros materiais pozolânicos, tais como a cinza de casca de arroz, estar-se-á a contribuir para a construção sustentável.

1.2 Objetivos

O principal objetivo do presente trabalho é investigar a utilização das cinzas provenientes da queima de resíduos agroindustriais (cama de frango, bagaço de cana-de-açúcar e casca de arroz) em substituição parcial (adições) ao cimento Portland na fabricação de fibrocimento sem amianto e concreto leve.

Para realização do objetivo principal do trabalho, foram traçados os objetivos específicos listados abaixo:

a) Comparar e caracterizar materiais residuais, com ênfase em camas de frango, por meio de análises bromatológicas.

b) Comparar as cinzas obtidas da incineração controlada dos materiais residuais coletados, por meio de ensaios de caracterização química e física.

c) Produzir e caracterizar compósitos de cimento celulose, em laboratório, com adição de cinzas de resíduos agroindustriais, fibras vegetais e sintéticas, como alternativa para produção de componentes construtivos aplicados a instalações rurais.

d) Produzir e caracterizar concreto leve, produzido com adição de cinzas de resíduos agroindustriais e argila expandida.

2 RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS

A quantidade de dejetos e resíduos de origem animal tem sido motivo de preocupação, não só de entidades de pesquisa, mas também de produtores e pessoas ligadas à proteção ambiental. A utilização de resíduos pode, ao mesmo tempo, economizar a energia e preservar o ambiente (RASHWAN *et al.*, 1992).

No caso da indústria avícola, práticas adequadas de manejo dos resíduos são essenciais para seu crescimento e desenvolvimento sob as condições de restrições legais atualmente existentes. As operações de produção de frangos e poedeiras, além de carne e ovos, geram anualmente grande volume de resíduos na forma de esterco, efluentes, camas de aves e animais mortos. Por essas razões, as operações em aviários precisam dispor de um plano de manejo de resíduos bem definido. Tal planejamento deve permitir que os produtores e a indústria continuem a tirar proveito dos benefícios econômicos da produção, ao mesmo tempo em que reduzem os riscos associados ao processamento, à armazenagem, à disposição e ao uso de resíduos gerados pelas instalações de confinamento de aves.

O acúmulo de dejetos é um desafio físico e econômico que deve ser superado ao se confinar qualquer animal doméstico. A concentração de aves em unidades econômicas resulta grande acúmulo de dejetos. Um plantel de 100 mil galinhas poedeiras pode produzir cerca de 11 toneladas de esterco por dia. O dejetos das aves é tão importante do ponto de vista biológico que pode ser utilizado com inúmeras vantagens e não simplesmente como um dejetos a ser eliminado (MORENG & AVENS, 1990).

Segundo AVELLAR (1995), as questões ambientais têm sido objeto de certificação e normalização, o que certamente obrigará as empresas que desejarem manter sua competitividade a se adaptarem às novas demandas ambientais exigidas pelo mercado e pela sociedade.

Arroz, trigo e milho representam as maiores colheitas em se tratando de cereais. As partes não aproveitáveis, como folhas, caule, e casca, são, em geral, consideradas lixo. Em razão do seu grande volume, contribuem para um dos maiores problemas deste final de milênio: a eliminação dos resíduos gerados pela indústria e pela agricultura. Dentre os principais subprodutos, a casca de arroz é o que produz o maior percentual de cinzas (% em massa) (23%) seguido pelo bagaço de cana-de-açúcar com 15%, a palha do arroz com 14%, a folha do milho com 12%, as folhas e o talo do girassol com 11% e as folhas do trigo com 10% de cinzas (DELLA *et al.*, 2005).

A casca de arroz, um dos mais abundantes resíduos agroindustriais, é um material fibroso composto principalmente por celulose, lignina e resíduo orgânico. Quando depositada, ocupa grandes áreas, onde pode ocorrer queima *in situ* com a decorrente dispersão das cinzas. Em razão da sua lenta biodegradação, permanecem inalteradas por longos períodos de tempo, gerando enorme dano ao meio ambiente.

Sem valor comercial em consequência de sua dureza, fibrosidade e natureza abrasiva, a casca de arroz é normalmente utilizada por causa do seu alto poder calorífico (aproximadamente 16720 kJ/kg), como fonte alternativa de calor na geração de gases quentes para a secagem do próprio cereal nas usinas de beneficiamento do grão. Este valor corresponde a 50% da capacidade térmica de um carvão betuminoso de boa qualidade e cerca de 33% da capacidade térmica do petróleo (DELLA *et al.*, 2005). Porém, o resultado desta utilização, no Brasil, consome somente cerca de 30% do montante de casca produzido.

Inúmeros resíduos de diferentes processos industriais incorporam elevado conteúdo de energia. Aqueles que, em razão de sua composição química ou estado vítreo, apresentam reatividade em meio aquoso, e resultam em endurecimento, podem ser utilizados como aglomerantes. A sua reciclagem apresenta inúmeras vantagens. Reduz o número de resíduos destinados a aterros sanitários e o risco de contaminação do meio ambiente, agravado pela disposição sem qualquer controle, observado em diferentes setores da atividade industrial no Brasil e no mundo (ROSKOVIC & BJEGOVIĆ, 2005). A reciclagem também reduz o volume de extração de matérias-primas necessárias à produção dos aglomerantes, além de preservar recursos naturais. Reduz ainda significativamente a liberação do CO₂ para a atmosfera, gerado em grande quantidade durante a produção do cimento Portland e da cal, tanto pela queima do combustível, quanto pela descarbonatação da rocha calcária, segundo a equação (1):

Ao ser dispensada a calcinação de uma parte do aglomerante e, algumas vezes, ao eliminar ou reduzir o grau de moagem, diminui-se consideravelmente o consumo de energia associado à produção dos aglomerantes. Não menos importante é o fato de que a utilização de resíduos permite alterar as características dos aglomerantes, especialmente do cimento Portland, e torna possível a melhoria de seu desempenho em aplicações específicas.

Diferentes resíduos podem ser utilizados na produção de aglomerantes:

- escória granulada de alto-forno, resíduo da produção de ferro-gusa;

- cinza volante, produto da calcinação de carvão mineral em caldeiras de leito fluidizado, empregadas normalmente na produção de energia termoelétrica;
- cinzas vegetais, como a cinza gerada durante a calcinação da casca de arroz, na obtenção de energia para a produção de arroz parboilizado;
- cal de carbureto, gerada durante a produção do gás acetileno, fosfogesso, resíduo da indústria de fertilizantes fosfatados, e gesso artificial ou químico, obtido no processo de remoção do SOx de gases gerados por processos industriais, são exemplos de resíduos que produzem aglomerantes aéreos;
- sílica ativa, um resíduo industrial da produção do ferro silício ou do silício-metálico.

3 CAMA DE FRANGO

A produção de matrizes de corte no Brasil em 2007, segundo o site especializado AVISITE (2008), foi de 42,5 milhões de unidades aproximadamente. Estima-se, em razão desse dado e da quantidade média de 2,12 kg/ave/ano de cama produzida com diferentes tipos de material (ANGELO *et al.*, 1997), um acúmulo de cerca de 90,1 milhões de toneladas de cama (Figura 1).

Figura 1. Criação de frangos em galpão com cama.

(Fonte: PHOTOSFORPEACE, 2005).

Esse subproduto da indústria avícola foi amplamente utilizado na alimentação de ruminantes, mas o surgimento de casos do mal da vaca louca (encefalopatia espongiforme bovina ou BSE) na Europa na década de 1990, fez com que o governo brasileiro tomasse algumas medidas preventivas para evitar que a doença chegasse ao país. Uma delas foi a publicação, em julho de 2002, da Instrução Normativa nº 15 de 17 de julho de 2001, que reforça a proibição do uso da cama de frango na alimentação de ruminantes.

Segundo BHATTACHARYA & TAYLOR (1975), há risco de transmissão de algumas doenças ao homem por meio do uso da cama de frango como alimento para bovinos. Os autores observaram que as aves são potenciais portadoras de diversos patógenos humanos, como o vírus de Newcastle e Clamidia ou Psitacosis, que causam, respectivamente, conjuntivite e pneumonia em humanos, assim como os agentes da erisipela e da listeriose.

Existe ainda o risco para a saúde do animal, que consome a cama de frango, pois, além dos microrganismos, ela pode conter mais de 20 tipos de drogas e antibióticos usados nas rações de frangos. A presença de arseniacais, antibióticos, sulfonamidas, coccidiostáticos, nitrofurans e outros, resultam em resíduo na cama.

O nome mais indicado para esse material talvez fosse cama de aviário, como usado por FIALHO *et al.* (1984), pesquisadores do Centro Nacional de Pesquisa Suínos e Aves da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (CNPISA - Embrapa), mas a denominação cama de frango é a mais comum.

A cama de frango é o produto resultante da mistura dos excrementos das aves (poedeiras e frangos de corte) e restos de alimentos mais fragmentos de material sólido e orgânico utilizados sobre o piso dos galpões de criação (BRANCO, 1984). Além desses constituintes, normalmente, são encontrados penas e “debris” epidérmico.

VASCONCELOS (1993) comenta que a cama de frango de corte compõe-se de: 40% de material utilizado como cama, 40% de fezes e urina (eventualmente também água) e 20% de alimentos (rações), que podem cair dos comedouros.

A cama de galinha poedeira tipo chão compõe-se de 50% de fezes e urina (por causa do maior tempo de permanência), 40% de material usado como cama e 10% de rações, penas e ovos quebrados. Os comedouros geralmente são automáticos, daí a menor perda de ração.

MALONE (1993) classifica a cama de frango como a combinação de excretas, penas, alimentos e material de camada. Demonstra, em seu trabalho, os tipos de cama, suas densidades, a capacidade de reter água de cada material de camada e a composição de nutrientes de cada material.

Os principais materiais utilizados como cama, em nosso meio são: maravalha, casca de arroz, casca de amendoim, sabugo de milho, bagaço de cana-de-açúcar e palhas. Essa diversidade causa grande heterogeneidade na composição da cama de frango. Somado a isso, o tipo de ração, a idade e o tipo de aves, a quantidade de penas e excreta, o número de lotes criados, o tempo e a forma de armazenamento da cama, também são citados por EL BOUSHY & VAN DER POEL (1994).

3.1 Composição da cama de frango

A cama de frango apresenta grande variação em sua composição. Nas Tabelas 1 e 2, são apresentados dados de diversos autores sobre a composição da cama de frango.

BHATTACHARYA & TAYLOR (1975), em revisão sobre o assunto, observaram que a cama de frango apresentou teor médio de proteína bruta (PB) de 30%. Cerca de 50 a 60% da PB é constituída de nitrogênio digestível total (NDT). O ácido úrico representa ao redor de 30% do nitrogênio total, ocorrendo ainda, em menor proporção, nitrogênio na forma de uréia, creatina e creatinina. O teor médio de fibra bruta (FB) foi de 15%, com elevado teor de lignina. Reportaram também elevado teor de cinzas (15% em massa) com teores altos de cálcio e fósforo.

FIALHO *et al.* (1984), do CNPSA – Embrapa, analisaram a cama de frango e encontraram valores menores de PB, mas maiores de FB e cinzas, diferindo um pouco dos outros autores. O mesmo ocorreu para GARCIA *et al.* (1997) e ALVES *et al.* (1999). Esses autores também encontraram valores menores de NDT.

Tabela 1. Composição da cama de frango (em base seca).

Fração	Unidade	FIALHO <i>et al.</i> (1984)	BHATTACHARYA e TAYLOR (1975)
Matéria seca	%**	80,90	84,70 ± 4,2
Proteína bruta	%	21,10	31,30 ± 2,9
Proteína verdadeira	%		16,70 ± 2,4
Fibra bruta	%	20,10	16,80 ± 1,9
Extrato etéreo	%	0,47	3,30 ± 1,3
Extrato não nitrogenado	%	37,70	29,50 ± 1,6
Nitrogênio digestível total	%		60,30
Energia metabolizável	Mcal/kg	2,16*	2,18
Cinzas	%	20,60	15,00 ± 3,2
Ca	%	2,80	2,37 ± 9,0
P	%	1,90	1,80 ± 0,4
Na	%		0,54
K	%		1,78
Mg	%		0,44
Mn	mg/kg	281,00	225,00
Fe	mg/kg	510,00	451,00
Cu	mg/kg	115,00	98,00
Al	mg/kg		284,00
Zn	mg/kg	283,00	235,00
Bo	mg/kg		38,00

* Com suínos

** % em massa

Tabela 2. Composição percentual da cama de frango (em base seca) com diferentes tipos de material absorvente.

Fração	GARCIA <i>et al.</i> (1997)				ALVES <i>et al.</i> (1999)			
	Raspa madeira	Casca arroz	Bagaço cana	Bagaço carnaúba	Raspa madeira	Capim elefante	Sabugo com palha	Parte aérea mandioca
Matéria seca	77,8	81,8	83,9	81,7	84,9	82,1	81,3	83,5
Proteína bruta	13,3	13,2	14,2	17,7	10,3	10,5	10,6	13,2
Extrato etéreo	0,8	1,0	1,1	2,4	1,1	2,4	1,3	1,6
FDN	68,6	63,7	63,3	72,6	72,2	63,6	69,3	61,6
FDA	44,9	40,6	33,4	44,8	50,5	37,4	34,8	37,4
Lignina	12,0	8,9	5,2	16,7	13,5	5,9	6,0	10,0
Cinzas	10,8	27,8	11,5	14,5	9,0	12,8	10,5	11,9
NDT	44,9	29,7	43,9	42,1	40,0	53,8	55,9	49,3

3.2 Uso da cama como fertilizante e suas implicações

O excesso de aplicação do esterco em relação à necessidade da cultura ou o erro de aplicação são causas de contaminação ambiental (WILLIAMS *et al.*, 1999) e de condenação do público pela proliferação de moscas (COOK *et al.*, 1999) e emissão de odor.

Segundo TABLER (2002), os erros mais comuns na aplicação da cama de frango no solo são:

- A quantidade de nitrogênio que as plantas utilizam é maior que a de fósforo. As plantas utilizam de 20 a 80% do fósforo no ano seguinte à aplicação da cama. Assim o seu aumento no solo aumenta a possibilidade de drenagem para águas de superfície como rios e lagos, aumentando a proliferação de algas e outras plantas aquáticas. Portanto, em solos com excesso de fósforo, não se deve aplicar cama ou esterco.
- Quando o solo estiver saturado, congelado ou nas épocas de chuva, não se deve adubar o solo com esterco ou cama.
- Não é recomendável a aplicação de esterco em terrenos com mais de 15% de inclinação ou sem curvas de nível.

- Não deve ser aplicado esterco ou cama num raio de 30 m de córregos, açudes, lagos, fontes, poços, fontes d'água e habitações e a 7 m de solos sem vegetação sujeitos à erosão.

Quanto ao impacto ambiental do uso de esterco como fertilizante, o excesso de aplicação em relação à necessidade de uma cultura pode originar:

- Aumento de $\text{NO}_3\text{-N}$, causando eutrofização do lençol freático ou de águas superficiais. Devido à sua mobilidade no solo, a amônia pode ser transportada nas formas orgânicas e inorgânicas de N em estado líquido na superfície ou chegando ao lençol freático. O excesso de $\text{NO}_3\text{-N}$ no lençol freático utilizado para consumo humano é um risco para crianças que são suscetíveis a metahemoglobinemia (WILLIAMS *et al.*, 1999).

- No meio ambiente, a perda de amônia ocorre porque o NH_3 se deposita na forma sólida e volátil no ecossistema. Para evitar os efeitos deletérios da amônia no ecossistema, o nitrogênio pode ser removido pela absorção pelas plantas, lagoas de tratamento e biodigestores (WILLIAMS *et al.*, 1999).

- O fósforo contribui com a degradação ambiental acelerando o processo de eutroficação. O tratamento da cama com sulfato de alumínio ou resíduos ricos em ferro pode reduzir a quantidade de fósforo (CODLING *et al.*, 2000).

- Os elementos traços como cobalto, cobre, ferro, manganês, selênio e zinco, que são eliminados nas fezes, são imóveis na maioria dos solos, e portanto podem ficar acima do nível e serem limitantes para alguns tipos de cultivos (GUPTA & CHARLES, 1999; WILLIAMS, *et al.*, 1999). O cobre encontrado em níveis de 479 mg/kg de cama apresenta 49% de solubilidade, o níquel, 11 mg/kg, 41% de solubilidade e o zinco, 373 mg/kg apresenta 6% de sua fração que é solúvel (JACKSON *et al.*, 2003).

- Hormônios esteroidais naturais excretados pelos animais têm baixa degradação no solo e na água e podem ser absorvidos pelas plantas e estarem presentes na água (YIN *et al.*, 2002).

- Os arsenicais podem ser encontrados nos solos em níveis de 1 a 39 mg/kg (JACKSON *et al.*, 2003) e contaminar a água. Nos Estados Unidos da

América, a concentração máxima de arsênico total permitida na água passou a ser de 10 ppb e há uma restrição sobre o uso de cama ou esterco de aves que receberam ácido 3-nitro na ração (Roxarsone) (ARAI *et al.*, 2003). Um frango de corte excreta aproximadamente 150 mg de Roxarsone em um período de 42 dias de criação e a cama pode conter de 30 a 50 mg/kg de arsênico (GARBARINO *et al.*, 2003). O ácido 3-nitro é excretado nas fezes sem nenhuma alteração. No entanto, quando a água é acondicionada na cama e a temperatura da cama sobe para 40°C, em aproximadamente 40 dias o arsenato aparece por fotodegradação (GARBARINO *et al.*, 2003). O arsenato é menos tóxico que o arsenito, que é a forma inorgânica do arsênico, que é muito tóxico (BEDNAR *et al.*, 2003). Tanto no solo como na cama, a degradação do arsênico ocorre em pH de 4,8 e aumenta com o aumento do pH (ARAI *et al.*, 2003; BEDNAR *et al.*, 2003). Sob condições anaeróbicas à temperatura ambiente, o ácido 3-nitro é totalmente transformado em diferentes componentes contendo arsênico em 48 h (GARBARINO *et al.*, 2003). Arsenicais têm sido relacionados com o aumento de câncer e leucemia em humanos.

- Somente a compostagem pode reduzir significativamente a quantidade de bactérias patogênicas para humanos e bactérias multiresistentes a antibióticos. As lagoas de tratamento (DUGGAN *et al.*, 2001), como os outros procedimentos, reduzem os riscos mas não os eliminam.

3.3 Uso da Cama Para Produção de Biogás

O desenvolvimento e a implementação de alternativas tecnológicas com vistas à geração de energia a custos reduzidos para o setor rural de mais baixa renda (em geral, menos capitalizado e com menores condições de arcar com a elevação de custos de energia, tanto no que diz respeito ao consumo

doméstico quanto para as atividades de produção) podem gerar impactos socioeconômicos positivos.

Uma das alternativas tecnológicas mais promissoras é o aproveitamento da biomassa para geração de energia, que propicia uso mais racional dos recursos disponíveis na exploração agrícola, reduz a transferência de renda para outros agentes e diminui a dependência de fontes externas de energia (ESPERANCINI *et al.*, 2007).

Existem hoje diversas alternativas tecnológicas de aproveitamento da biomassa para geração de energia, tecnicamente viáveis para a agricultura familiar. Uma das alternativas que vem despertando grande interesse é a tecnologia de biodigestão anaeróbia de resíduos dos animais, e particularmente de resíduos gerados com a criação animal, pela implantação de biodigestores.

A tecnologia de biodigestão anaeróbia de dejetos de animais apresenta diversas vantagens. Uma delas é a produção de biogás e biofertilizantes, produtos de elevado valor agregado. Outras são: redução da poluição dos recursos hídricos, facilidade de implantação e operação, e redução da pressão sobre as matas pelo consumo de lenha (GASPAR, 2003).

Como procedimento alternativo para aproveitamento da cama, podem-se utilizar biodigestores para produção de biogás e biofertilizantes. O biogás, basicamente constituído pelo metano (CH_4), pode estar ao nível de 33% numa cama em fermentação. De acordo com BELLAYER & PALHARES (2003), a quantidade de cama produzida em 2001 teria um potencial para geração de 675 milhões de m^3 de biogás ou 22,5 milhões de botijões de gás de 13 kg. Durante a biodigestão, são liberados CO_2 (25%) e compostos nitrogenados gasosos (NH_3 , NO , NO_2 , N_2O e N_2) (HORNING *et al.*, 2000).

4 BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Originária do sudeste da Ásia, a cana-de-açúcar é cultivada em uma extensa área territorial, compreendida entre os paralelos 35° de latitudes Norte e Sul, e com melhor rendimento em climas tropicais.

Trazida ao Brasil em 1532 por Martim Afonso de Sousa, a cana-de-açúcar passou a ter significativa importância para o país. Inicialmente, seu principal pólo de produção era a Zona da Mata nordestina, tendo depois se expandido pela região Sudeste, notadamente no Estado de São Paulo.

A produção nacional de cana-de-açúcar na safra 2007/2008, segundo levantamento do CONAB (2007), foi de 549,90 milhões de toneladas (Tabela 3), superior em 15,8% à da safra passada, que foi de 474,8 milhões de toneladas (Figura 2). Apesar da produção de cana-de-açúcar ser espalhada pelo país, somente seis estados (São Paulo, Paraná, Minas Gerais, Alagoas, Goiás e Pernambuco) detêm o equivalente a 86,83% da produção nacional, sendo que apenas o Estado de São Paulo representa 58,01% da produção nacional. O bagaço equivale a 24% da cana em massa, e totalizou a quantidade de 131,98 milhões de toneladas na última estimativa da safra brasileira.

Figura 2. Bagaço de cana-de-açúcar.

(Fonte: ENERGYSAVINGNOW, 2005).

Tabela 3. Produção brasileira de bagaço de cana-de-açúcar (em milhões de ton): de 1990 até 2005 (Fonte: MME/EPE, 2005).

Ano	Bagaço	Ano	Bagaço
1990	54,776	1999	82,487
1991	58,801	2000	66,309
1992	62,002	2001	78,040
1993	60,584	2002	87,233
1994	70,543	2003	97,321
1995	69,847	2004	101,795
1996	73,632	2005	106,470
1997	82,039	2006	114,170
1998	82,183

Figura 3. Evolução da produção brasileira de bagaço.

O clima ideal para a produção da cana-de-açúcar é aquele que apresenta duas estações distintas: uma quente e úmida para proporcionar a

germinação, perfilhamento e desenvolvimento vegetativo; seguida de outra fria e seca, para promover a maturação e conseqüente acúmulo de sacarose.

A época de plantio ideal para a região Centro-Sul é de janeiro a março, enquanto na Região Norte-Nordeste é de maio a julho.

A importância da cana-de-açúcar pode ser atribuída à sua múltipla utilização, podendo ser empregada sob a forma de forragem, para alimentação animal, ou como matéria-prima para a fabricação de açúcar, álcool, rapadura, melaço e aguardente.

Atualmente, a principal destinação da cana-de-açúcar cultivada no Brasil é a fabricação de açúcar e álcool, o setor sucroalcooleiro é parte importante do agronegócio brasileiro, além de ser referência para os demais países produtores de açúcar e álcool.

A cana-de-açúcar é a matéria-prima que permite os menores custos de produção de açúcar e álcool, pois a energia consumida no processo é produzida a partir dos seus próprios resíduos.

A agroindústria de cana-de-açúcar, no Brasil, tem como objetivo a produção de açúcar para os mercados interno e externo e de álcool combustível para atender a demanda nacional de combustíveis. A implantação do projeto Proalcool no Brasil (CORTEZ, 1991) impulsionou a indústria sucro-alcooleira, com a conseqüente geração de resíduos. A cultura da cana no país foi introduzida sem a devida preocupação com o aproveitamento comercial dos subprodutos. Os principais subprodutos das usinas de açúcar e álcool são o vinhoto, a torta de filtro e o bagaço (Figura 2). A otimização dos processos para viabilizar a melhor utilização desses subprodutos e o desenvolvimento de outros processos que aumentem o seu valor têm sido objeto de atenção de indústrias do setor e de pesquisadores (BILBA *et al.*, 2003).

O bagaço é resultante da extração do caldo de cana-de-açúcar e é caracterizado como um subproduto com altos teores de parede celular, baixa densidade energética e pobre em proteína e minerais, constituindo um volumoso de baixo valor nutritivo e de baixo potencial na alimentação animal (PIRES *et al.*, 2004).

O bagaço de cana-de-açúcar “in natura” é composto por 45% de fibras lignocelulósicas, 50% de umidade e 2 a 3% de sólidos solúveis em água. Quimicamente constitui-se de 41% de celulose, 25% de hemicelulose e 20% de lignina, aproximadamente, com base na massa seca de bagaço. A queima do bagaço excedente da cana-de-açúcar possibilita o seu uso em substituição ao óleo combustível e outros energéticos. Porém, a pirólise do bagaço gera uma espécie de cinza composta em sua maior parte de materiais inorgânicos e com aspecto grosseiro. A incorporação de resíduos sólidos em matriz cimentícia é uma das possíveis soluções para viabilizar a utilização desse material (MESA VALENCIANO, 1999).

MESA VALENCIANO (1999) estudou o emprego de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar na produção de argamassas e na estabilização do solo. As cinzas provenientes de usina de Campinas, SP foram moídas por 3 h em moinho de bolas. A substituição do cimento Portland por cinzas de bagaço de cana-de-açúcar causou discreto aumento de água para a obtenção de uma mesma consistência, que fez variar a relação água/aglomerante de 0,26 para cimento Portland puro até 0,273 para a mistura com 50% de cinzas. Apesar da pequena variação na relação água/aglomerante, a adição da cinza provocou redução acentuada na resistência à compressão. Não foram realizados ensaios específicos para medir a atividade pozolânica, mas o decréscimo da resistência é provavelmente consequência da baixa atividade pozolânica associada às condições de calcinação. Associe-se a esse fato a baixa superfície específica da cinza, uma vez que quase 80% do material se encontra retido nas peneiras entre as malhas 0,15 e 0,075 mm.

HERNÁNDEZ *et al.* (1998) estudaram cinzas de bagaço de cana-de-açúcar e da palha de cana. A cinza de bagaço de cana, proveniente de Cuba, apresentava cerca de 10,44% de CaO, provavelmente oriundo de algum contaminante do processo de controle de emissões na etapa de calcinação. Consistentemente, a difração de raios X acusou a presença de calcita, além de quartzo e cristobalita, formas polimórficas de SiO₂ e o característico halo amorfo. Pastas depositadas em moldes prismáticos com 30% de cal hidratada e 70% de cinza, e relação água/aglomerante de 0,47, moídas até passarem na peneira de abertura de 0,063 mm, apesar de curadas a baixa umidade (umidade relativa igual a 65% e temperatura de 20°C), apresentaram resistência de compressão axial de 2,7 MPa aos 7 dias e 7,7 MPa aos 28 dias. A difração de raios X dos produtos hidratados mostra a formação de C-S-H e a redução no pico de CH com o avanço da idade, o que revela atividade pozolânica.

A cinza de palha de cana, calcinada ao ar livre, apresentou composições química e mineralógica similares. A resistência obtida foi sensivelmente superior, de 7,2 MPa aos 7 dias e 13,7 MPa aos 28 dias. Após os 7 dias, a difração de raios X não detectou mais a presença de CH, sinal de atividade pozolânica mais intensa.

AGGARWAL (1995) afirmou que o bagaço de cana-de-açúcar pode ser utilizado para a produção de compósitos, em mistura com cimento, resultando em materiais de alta e uniforme performance na presença de umidade e nos ciclos alternados de secagem e umedecimento, sendo, portanto, recomendados para uso em construção civil. SARMIENTO & FREIRE (1997) observaram que a resistência à compressão de compósitos reforçados com fibras de bagaço de cana-de-açúcar, aumentou com o decorrer do tempo, de forma mais acentuada do que o a da argamassa sem reforço.

5 CASCA DE ARROZ

5.1 O Arroz

5.1.1 Considerações gerais

O arroz representa a base alimentar de mais de metade da população mundial. Os escritos mais antigos mencionando a sua existência foram encontrados na China e na Índia. Supõe-se que tenha começado a ser cultivado por volta de 500 a.C. O cultivo do arroz começou a espalhar-se a partir do Sudoeste Asiático, primeiro até o Japão e a Pérsia; posteriormente, por volta de 1000 d.C., até as costas da África, e mais tarde até a Europa. Na Planície do Pó, o arroz é cultivado desde o século XV. Os espanhóis e os portugueses levaram-no para as Américas Central e do Sul após as descobertas, possivelmente no princípio do século XVI. Na América do Norte, este cereal é conhecido desde o século XVII (PEREIRA, 2002).

5.1.2 Características

Arroz é uma gramínea do gênero *Oryza* L. que compreende mais de 20 espécies, dentre as quais se destacam as cultiváveis *Oryza sativa* L. e *Oryza glaberrima* Steud (PEREIRA, 2002). O grão de arroz é a semente contida nos seus terminais. A planta pode ter entre 40 cm e 1 m de altura e o seu crescimento varia entre 3 e 6 meses, dependendo da variedade e das condições do cultivo.

O arroz possui as seguintes características (Tabela 4):

- rico em carboidratos;
- rico em proteínas;
- com aminoácidos considerados indispensáveis, existentes nas proteínas e que lhe conferem um importante valor biológico;
- com porcentagem de sais minerais que, à exceção de algumas frutas, é o menos mineralizado de todos os alimentos;
- o amido do arroz é um dos mais fáceis de digerir;
- vitamínico;
- pobre em sódio, o que parecendo inconveniente, torna-se muitas vezes uma vantagem;
- pobre em gorduras;
- fraquíssimo teor de celulose.

A colheita recolhe os grãos de arroz na sua casca, conhecido por arroz “paddy” (em casca). Dentro da casca estão o grão, protegido pela película, um conjunto de finas camadas de células diferenciadas de cor acastanhada. Cada grão pesa de 10 mg a 45 mg (peso seco), sendo a casca 20% do peso (JOSEPH *et al.*, 1989; PACEWSK *et al.*, 2002).

Tabela 4. Composição média da casca de arroz.

Proteínas (%)	Gorduras (%)	Fibras (%)	Cinza (%)	Carboidratos (%)
2,70	0,67	42,08	14,25	83,63

Fonte: VALADARES FILHO *et al.* (2006).

Um grão de arroz pode ser dividido em três partes principais: casca, película (farelo) e grão (Figura 4).

A película representa cerca de 10% do arroz, sendo uma das partes mais nutritivas do grão. O grão de arroz propriamente dito, ou miolo, é a parte mais consumida do cereal, e perfaz cerca de 70% do grão inteiro.

Figura 4. Esquema dos constituintes do arroz.

A casca de arroz é constituída por quatro camadas fibrosas, esponjosas ou celulares, que são altamente silicosas (KUMAR, 1993).

A composição química da casca de arroz é similar às fibras orgânicas (Tabela 5), contendo, segundo HWANG & CHANDRA (1997), mas varia conforme a espécie cultivada, tipo de solo, fatores climáticos e fertilizantes empregados:

Tabela 5. Composição química habitual da casca de arroz.

Celulose (%)	Lignina (%)	Sílica (%)
50	30	20

- celulose ($C_5H_{10}O_5$);
- lignina ($C_7H_{10}O_3$);
- hemicelulose ($C_5H_8O_4$);
- sílica (SiO_2).

Na incineração controlada da casca de forma a obter cinza para utilização como adição, é a lignina e a celulose da casca de arroz que são removidas na combustão, restando a cinza à base de sílica com forma microporosa (ISMAIL & WALIUDDIN, 1996; KUMAR, 1993; MEHTA, 1994; PACEWSK *et al.*, 2002).

Em termos de valores produzidos, para cada tonelada de arroz em casca, 23% correspondem a casca, e 4% correspondem a cinzas. De acordo com dados da FAO, divulgados em 2006, entre os continentes, a Ásia é o maior produtor mundial (90,5%), seguido das Américas (5,9%), da África (3,0%), da Europa (0,5%) e da Oceania (0,1%). O Brasil é o nono produtor mundial de arroz e o primeiro fora do continente asiático. A estimativa da produção nacional para a safra de 2006/2007, segundo a CONAB (2007), é de 11,2 milhões de toneladas, sendo inferior em 3,2% à da safra anterior, que foi de 11,6 milhões de toneladas. A referida redução deve-se a retração na área e na produtividade, esta última por influência do clima. Apesar da produção de arroz ser espalhada pelo país, somente cinco estados (Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Mato Grosso, Maranhão e Pará) detêm o equivalente a 81,12% da produção nacional. Apenas o Estado do Rio Grande do Sul representa 53,65% da produção nacional.

O processo industrial básico de processamento do arroz “paddy” é constituído por duas etapas: o descasque, removendo os cerca de 20% da casca e obtendo-se o arroz em película (arroz com película, “husked rice”, também conhecido no mercado como “arroz integral”) e o branqueamento, onde se retira a película por fricção entre rolos. Este processo retira mais 10% em peso do grão de arroz. O grão assim polido (arroz branqueado, “milled rice”) é o consumido em geral. No branqueamento também se quebram pedaços do grão de arroz, resultando o arroz “trinca”. O arroz pode partir mais ou menos durante o branqueamento, sendo este o principal critério do rendimento industrial. Em média, 15% do grão de arroz é perdido por trinca (LUDWIG, 2004).

Há centenas de variedades de arroz e, como resultado do esforço de diversos institutos de pesquisa em todo o mundo, aparecem continuamente novas variedades, resultantes de melhoramentos e cruzamentos genéticos. Agrupam-se em três grandes grupos:

- índica;
- japônica;
- fragrante.

5.2 Cinza de casca de arroz

5.2.1 Características gerais

A cinza de casca de arroz (CCA) é um material considerado há muito como uma superpozolana. A utilização da cinza de casca de arroz como material pozolânico tem sido intensamente investigada desde a década de 70, principalmente na Índia e nos Estados Unidos. Mas só a partir da década de 80, com o desenvolvimento do concreto de elevado desempenho é que a preocupação em obter uma CCA com máxima pozolanicidade, se tornou mais evidente. A produção de CCA com elevada pozolanicidade possibilita a sua utilização com substituição da sílica de fumo. A norma americana ASTM C 989 (2006) classifica a CCA, produzida em condições especiais, como pozolana de elevada reatividade, juntamente com a sílica (PACEWSK *et al.*, 2002).

Acredita-se que a sílica da casca de arroz exista na forma opalina (a opala é uma fase hidro-amorfa da sílica). Aparentemente, a sílica é transportada a partir do solo pela planta como ácido mono-silícico, o qual se concentra na casca e no caule da planta por evaporação da água e, finalmente, se polimeriza para formar a membrana sílico-celulósica (HOUSTON, 1972; KUMAR, 1993; PACEWSK *et al.*, 2002).

A composição química da casca é variável, pois está dependente do local e das condições de cultivo (KUMAR, 1993). Mas, de forma geral, corresponde a 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica. A lignina e a celulose podem ser removidas através de uma combustão controlada, obtendo-se assim uma cinza rica em sílica de forma micro-porosa (HWANG & CHANDRA, 1997; ISMAIL & WALIUDDIN, 1996; KUMAR, 1993; MEHTA, 1994).

Durante a queima, a temperaturas inferiores a 700°C, o resíduo de sílica existente na cinza é geralmente amorfo e quase idêntico à sílica de fumo, podendo conter até 95% de sílica no estado amorfo (ISMAIL & WALIUDDIN, 1996; JOSEPH *et al.*, 1989; KUMAR, 1993; MEHTA, 1994). O interesse na extração da sílica a partir destes resíduos provém da potencialidade de ser obtida com elevada área de superfície e pureza (DELLA *et al.*, 2006).

A casca de arroz parcialmente queimada tem cor negra por causa do seu alto teor de carbono. Quando a casca é totalmente incinerada, pode-se obter cinza cinzenta, púrpura ou branca, dependendo das impurezas existentes e das condições da combustão (MEHTA, 1994). As principais impurezas que se podem encontrar na CCA são os álcalis (K_2O e Na_2O). De fato, a CCA pode conter cerca de 1 – 5% de óxido de potássio (K_2O), que depende do tipo e da quantidade de fertilizante utilizado na orizicultura (ISMAIL & WALIUDDIN, 1996; KRISHNARAO *et al.*, 2000; MEHTA, 1994). Logo a brancura ou a intensidade do negro da cinza não é um indicador da cristalização da cinza, mas sim da quantidade de sílica ou quantidade de carbono existente (KUMAR, 1993).

A cristalinidade da sílica e a micro-porosidade da CCA dependem dos parâmetros da combustão, tendo-se já pesquisado o efeito do tempo e da temperatura da queima da casca de arroz. Assim, para obter-se a cinza com elevada pozolanicidade, deve-se queimar a casca de forma que a sílica fique no estado não cristalino. Deve-se também buscar a estrutura altamente micro-

porosa, pois a atividade química depende tanto da superfície específica, como do grau de amorficidade da cinza (MEHTA, 1994).

Com o aumento da temperatura para além de 870°C e do tempo de combustão, a sílica existente na CCA é transformada em formas cristalinas, tais como cristobalita e tridita. Essas formas perdem as suas propriedades pozolânicas e tornam-se perigosas para a saúde humana, principalmente no caso de inalação (MAZLUM & UYAN, 1993; MEHTA, 1994; SHINOHARA & KOHYAMA, 2004).

A CCA, se incinerada controladamente, pode ser utilizada na indústria cimentícia, como um material pozolânico de elevada reatividade, possuindo massa volúmica de aproximadamente 2000 kg/m³. Sua finura pode ser aumentada com a intensidade de moagem (CORDEIRO, 2006). A sua utilização no concreto leva à diminuição de trabalhabilidade e exige o aumento da quantidade de superplastificante (KUMAR, 1993; PACEWSK *et al.*, 2002).

5.3 Aplicações da CCA e da casca de arroz

A tendência do aproveitamento integral de resíduos é uma necessidade cada vez maior na indústria moderna em nível mundial, especialmente quando esta deve desenvolver sistemas de gestão ambiental baseados na International Organization for Standardization – ISO 14000 (norma relativa à Gestão Ambiental). A principal alternativa para a casca de arroz, no momento, tem sido a geração termoelétrica. Deste processo ainda resta a cinza, cujo destino está em aberto.

Na Malásia, existem indústrias de descasque de arroz em que 25% da energia consumida é obtida pela utilização da casca como fonte de energia. Com esta tecnologia, a cinza obtida não é aplicável como substituto parcial do cimento, pois as temperaturas de queima não são controladas, mas o

processo de fabricação pode ser adaptado, de modo a obter cinza com propriedades pozolânicas. Na situação atual, a cinza é utilizada para fabricação de adubos.

Nota-se que é preciso, de fato, conferir um destino aos resíduos agrícolas como a casca de arroz. Com o aumento das preocupações ambientais, no que se refere à poluição e à conservação dos recursos energéticos, as formas tradicionais de depositar os resíduos gerados pela produção de cereais tornaram-se inaceitáveis para a sociedade moderna. A queima ao ar livre dos resíduos de produção de cereais foram simplesmente banidos de muitos países, por conta da fumaça produzida, que põe em causa a saúde pública assim como o meio ambiente (MEHTA, 1994).

ROSSI *et al.* (2005) utilizaram a casca de arroz como material alternativo na produção de placas de argamassa aquecidas por meio de resistência elétrica, e obtiveram um sistema de aquecimento com resultados excelentes. ZUCCO (1999) submeteu diferentes frações de casca de arroz a alguns tratamentos para minimizar a incompatibilidade química entre a matriz e a biomassa vegetal, encontrando o melhor resultado para as partículas de casca de arroz lavadas em solução de cal.

HOUSTON (1972) descreveu para a cinza de casca de arroz, um variado número de possíveis formas de utilização na agricultura ou na indústria. A utilização como pozolana é só uma das muitas possibilidades. O autor afirma que a CCA, com pouco ou nenhum carbono residual, apresenta muitas aplicações potenciais. Menciona mais de 30 outras possíveis formas de utilização, que vão desde o uso para correção do solo até o uso como abrasivo no fabrico de pastas de dentes. HOUSTON (1972) indica a utilização da CCA de baixo teor ou livre de carbono, como absorvente de óleo. Afirma que, durante a queima da casca de arroz, as superfícies do ácido polisilícico, uma forma da sílica amorfa presente, tornam-se parcialmente desidratadas e mais compatíveis com óleos do que com água. Essa característica, combinada com a grande porosidade, permite à cinza absorver e reter

grandes quantidades de óleo ou gorduras, constituindo um produto muito útil para postos de combustíveis ou controle de acidentes de derramamentos de petróleo e derivados.

Muito recentemente, começou a ser comercializada, na Índia, sílica amorfa proveniente da CCA, utilizada para diversos fins, cujo conteúdo de sílica é, no mínimo, de 85% e a dimensão média das partículas de CCA é de 25 μm .

5.3.1 Construção civil

A importância do aproveitamento de resíduos na indústria da construção reflete-se em vários aspectos:

- possibilidade de desenvolvimento de materiais de baixo custo a partir de resíduos ou subprodutos agrícolas ou industriais, disponíveis localmente, após pesquisa das suas potencialidades;
- contribuição para a política do “resíduo zero”;
- contribuição para a sustentabilidade por utilização de subprodutos ao invés de matérias-primas virgens, contribuindo para a redução do consumo de recursos naturais;
- contribuição para a redução de depósitos destes subprodutos ou resíduos. De fato os depósitos de subprodutos ou resíduos, além de ocuparem espaço de armazenamento, podem causar impacto ambiental e poluir a terra, o mar ou as águas continentais.

Na construção civil, a CCA tem aplicações práticas com elevado potencial, referindo-se algumas nos pontos seguintes:

a) Isolantes Térmicos

Como a CCA possui um baixo coeficiente de transmissão térmica, pode também ser utilizada como isolante térmico. Assim, é possível fabricar isolantes térmicos com alumino-silicatos obtidos à base de CCA de elevada

pureza (HARA *et al.*, 1989). A partir da CCA é produzida mulita artificial. A mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) é um alumino-silicato que raramente ocorre na natureza como mineral e é um bom isolante térmico e elétrico, mesmo a elevadas temperaturas e resistente a ambientes corrosivos. Este tipo de isolamento é muito leve e de fácil aplicação.

b) Substituto Parcial do Cimento Portland

As pozolanas são aplicadas na indústria cimenteira há muitos anos. Os subprodutos, como cinzas volantes e CCA, são pozolanas artificiais, assim como a sílica de fumo (MAZLUM & UYAN, 1993).

Como referido anteriormente, a CCA é uma adição com muito interesse, pois, se produzida de uma forma controlada, é altamente pozolânica e por vezes é denominada de “super-pozolana”, em razão da elevada concentração de sílica reativa. A presença da CCA no concreto pode diminuir a resistência à compressão inicial, mas aumenta a durabilidade do concreto por redução da permeabilidade, o que é extremamente importante em muitas aplicações, tais como canais de irrigação e pisos resistentes à abrasão, entre outros, e sobretudo em estruturas de concreto armado e pré-esforçado sujeitas a ambientes muito agressivos (por exemplo, cloretos ou sulfatos) (KENT & EVERS, 1994; MAZLUM & UYAN, 1993; MEHTA, 1994).

Antes dos anos 70, a aplicação da CCA na indústria do cimento e do concreto era limitada apenas à fabricação de blocos prensados. Aparentemente, antes de 1970 não era realizada nenhuma tentativa de se produzir uma cinza pozolânica por meio de combustão controlada. Como a cinza produzida por combustão não controlada é geralmente cristalina e pouco pozolânica, os produtos fabricados com cal ou cimento Portland que continham este tipo de cinza necessitavam de cura a vapor para desenvolver as resistências adequadas (MEHTA, 1994).

Segundo MEHTA (1994), a CCA é uma adição com elevada pozolanicidade, que reduz a expansão provocada por reatividade dos

agregados com os álcalis. Assim os cimentos altamente alcalinos poderão ser combinados com agregados reativos, desde que se utilize substituição parcial de pelo menos 10% de CCA com elevada pozolanicidade.

c) Aplicações Geotécnicas

Naturalmente que a CCA não pode ser utilizada como ligante único para a estabilização de solos, pois, por si, não constitui um ligante cimentício, mas é aplicada em mistura. Nos últimos anos, diversas pesquisas têm sido realizadas para redução dos custos da estabilização de solos, através da substituição parcial do cimento Portland por adições minerais, tais como CCA. Como já referido, essa adição mineral possui sílica em forma amorfa que, na presença de água, pode combinar-se quimicamente com a cal procedente da hidratação do cimento, para formar compostos semelhantes aos silicatos e aluminatos de cálcio hidratado, o que se denomina de reação pozolânica. Essa metodologia é ideal para solos aluviais siltsosos, atingindo-se condições de estabilidade geralmente com 10% de substituição do cimento por CCA (HOSSAIN *et al.*, 1991).

6 INCINERAÇÃO CONTROLADA DE RESÍDUOS

Nas indústrias de beneficiamento de arroz, no Brasil e em grande parte do mundo, a queima da casca é realizada sem nenhum tipo de controle. Seu subproduto é um resíduo (cinza) obtido sem controle de temperatura, geralmente com grande proporção de minerais de sílica não reativos, tais como a cristobalita e a tridimita. Mas a obtenção de cinza da casca de arroz com boas características, por exemplo, na forma vítrea, exige temperatura e duração de queima controladas (CORDEIRO *et al.*, 2004; FIGUEIREDO & RÊGO, 2000). Nesse caso, a sílica é mantida na forma não cristalina e com estrutura celular (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Vários estudos foram conduzidos com o intuito de determinar as condições ideais de queima para a produção de cinza da casca de arroz com propriedades reativas. Segundo HANAFLI *et al.* (1980), as transformações de fase da sílica contida na cinza da casca de arroz, em relação ao aumento de temperatura na queima, obedecem à seguinte seqüência: sílica amorfa – cristobalita – tridimita. A avaliação das diferentes formas estruturais da sílica produzida é essencial, pois a atividade pozolânica está diretamente relacionada com a quantidade de sílica amorfa.

De acordo com PITT (1976), é necessário elevar a temperatura para valores acima de 1000°C para que ocorra a transformação de estado amorfo para cristalino na sílica pura. Entretanto, durante a queima da casca de arroz, a mudança de forma estrutural da sílica amorfa ocorre geralmente a temperaturas inferiores a 1000°C, por causa da presença de outros constituintes na casca.

Segundo SMITH (1984), para a obtenção de cinza vítrea é necessário que a casca de arroz seja queimada à temperatura máxima de 700°C. Nessa temperatura, é recomendado um tempo longo de queima, que varia de 3 a 5 h. SALAS *et al.* (1986) sugerem, por seu turno, que a casca de arroz seja queimada por 3 a 4 h em temperatura entre 450–700°C, para que a sílica presente permaneça no estado vítreo.

ARMESTO *et al.* (2002), FANG *et al.* (2004), HUANG *et al.* (2001), MAHAJAN (1991), NATARAJAN *et al.* (1998) utilizaram o forno de leito fluidizado para a produção de cinza amorfa e com baixo teor de carbono. O princípio deste forno consiste em efetuar a combustão do material numa cuba vertical em aço guarnecido de refratário, de secção praticamente cilíndrica, cujo centro é constituído por um leito fluidizado levado a alta temperatura. A fluidização é obtida injetando-se o ar de combustão sob o leito de areia, através de uma grelha equipada de tubagem em aço.

SOUZA *et al.* (2000) realizaram a queima da casca de arroz à temperatura de 550°C por 2 h em mufla para obtenção de sílica para posterior utilização na aplicação em cimento Portland. Para a mesma finalidade, SOUZA *et al.* (2000) queimaram a casca de arroz em forno elétrico à temperatura de 900°C sob pressão atmosférica por 6 h.

CORDEIRO (2006) encontrou como condições experimentais mais apropriadas a temperatura de queima de 600°C, a taxa de aquecimento de 10°C/min e o tempo de residência de 3 h.

7 ADIÇÕES

7.1 Evolução do fabrico de ligantes e do concreto

A utilização de materiais cimentícios na construção remonta à Antiguidade. O “ligante” utilizado pelos antigos Egípcios e que se pode encontrar ainda nas juntas dos blocos de pedra das pirâmides era de gesso impuro calcinado. A cal obtida por calcinação de pedra calcária foi utilizada pelos Gregos e Romanos, que preparavam argamassas de boa qualidade, pela mistura de pastas de cal com areia para unir estruturas de pedra. O exemplo das muitas obras romanas, que perduram até hoje, evidencia a perfeição atingida pela arte da construção nesses tempos antigos. Os construtores de então descobriram que, utilizando certas areias de origem vulcânica, obtinham-se argamassas de elevada resistência mecânica e que resistiam bem à ação das águas doces e salgadas. Essa importante descoberta não sobreviveu, no entanto, à queda do Império Romano e, até à Idade Média, assistiu-se ao declínio da qualidade e da durabilidade das argamassas utilizadas na construção.

A partir do século XVIII, alguns cientistas começaram a debruçar-se sobre esses problemas. Em 1756, deu-se um passo importante no conhecimento do cimento, com estudos de John Smeaton, que descobriu que se podia obter uma cal de carácter hidráulico.

Em meados do século XIX, começou a produção de cimento obtido por cozimento de misturas de calcário e argilas, o qual, pela sua melhor qualidade, foi substituindo gradualmente os cimentos naturais. A utilização

desse novo material, denominado cimento Portland, veio revolucionar extraordinariamente a construção a partir dos primórdios do século XX.

A atividade cimenteira conheceu, a partir dos anos que se seguiram à Segunda Guerra Mundial, um ritmo de progressão crescente. De 108 milhões de toneladas em 1948, a produção mundial de cimento praticamente decuplicou em 40 anos, atingindo os 1000 milhões de toneladas em 1986, prevendo-se um consumo de cimento de cerca de 2000 milhões de toneladas em 2004 (USGS, 2004).

As principais evoluções registradas, com repercussão na durabilidade e na alteração da composição dos concretos, incluem os melhoramentos surgidos no cimento, as novas tecnologias implementadas com a utilização de concreto pronto, o aparecimento de adjuvantes incorporadores de ar, a introdução de adjuvantes redutores de água (ou superplastificantes) e as evoluções observadas na aplicação de adições minerais.

Tem-se constatado também o desenvolvimento quer de superplastificantes quer de superpozolanas, tais como: sílica de fumo (ou sílica ativa), cinza de casca de arroz, metacaulim e cinzas volantes de elevada finura que possibilitam o emprego de grandes quantidades de pozolanas, cinzas e escórias em cimentos compostos (MEHTA, 1992; SAMPAIO *et al.* 2001)

As principais razões que levam ao aumento do consumo de adições são várias, podendo ser resumidas em:

- cada tonelada de clínquer de cimento está associada à emissão de mais de uma tonelada de dióxido de carbono. Além disso, a produção de clínquer utiliza grandes porcentagens de combustíveis fósseis não renováveis (SAMPALIO *et al.*, 2001). O uso de adições contribui para a redução/estabilização do cimento Portland em nível mundial. A industrialização e a urbanização produzem numerosas cidades e

megacidades e respectivas infra-estruturas de suporte, que requerem novas construções, assim como reabilitação das estruturas antigas em escala massiva. O aumento da população tem levado ao incremento das necessidades de consumo de concreto e cimento, especialmente em países em desenvolvimento. A única forma de responder de um modo sustentável, sem comprometer esse incremento, é a utilização de adições minerais. A utilização dessas adições contribui para a melhoria das infra-estruturas das populações sem comprometer o ambiente (ÂNGULO *et al.*, 2001; MEHTA, 1992; SAMPAIO *et al.*, 2001).

- o uso de subprodutos industriais, tais como cinzas volantes ou escórias de alto-forno, para substituir parcialmente o cimento Portland, permite a redução significativa dos gastos energéticos e portanto reduz os custos comparados com o uso exclusivo do clínquer. Além disso, o seu uso consiste numa metodologia ambientalmente correta, pois são aproveitadas grandes quantidades de materiais que, de outra forma, poluiriam o ambiente (BUI & STROEVEN, 2005; CHANDRA & BERNTSSON, 2002; MEHTA, 1992; RAMACHANDRAN, 1995; SAMPAIO *et al.*, 2001; SKALNY, 2001).

- a pressão dos cientistas e dos técnicos para se utilizarem maiores quantidades de adições em indústrias de cimento e concreto, é cada vez maior, à medida que se coloca em causa a durabilidade de estruturas de concreto fabricado com cimento Portland. Essa pressão tem sido traduzida nas normas (NP EN 197-1, 2001), que têm considerado cada vez mais esses tipos de materiais (SAMPALIO *et al.*, 2001). A presença de adições, no concreto, melhora significativamente a durabilidade, aspecto importante em termos de sustentabilidade da construção. Ao aumentar a vida útil de uma estrutura de concreto armado ou protendido, serão utilizados menos recursos em todos os níveis. Por exemplo, em concreto, as reações álcalis-sílica expansivas, que ocorrem entre os hidróxidos alcalinos presentes na pasta de cimento e os minerais reativos existentes nos agregados, produzem um gel que pode provocar a fissuração e a fragmentação das estruturas do concreto. O uso de materiais pozolânicos, previnem ou minimizam a fissuração

originada pelos ataques químicos. As adições tornam mais densa e homogênea a microestrutura do concreto, em virtude da segmentação dos poros maiores e da redução da quantidade e da dimensão dos cristais de hidróxido de cálcio (HASPARYK *et al.*, 2000; MEHTA, 1992; RAMACHANDRAN, 1995; RIXON, 1999; SAMPAIO *et al.*, 2001; SKALNY, 2001). Sabe-se que, por exemplo, na penetração de cloretos, também se observa melhoria da durabilidade provocada pelo uso de adições. A aplicação de materiais com elevada superfície específica, mesmo em pequenas quantidades, em combinação com superplastificantes, produz concreto de elevado desempenho.

7.2 Materiais Pozolânicos

Os materiais pozolânicos têm sido utilizados desde a Antiguidade, tal como na antiga Grécia, onde se aplicavam cinzas calcinadas de argila como “ligante”, assim como os Romanos, que viviam perto de Pozzuoli e utilizavam solos de origem vulcânica para produzirem os seus “ligantes hidráulicos”. Atualmente o termo “materiais pozolânicos” é utilizado para descrever as substâncias naturais de composição silicosa ou sílico-aluminosa ou a combinação de ambas (RAMACHANDRAN, 1995).

As pozolanas são produtos constituídos essencialmente por sílica e alumina que, apesar de não terem, por si só, propriedades aglomerantes e hidráulicas, contêm constituintes que se combinam, em presença de água, com o hidróxido de cálcio e com os diferentes componentes do cimento, originando compostos de grande estabilidade na água e com propriedades aglomerantes. São substâncias dotadas de grande reatividade para o hidróxido de cálcio, mas insolúveis e inertes na água (NEVILLE, 1995).

Para que haja reatividade pozolânica, é necessário que a sílica e a alumina não estejam em elevado grau de cristalinidade. A reatividade da

pozolana está portanto ligada à sua estrutura interna: ela será tanto maior quanto mais longe estiver do seu estado cristalino (NEVILLE, 1995).

Em termos de classificação (NEVILLE, 1995), as pozolanas podem ser:

- Naturais;
- Artificiais;
- Subprodutos industriais ou da agricultura.

Uma das grandes vantagens da utilização de pozolanas, como cimentos pozolânicos, é a redução da taxa de desenvolvimento de calor durante a hidratação, pelo que estes cimentos desenvolvem baixo calor de hidratação. Além dessa vantagem, o cimento pozolânico oferece alguma resistência ao ataque por sulfatos e ao ataque por ácidos fracos (NEVILLE, 1995; RAMACHANDRAN, 1995).

JOHN (1999) classificou a reciclagem de resíduos como parte fundamental do desenvolvimento sustentável de qualquer país. Até pouco tempo atrás, essa prática estava restrita apenas a uma alternativa para redução de custos. Essa visão aparentemente tem-se alterado, sobretudo em razão de pesquisas para melhorar o desempenho de produtos pela incorporação de resíduos e produtos reciclados. Um bom exemplo é a incorporação de cinzas e materiais pozolânicos residuais aos compostos cimentícios, para melhoria das suas propriedades físicas e mecânicas, e de sua durabilidade. A aliança desses dois aspectos – baixo custo e desempenho adequado – torna-se uma das grandes vantagens potenciais da reciclagem de resíduos.

Cimentos alternativos podem ser adequados pela substituição parcial ou total do cimento Portland convencional. Alguns exemplos de aplicação são blocos de parede, telhas e concreto. Esses cimentos alternativos apresentam as vantagens de economia de energia, reciclagem de resíduos, produção local em pequena escala e redução do custo. SAVASTANO JUNIOR (2000)

reportou algumas experiências de adoção em países em desenvolvimento e áreas rurais.

Além de extrair recursos naturais, a produção de materiais de construção também gera poluição, como poeira e CO₂ (CIB, 2000). O processo produtivo do cimento necessariamente gera CO₂, gás importante no efeito estufa. Segundo pesquisa internacional realizada pela Civil Engineering Research Foundation (CERF), entidade ligada à American Society of Civil Engineers (ASCE), dos Estados Unidos da América, para cada tonelada de clínquer produzido, mais de 600 kg de CO₂ são gerados. As medidas de proteção ambiental de outras indústrias e o crescimento da produção mundial do cimento Portland fazem com que a participação do cimento no CO₂ total gerado tenha mais que dobrado no período de 1950 a 1980.

As indústrias de cimento e concreto têm procurado cada vez mais utilizar materiais inertes ou com atividade pozzolânica em suas linhas de produção. Ao substituírem parte do cimento, essas pozzolanas geram, além de economia de energia, a diminuição da poluição produzida durante a fabricação do cimento Portland, pela menor emissão de dióxido de carbono (JOHN, 2000). FERREIRA *et al.* (1997) enfatizaram a utilização da cinza da casca de arroz como substituto parcial do cimento Portland, como adição mineral em concretos e na fabricação de outros tipos de material de construção. Vários trabalhos demonstraram o potencial de utilização desse material (BUI *et al.*, 2005; COUTINHO, 2003; FARIAS, 1990; GUEDERT, 1989; ISAIA, 1995; PRUDÊNCIO JUNIOR & SANTOS, 1996).

GEYER *et al.* (2000) demonstraram que a utilização da cinza de lodo altamente poluente proveniente de esgoto urbano, pode ser uma alternativa segura e econômica, em substituição parcial de até 20% do cimento Portland. MARTELLO *et al.* (2002) sugerem que a adição de até 10% de cinzas da queima de dejetos de suínos em substituição ao cimento Portland pode ser utilizada como material inerte de enchimento.

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

Amostras de cinzas de palha de cana-de-açúcar estudadas por VILLAR-COCIÑA *et al.* (2003) apresentaram boa atividade pozolânica, comparável à cinza de casca de arroz.

8 CINZAS DE RESÍDUOS VEGETAIS

As cinzas de resíduos vegetais que contenham elevado teor de sílica podem ser de utilização viável como pozolanas. Um dos aspectos mais interessantes dessa aplicação é a possibilidade de produzir um material potencialmente aglomerante em processos de geração de energia.

A maior parte da pesquisa encontra-se concentrada nas cinzas de casca de arroz, como encontrado, por exemplo, em BUI *et al.* (2005), COUTINHO (2003), ISAIA *et al.* (2003) e SENSALÉ (2006). Investigações de CINCOTTO & KAUPATEZ (1988) demonstraram que a cinza de bagaço de cana-de-açúcar requer ainda estudo e que as cascas de amendoim e de mamona não apresentam potencial aglomerante. TAY & SHOW (1996) investigaram cinzas de casca do coco da produção de dendê e do cacho da mesma planta como substituto ao cimento, e chegaram à conclusão de que essas cinzas podem ser misturadas em pequenas quantidades (10%) na produção do concreto. ADESANYA (1996) estudou a produção de concreto com a substituição parcial do cimento Portland por cinzas de sabugo de milho, concluindo que a substituição em 20% da massa do cimento pelas cinzas não altera as propriedades do concreto. A Tabela 6 resume a composição química das cinzas vegetais disponíveis.

Tabela 6. Composição química (% em massa) das cinzas estudadas por CINCOTTO & KAUPATEZ (1988), MEHTA (1992) e ISAIA (1995).

Cinza	PF*	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
Carvão mineral	4,43	56,3	30,1	6,41	1,16	0,80	0,07	0,73	0,26
Turfa	3,55	47,6	35,4	5,68	1,19	1,34	0,33	2,47	0,97
Casca de arroz	7,29	94,7	0,09	1,46	0,99	0,95	0,04	1,75	0,21
Bagaço de cana	28,6	34,8	6,55	16,0	2,79	1,69	1,09	6,76	1,64
Casca de amendoim	26,5	35,1	15,1	2,32	5,65	4,01	0,01	1,40	3,44
Casca de mamona	24,8	20,8	14,9	5,26	10,5	4,12	0,02	2,51	2,70

*PF: perda ao fogo.

A presença de adubos no solo pode acarretar a elevação no teor de potássio (K) das cinzas. O elevado teor de K_2O obtido por CINCOTTO & KAUPATEZ (1988) na cinza de bagaço de cana-de-açúcar é, provavelmente, decorrente da baixa eficiência do processo de extração de caldo durante a moagem. Dados apresentados por MESA VALENCIANO (1999), que analisou cinzas oriundas de usina de açúcar e álcool, onde o processo de extração do caldo é intenso, revelaram apenas 0,46% de K.

Qualquer cinza vegetal predominantemente silicosa, que possa ser produzida no estado amorfo e com finura adequada, pode ser utilizada como aglomerante. A sua reatividade vai depender da composição química, fortemente influenciada pelo produto que gerou a cinza, pelo solo e pelo processo de produção da cinza. O processo de queima ineficiente pode levar a teor elevado de carbono. É importante considerar o efeito da variabilidade do processo em geral na capacidade aglomerante da cinza.

A amorficidade e a finura são controladas pela conjunção de variáveis, como tempo de residência dos produtos na câmara de combustão, temperatura de calcinação e velocidade de aquecimento e resfriamento.

Um fator a considerar em qualquer situação é a disponibilidade regional de matéria-prima e o teor de cinzas gerado pelo processo. CINCOTTO & KAUPATEZ (1988) observaram que entre 25 e 30% em massa da cana é bagaço e que as cinzas representam apenas 0,05% desse valor. Além do bagaço da cana, existe também a palha da cana, que, com a adoção da colheita mecanizada e a proibição da queima, deverá ser destinada a algum processo de aproveitamento. Para CINCOTTO & KAUPATEZ (1988), a casca da mamona representa cerca de um terço da massa do grão, sendo 9% dela constituída de cinza. No amendoim, a casca gerada representa 30% em massa e o teor de cinza é da ordem de 3% em massa da casca. Dados existentes sobre o teor de cinza para diferentes resíduos agrícolas estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Teores de cinza para diferentes resíduos agrícolas (MEHTA, 1992; CINCOTTO & KAUPATEZ, 1988).

MEHTA		CINCOTTO & KAUPATEZ	
Produto	Cinza (% em massa)	Produto	Cinza (% média)
Folha de milho	12	Casca de arroz	18
Casca de arroz	20	Bagaço de cana	0,5
Palha de arroz	14	Amendoim	3
Folha de sorgo	12	Mamona	9
Bagaço de cana	15		
Folha e talo de girassol	11		
Folha de trigo	10		

9 AGREGADO LEVE

Os concretos são materiais heterogêneos e suas propriedades dependem, essencialmente, das propriedades individuais de cada componente e da compatibilidade entre eles. As principais propriedades do concreto influenciadas pela substituição dos agregados tradicionais por agregados leves são: massa específica, trabalhabilidade, resistência mecânica, módulo de elasticidade, propriedades térmicas, retração, fluência e espessura da zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento (ROSSIGNOLO, 2003).

9.1 Classificação

Os agregados leves incorporados na produção de concreto leve podem ser classificados, segundo sua natureza, em agregados orgânicos e inorgânicos. Os agregados inorgânicos dividem-se em naturais e artificiais, podendo ainda os primeiros subdividirem-se em elaborados e não elaborados. Os agregados artificiais podem ser de origem natural ou industrial.

Existe uma enorme diversidade de tipos de agregados leves, para fabricação de vários tipos de concretos leves com diferentes características mecânicas e físicas.

Agregados naturais

Os principais agregados nesta categoria são a diatomita, a pedra pomes, a escória, as cinzas vulcânicas e os tufos. Com exceção da diatomita, todos têm origem vulcânica. Como são encontrados apenas em algumas

partes do mundo, os agregados naturais não são utilizados extensivamente, mas com eles se obtêm concretos com resistência moderada.

Agregados artificiais

Estes agregados são, muitas vezes, conhecidos por uma grande variedade de nomes comerciais, mas podem ser classificados segundo a matéria-prima e o processo de fabricação que causa a expansão e, portanto, a redução da massa específica.

Os agregados leves fabricados a partir de materiais naturais são: argilas, xistos e escórias expandidas. Existem alguns outros agregados leves produzidos a partir de materiais naturais que produzem concretos leves, como a vermiculita e a perlita.

9.2 Agregado leve de argila expandida

A argila é um material proveniente da decomposição, durante milhões de anos, das rochas feldspáticas, muito abundantes na crosta terrestre. As argilas classificam-se em duas categorias: argilas primárias e argilas secundárias (ou sedimentares).

As argilas primárias são formadas no mesmo local da rocha-mãe, onde são pouco atacadas pelos agentes atmosféricos. Possuem partículas mais grossas e de coloração mais clara, são pouco plásticas, porém de grande pureza e possuem alto nível de fusão. O caulim é uma das argilas deste tipo.

Argilas secundárias são as que foram transportadas para mais longe da rocha-mãe, pela água, vento ou ainda pelo degelo. A água, em especial, tritura a argila em partículas de diferentes dimensões e fazem com que as

mais pesadas se depositem primeiro. As outras se vão depositando de acordo com o seu peso pelo decorrer do caminho. As secundárias são mais finas e plásticas que as primárias, podendo, no entanto, conter impurezas ao se misturarem com outras matérias orgânicas.

O mineral básico das argilas é a caulinita. A argila é um silicato de alumínio hidratado, composto por alumínio (óxido de alumínio), sílica (óxido de silício) e água. Uma partícula de argila é formada por uma molécula de alumínio (que contém dois átomos de alumínio e três de oxigênio), duas moléculas de sílica (que contém, cada uma, um átomo de silício e dois de oxigênio) e duas moléculas de água.

Os agregados leves de argila expandida são obtidos a partir do cozimento de argilas, que favorecem a expansão, por desenvolverem gases, numa fase de amolecimento da matéria a temperaturas de fusão iniciais. Em seguida, dá-se um rápido esfriamento, obtendo-se, assim, um produto superficialmente duro e leve, porque fica com uma textura interna celular (MORAVIA *et al.*, 2006).

10 CONCRETO LEVE

Os concretos leves são diferenciados dos concretos convencionais pela redução da massa específica e pelas alterações das propriedades térmicas. Além dessas características, os agregados leves ocasionam mudanças significativas em outras importantes propriedades dos concretos, como trabalhabilidade, resistência mecânica, módulo de deformação, retração e fluência, além de redução da espessura da zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento (ROSSIGNOLO, 2003).

10.1 Definições

Utiliza-se a designação de concreto leve para identificação de concretos com estrutura porosa, geralmente à base de ligantes hidráulicos, com massa específica inferior à dos concretos tradicionais, que podem ser obtidos com a utilização de agregados leves, com a incorporação de ar (concretos celulares) ou sem finos.

10.2 Vantagens e desvantagens do concreto leve

As vantagens dos materiais de baixa densidade são numerosas, por exemplo: redução do peso global, maior rapidez de construção e facilidade de transporte. O peso próprio de uma construção é um fator importante para o seu projeto, principalmente hoje em dia em que a tendência é a construção de

estruturas cada vez maiores. Por apresentar menor densidade que o tijolo, o concreto leve leva à redução no peso próprio da estrutura, o que conduz a ganhos na área física.

Com concretos mais leves, as fundações devem suportar pressões menores do que com concretos convencionais e, também, é menor a massa total dos materiais a serem transportados, resultando maior produtividade (LOURENÇO *et al.*, 2004).

Uma desvantagem dos concretos leves é a limitação da resistência destes, pela resistência dos agregados maiores. Esse problema pode ser minorado pela utilização de agregado com menor dimensão máxima. Outra desvantagem refere-se à necessidade de teores mais altos de cimento na produção de concretos leves em comparação aos concretos convencionais. Esses gastos adicionais podem ser compensados pela economia decorrente do menor peso próprio e da baixa condutibilidade térmica. No entanto, uma comparação criteriosa não se deve limitar ao custo dos materiais, mas deve tomar como base o projeto da estrutura com concreto leve.

10.3 Desenvolvimento histórico do concreto leve

O primeiro registro conhecido da utilização de uma mistura de pedrapomes com ligante à base de cinzas volantes e cal, na construção, remonta à época pré-colombiana (1100 a.C.), na cidade de El Tajin no México (VIEIRA, 2000).

Também os Romanos conheciam as qualidades do concreto leve, tendo executado algumas aplicações estruturais, recorrendo à combinação de ligante à base de cal com rochas vulcânicas. O Panteão de Roma, datado do ano 10 d.C., com uma altura idêntica a um edifício de 15 andares, é um exemplo de estrutura em que esse material foi utilizado para a construção de uma cúpula semi-esférica com diâmetro interno de 43 metros (MITIDIERI, 1976).

A produção comercial de argila expandida começou em 1928 nos Estados Unidos da América. Hoje em dia, é o agregado mais aplicado nos concretos leves. A argila representa aproximadamente 70% da produção de agregados leves. Na Europa, começaram-se a instalar as primeiras unidades industriais de produção de agregados leves a partir de 1938/39, inicialmente nos países nórdicos, em razão do seu clima rigoroso, pela necessidade da introdução na construção de materiais com boas características de isolamento.

Uma das grandes aplicações dos concretos leves na primeira metade do século XX foram os navios de concreto. Durante a Segunda Guerra Mundial, o aço escasseou, o que levou à construção de barcos com casco de concreto, que necessitavam apenas um terço do aço necessário para um barco convencional. Um exemplo dessas embarcações é o navio norte-americano USS Selma, construído em 1919. Análises realizadas na década de 1980 nessa embarcação, demonstraram que o concreto leve utilizado apresentou desempenho satisfatório de durabilidade, além da manutenção da resistência mecânica (HOLM & BREMNER, 1994).

10.4 Aplicação dos concretos leves

Recentemente, tem-se observado a aplicação do concreto leve de alto desempenho nos mais diversos tipos de estrutura, tais como plataformas

marítimas, pontes, recuperação estrutural e edifícios de múltiplos andares. Essas estruturas estão expostas aos mais variados ambientes, alguns deles extremamente agressivos, o que demonstra a grande versatilidade e a durabilidade desse material (ROSSIGNOLO, 2003).

O concreto leve foi aplicado em determinados elementos (lajes, por exemplo) de edifícios com muitos andares (ex.: Marina City Towers/EUA). Nesses edifícios, observa-se elevada redução do peso próprio da estrutura, com a conseqüente diminuição do número de pilares e de vigas, em relação ao que seria necessário com a utilização de concreto de densidade normal.

A utilização do concreto leve em edifícios deve-se não só à redução do peso próprio, que permite novas soluções estruturais para diversas propostas arquitetônicas, além de menores esforços aplicados às fundações, como também pelas melhores capacidades de isolamento térmico e de resistência ao fogo que este tipo de concreto apresenta.

As pontes também são uma das principais áreas de aplicação do concreto leve. Em países europeus como Alemanha, Holanda e Noruega, o concreto leve tem sido intensivamente utilizado para a construção de pontes de grandes dimensões, integral ou parcialmente, e com as mais variadas tipologias.

A utilização de concreto leve em pontes deve-se essencialmente à diminuição do peso próprio, reduzindo as cargas nas fundações e os esforços na estrutura. A redução do peso próprio permite ainda a construção de pontes com elementos pré-fabricados, que possam vencer vãos superiores aos alcançados com o concreto convencional.

11 COMPÓSITOS FIBROSOS

A produção de componentes construtivos esbeltos, com desempenho mecânico e isolamento termoacústico aceitáveis, reforçados com fibras celulósicas, combinadas ou não a fibras plásticas, é crescente em todo mundo, para produção de telhas onduladas, painéis de vedação vertical, forros e fachadas (HEINRICKS *et al.*, 2000).

No Brasil, o cimento amianto aparece como único compósito fibroso com larga escala de produção, apesar de da incompatibilidade das fibras de amianto crisotila com requisitos de segurança na construção civil. GIANNASI & THÉBAUD-MONY (1997) demonstraram que essas fibras minerais representam risco potencial à saúde humana, daí a principal razão para substituí-las.

Segundo SWAMY (1990), o emprego de matrizes reforçadas com fibras vegetais para produção de placas, telhas de cobertura e outros componentes pré-fabricados, pode representar significativa contribuição para o rápido crescimento da infra-estrutura urbana e rural desses países.

AGOPYAN (1991) estudou cimentos alternativos para uso em compósitos reforçados com fibras vegetais. O autor empregou cimentos de escória e à base de cinza de casca de arroz calcinada para obtenção de produtos hidratados menos alcalinos. TOLÊDO FILHO *et al.* (2003) afirmaram que, com a utilização de substâncias pozolânicas, pode-se reduzir a alcalinidade da matriz, bem como o conteúdo de hidróxido de cálcio, e assim, aumentar a sua durabilidade.

O uso de adições à matriz de cimento proporciona melhor empacotamento, dependendo da granulometria empregada, o que ajuda a

otimizar o desempenho do compósito fibroso. AIQIN & CHENGZHI (1997) concluíram que, quanto mais homogênea for a distribuição do tamanho das partículas, melhor será o empacotamento, e que, quanto mais homogênea for sua distribuição, melhor será seu grau de hidratação.

12 MATERIAIS E MÉTODOS

12.1 Obtenção dos materiais

a) Cama de frango

Foram coletadas inicialmente amostras em quantidade suficiente (aproximadamente 1 kg) para a análise e a caracterização de camas de frango, constituídos com base de casca de arroz.

Coletaram-se amostras de cama de frango da Prefeitura do Campus da USP de Pirassununga, onde as aves são criadas para utilização em experimentos de pesquisa.

b) Bagaço de cana-de-açúcar

As amostras de bagaço e cinzas de cana-de-açúcar foram obtidas diretamente de uma usina sucro-alcooleira da região de Pirassununga (Usina São Luiz) nos meses de agosto e setembro de 2004. As cinzas foram obtidas sob condições de queima não controlada em fornalha.

c) Casca de arroz

As amostras de casca de arroz foram obtidas diretamente de uma usina de beneficiamento de arroz da região de Itu (Alibabá Alimentos).

Todos os resíduos foram colocados separadamente em sacos plásticos e armazenados em ambiente seco e ventilado, antes da realização da caracterização e da queima.

12.2 Análise bromatológica dos resíduos

As análises bromatológicas dos resíduos foram realizadas no Laboratório de Bromatologia da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA) da Universidade de São Paulo em Pirassununga, SP, com o objetivo de verificar a composição dos resíduos coletados. As análises foram: matéria seca, proteína bruta, fibra bruta, extrato etéreo, matéria mineral, extrato não nitrogenado, fibra detergente neutro (FDN), fibra detergente ácido (FDA) e lignina, conforme DI CAMPOS (2005).

12.3 Queima dos materiais

As queimas iniciais da cama de frango foram realizadas em forno tipo mufla (Figura 5), na Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia (Coppe) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), em outubro de 2005, em laboratório sob responsabilidade do Prof. Dr. Romildo Dias Toledo Filho, sob supervisão do Prof. Dr. Guilherme Cordeiro.

Queimaram-se as camas de frango com rampa de aquecimento de 10°C/min, até se alcançar a temperatura de 600°C, permanecendo nessa temperatura por 3 h, e seguido de resfriamento natural após esse período.

Figura 5. Visão externa e interna do forno tipo mufla da Coppe - UFRJ.

Após a aprovação do pedido de Auxílio à Pesquisa da Fapesp (processo nº 05/03060-8), comprou-se um forno do tipo mufla, marca Fornos Jung Modelo: LF9610 (medidas da câmara interna: 40cm x 40cm x 60cm; temperatura máxima: 1000°C, com programação automática), para a queima do restante do material no Laboratório do Grupo de Construções e Ambiente da FZEA USP. A casca de arroz, assim como o bagaço de cana-de-açúcar, foram queimados sob condições idênticas às aquelas utilizadas na Coppe UFRJ (Figura 6).

Figura 6. Visão da câmara e detalhe das bandejas com resíduos no interior do forno tipo mufla adquirido na FZEA USP.

As cinzas do bagaço de cana-de-açúcar foram coletadas em usinas sucro-alcooleiras, provenientes da utilização do bagaço para geração de energia. Com base nos resultados apresentados por essas cinzas nas análises químicas (descritos no item 12.2 em Resultados), que apresentaram elevados teores de perda ao fogo, optou-se pela realização de sua segunda queima.

12.4 Moagem das cinzas

Após incineração, as cinzas obtidas passaram por processo de moagem em moinho de jarros com cargas esféricas cerâmicas, disponível no Laboratório de Construções e Ambiente da FZEA/USP. As cinzas foram colocadas no interior do jarro, com capacidade de 7 L, em conjunto com as esferas cerâmicas. O jarro foi fechado e colocado sobre os roletes cilíndricos motorizados do gabinete do moinho, que, após o acionamento do moinho, fez com que, através de movimentos circulares rápidos (100 rpm) no sentido horizontal do jarro, as esferas fossem direcionadas em sentido contrário às paredes internas do jarro, pulverizando as cinzas. O moinho permaneceu em funcionamento durante aproximadamente 10 h por batelada. As cinzas, após a moagem, passaram por peneiramento em peneira ABNT malha #325 (abertura de 45 μm) (NBRNM 3310-1, 1997).

Partiu-se da premissa de que apenas 35% da cinza deve ficar retida na peneira de malha #325, no máximo, segundo a norma europeia NP EN450-1 (2006) e de acordo com resultados encontrados por ASAVAPISIT & RUENGRIT (2005) e RAMAMURTHY & HARIKRISHNAN (2006). A reatividade da cinza de casca de arroz está ligada a sua área superficial, e, geralmente, a sua reatividade é favorecida pelo aumento da finura (BUI *et al.*, 2005).

Figura 7. Cinzas de cama de frango antes da moagem (escala com divisões menores em mm e maiores em cm).

12.5 Análise química das cinzas

As análises químicas das amostras dos resíduos foram realizadas no Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. As análises químicas foram realizadas pelo método semiquantitativo por espectrometria de fluorescência de raios-X (DELLA *et al.*, 2001) e os resultados encontram-se no item 12.2.

O ensaio para cálculo da atividade pozolânica foi realizado no Laboratório de Construções e Ambiente da FZEA USP, em Pirassununga, SP. Seguiu o método indireto proposto por LUXÁN *et al.* (1989), pelo qual a atividade pozolânica é relacionada com a medida da condutividade elétrica para cada material proposto em uma solução saturada de hidróxido de cálcio em determinado intervalo de tempo.

Para o cálculo da atividade pozolânica, segundo o método apresentado, calcula-se a variação da condutividade da cinza entre os 120 s iniciais. Após esse cálculo, compara-se o resultado com os padrões apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. Avaliação da atividade pozolânica pela medida da condutividade.

Classificação do material	Variação na condutividade (mS/cm)
Não pozolânico	Menor que 0,4
Média pozolanicidade	Entre 0,4 e 1,2
Boa pozolanicidade	Maior que 1,2

12.6 Análise física das cinzas

As caracterizações físicas (microscopia eletrônica de varredura – MEV e espectrometria por dispersão de energia – EDS iniciais) das cinzas foram realizadas no Microscópio Electrónico de Varrimento de alta resolução, com Microanálise por Raios X e sistema para observação de amostras a baixa temperatura: FE - CryoSEM / EDS JEOL JSM 6301F/ Oxford INCA Energy 350 / Gatan Alto 2500 na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal. Os ensaios de distribuição granulométrica (método Malvern), identificação de fases cristalinas por difração de raios X (realizado no Difractômetro de Raios-X MPD 1880, Philips, para análise de estruturas cristalinas), área superficial específica por BET, densidade em picnômetro e microscopia eletrônica de varredura (realizado no Microscópio eletrônico de varredura, LEO 440, com detetores de elétrons secundários e retroespalhados, catodoluminescência e corrente de amostra. Acoplado a sistemas de microanálise química por EDS e WDS, OXFORD Isis (EDS) integrado com Microspec 600i (WDS)) foram realizados no Laboratório de Caracterização Tecnológica no Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

12.7 Aplicação das cinzas em materiais à base de cimento

12.7.1 Produção dos compósitos fibrosos

12.7.1.1 Materiais

Cimento

O cimento utilizado para a produção dos compósitos fibrosos foi o CII E (com adição de escória), de acordo com as especificações técnicas indicadas em NBR 11578 (1991).

Tabela 9. Composição química do cimento CP II-E*.

	Valores (% em massa)
Perda ao fogo (PF)	4,78
Dióxido de silício (SiO_2)	21,24
Óxido de alumínio (Al_2O_3)	4,99
Óxido de ferro (Fe_2O_3)	2,71
Óxido de cálcio (CaO)	57,91
Óxido de magnésio (MgO)	3,99
Trióxido de enxofre (SO_3)	2,08
Óxido de potássio (K_2O)	0,02
Óxido de sódio (Na_2O)	0,08
Anidrido carbônico (CO_2)	3,98
Cal livre (CaO livre)	0,72
Resíduo insolúvel (RI)	1,11
Equivalente alcalino em Na_2O	0,49

*Valores de acordo com o fabricante.

Fibras

Utilizaram-se, para a produção dos compósitos fibrosos, polpas celulósicas refinadas (refinador de discos) de fibras de eucalipto (*Eucalyptus grandis*) (fibra de eucalipto branqueado VCP da Votorantim) caracterizadas na Tabela 10, e fibras sintéticas (polipropileno Saint Gobain).

Tabela 10. Características das fibras de eucalipto.

	Valor
Massa específica (kg/m ³)	1609
Massa específica aparente (kg/m ³)	230
Volume de vazios permeáveis (% em volume)	89
Absorção de água (% em massa)	643
Comprimento médio (mm)	0,66
Espessura da fibra (µm)	10,9
Relação de aspecto	61
Número Kappa	6,1
Finos (% em massa)	7,01
Massa por unidade de comprimento (mg/m)	0,107

Fonte: SAVASTANO JUNIOR, 2000.

O Número Kappa é uma medida laboratorial indireta do conteúdo de lignina residual presente na polpa, geralmente utilizado na indústria papeleira, em conjunção com processos relacionados ao branqueamento da fibra, para polpas com rendimento inferior a 70%. O método se baseia no consumo de permanganato, que em soluções ácidas reage rapidamente com lignina, mas lentamente com celulose. O interesse na sua determinação está na inter-relação existente entre o envelhecimento de fibras vegetais em meios alcalinos e o seu conteúdo de lignina.

Finos foram considerados como as partículas de comprimento inferior a 0,2mm, independente de sua natureza ou formato.

A massa por unidade de comprimento do filamento está relacionada à área da seção transversal da parede celular. Essa característica física influencia o número total de fibras presente por unidade de massa da amostra, bem como a configuração espacial da malha de fibras e ainda a resistência individual de cada fibra (SAVASTANO JUNIOR, 2000).

As propriedades mecânicas do polipropileno podem ser consideradas amplas devido a sua cristalinidade: com um ponto de fusão relativamente alto, a fase cristalina retém resistência mecânica a altas temperaturas. A baixas temperaturas o polipropileno é limitado pela sua fragilização na temperatura de transição vítrea (onde as regiões amorfas tornam-se vítreas). Para evitar tal fragilidade o polipropileno é copolimerizado com o etileno.

Calcário

Segue, na Tabela 11 a composição aproximada do calcário (calcário moído Minercal[®]) utilizado para a produção dos compósitos fibrosos.

Tabela 11. Composição aproximada do calcário*.

	Teor em massa (%)
Perda ao fogo	41,0
SiO ₂	7,6
CaO	28,0
Al ₂ O ₃	1,8
Fe ₂ O ₃	1,3
MgO	19,2
K ₂ O	0,5
SO ₃	0,6

*Valores de acordo com o fabricante.

12.7.1.2 Produção

A produção e a caracterização dos compósitos foi realizada no Laboratório de Construções e Ambiente da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo.

Foram moldados corpos-de-prova com formato de placas de dimensões 160 x 160 mm e 6 mm de espessura. O processo de produção consiste na mistura das matérias-primas, seguida de drenagem a vácuo do excesso de água, prensagem entre 2 e 4 MPa (Figuras 8). Tal procedimento é uma reprodução de processos adotados em estudos anteriores (SAVASTANO JUNIOR *et al.*, 2000) e foi concebido a partir do modelo Hatschek, utilizado pela indústria de fibrocimento para produção de placas planas e onduladas de grandes dimensões

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 8. Produção dos corpos-de-prova: (a) Mistura das matérias-primas (b) Câmara de vácuo (c) Prensagem das placas (d) Placas moldadas.

Foram fabricados compósitos com matriz à base de cimento Portland comum, com reforço de polpa de celulose de eucalipto e fibras sintéticas de polivinil álcool importadas. O teor em massa total de fibra utilizado foi da ordem de 5% da matéria-prima (material sólido) com base em estudos prévios realizados por SAVASTANO JUNIOR *et al.* (2002). Foram utilizados quatro teores de cinza para cada um dos três resíduos (0%, 10%, 15% e 20% em massa seca das matérias-primas), em substituição ao cimento Portland (Tabela 12), segundo estudo correlato (CINCOTTO *et al.*, 1990) com adição da cinza de casca de arroz.

Tabela 12. Formulações dos compósitos reforçados com fibras (% em massa).

	0% cinza	10% cinza	15% cinza	20% cinza
Fibra vegetal	3	3	3	3
Fibra sintética	2	2	2	2
CP II E	80	70	65	60
Calcário	15	15	15	15
Cinzas	0	10	15	20
Total	100	100	100	100

12.7.2 Caracterização dos Compósitos Fibrosos

As placas após a prensagem, foram acondicionadas em sacos plásticos selados e com pouco ar em seu interior para manutenção da atmosfera saturada. Estas embalagens foram mantidas em temperatura de laboratório por um período de sete dias. Após este período as embalagens foram abertas e as placas foram imersas em água.

Após o período de cura (28 dias), oito corpos-de-prova 160 x 40 mm, por série, foram cortados com serra circular refrigerada à água. Os corpos-de-prova foram mantidos em ambiente laboratorial e submetidos, aos 28 dias de idade, a ensaio mecânico de tração na flexão com quatro cutelos, vão inferior de 135 mm, velocidade de carga 1,5 mm/min, equipamento Emic DL 30000, equipado com célula de 1 kN, programa de controle Tesc v. 1.13 e deflectômetro com curso de 12 mm para determinação da deformação, conforme GATTO *et al.* (2003) e EUSEBIO *et al.* (1998). Esses ensaios permitiram a obtenção do módulo de ruptura, do limite de proporcionalidade e do módulo de elasticidade do compósito. Os ensaios mecânicos foram todos realizados com os corpos-de-prova na condição saturada com superfície seca (Figura 9).

Figura 9. Ensaio mecânico de tração na flexão.

O limite de proporcionalidade (LOP) foi calculado a partir do ensaio de flexão, conforme a equação 2:

$$LOP = \frac{P_1 \cdot L_v}{b \cdot h^2} \quad (2)$$

Onde: P1: força máxima aplicada (N);

Lv: espaçamento entre os cutelos inferiores (mm);

b: largura do corpo-de-prova (mm);

h: espessura do corpo-de-prova (mm).

O módulo de ruptura (MOR) e o módulo de elasticidade (MOE) foram determinadas, conforme as equações 3 e 4:

$$MOR = \frac{P \cdot L_v}{b \cdot h^2} \quad (3)$$

$$MOE = \frac{276 \cdot L_v^3}{1296 \cdot b \cdot h^3} \left(\frac{P}{\delta} \right) \cdot 100 \quad (4)$$

Onde: P: força máxima (N);

Lv: distância entre os cutelos de apoio inferiores (mm);

b: largura do corpo-de-prova (mm);

h: espessura do corpo-de-prova (mm);

δ : deformação do corpo-de-prova.

A energia específica é definida pela energia absorvida dividida pela seção transversal do corpo-de-prova, e foi determinada segundo a equação 5:

$$\text{Energia específica} = \frac{\text{Energia absorvida}}{b \cdot h} \quad (5)$$

Onde: b: largura do corpo-de-prova (mm);

h: espessura do corpo-de-prova (mm);

As propriedades físicas (massa específica, absorção de água e porosidade) foram determinadas de acordo com metodologia da norma NBR 5642 (1993), a partir dos mesmos corpos-de-prova utilizados nos ensaios mecânicos (Figura 10).

Figura 10. Pesagem do corpo-de-prova imerso em água, durante ensaio físico para determinação das propriedades físicas.

A Equação 6 foi utilizada para o cálculo da absorção de água dos compósitos fibrosos:

$$\text{Absorção (\%)} = \left(\frac{M_{ss} - M_s}{M_s} \right) \cdot 100 \quad (6)$$

Onde: M_{ss} : massa do compósito saturado em superfície seca (g);

M_s : massa do compósito seco em estufa ventilada (g).

A porosidade aparente foi determinada segundo a equação 7:

$$\text{Porosidade (\%)} = \left(\frac{M_{ss} - M_s}{M_{ss} - M_{im}} \right) \cdot 100 \quad (7)$$

Onde: M_{ss} : massa do compósito saturado em superfície seca (g);

M_s : massa do compósito seco em estufa ventilada (g);

M_{im} : massa do compósito imerso (g).

Para a determinação da densidade aparente, utilizou-se a equação 8:

$$\text{Densidade (g/cm}^3\text{)} = \left(\frac{M_s}{M_{ss} - M_{im}} \right) \cdot \rho \quad (8)$$

Onde: M_{ss} : massa do compósito saturado em superfície seca (g);

M_s : massa do compósito seco em estufa ventilada (g);

M_{im} : massa do compósito imerso (g);

ρ : densidade da água (g/cm³).

Os demais corpos-de-prova (divididos em séries de pelo menos oito repetições), foram submetidos ao processo de envelhecimento acelerado, por meio de 100 ciclos de imersão-secagem, de acordo com o procedimento descrito na norma ISO 9933 (1995) (Figura 11). Cada ciclo compreende uma imersão em água a temperatura ambiente durante 18 horas, e secagem em estufa ventilada a $60^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ com umidade relativa inferior a 20% durante 6 horas. Após esse ensaio de envelhecimento, os corpos-de-prova foram submetidos aos mesmos ensaios de caracterização física e mecânica descritos no presente item.

Figura 11. Corpos-de-prova imersos em água fria, durante ensaio de envelhecimento acelerado de imersão-secagem.

Após os ensaios físicos e mecânicos foi realizado o estudo da zona de transição fibra-matriz dos compósitos fibrosos no Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica/USP. As amostras dos compósitos foram cortadas em dimensões adequadas à porta-amostras. O embutimento das amostras foi realizado utilizando-se uma resina epoxy. Após 24 horas as amostras foram submetidas ao processo de polimento no Departamento de Engenharia Civil da Escola Politécnica/USP. Inicialmente o polimento das amostras foi realizado utilizando-se lixas de carbeto de silício e o polimento final foi realizado com pasta de diamante.

12.7.3 Produção do Concreto Leve

12.7.3.1 Materiais

Argila expandida

A argila expandida utilizada no presente estudo está referenciada por LECA Estrutural 2/4, estando esta designação associada à granulometria do agregado (2 a 4 mm). O material foi cedido pela empresa MAXIT (Figura 12).

Figura 12. Grãos de argila expandida. Escala com divisões menores em mm e maiores em cm na parte superior da régua.

Agregado miúdo

O agregado fino utilizado na composição dos concretos leves em estudo foi uma areia fina fornecida pela empresa MAXIT.

Cimento

O cimento é o constituinte hidráulico do concreto que mais se impõem pelo seu desempenho e pelo fator econômico. Os conhecimentos sobre as matérias-primas e o processo produtivo, os principais compostos no estado anidro, o processo de hidratação, os principais compostos no estado hidratado, assim como os diferentes tipos e classes de cimento e suas características, são importantes para uma correta escolha do ligante a utilizar.

Após cuidadosa leitura das fichas técnicas dos vários cimentos disponíveis no mercado português, escolheu-se como ligante um cimento Portland do tipo CEM I 42,5 R, de acordo com as definições indicadas no documento normativo NP EN 197-1 (2001) (referência brasileira NBR 11578 – ABNT, 1991). O CEM I 42,5 R segundo o fabricante, apresenta o clínquer como maior constituinte ($\geq 95\%$), possui desenvolvimento rápido das resistências mecânicas e elevadas resistência a todas as idades. Apresenta valores mínimos de resistência à compressão de 20 Mpa (aos 2 dias) e 42,5 Mpa (aos 28 dias).

Aditivo

Designa-se por adjuvante a substância utilizada em porcentagem inferior a 5% da massa do cimento, adicionada durante a amassadura, aos componentes normais das argamassas e concretos, com o fim de modificar certas propriedades destes materiais, quer no estado fluido, quer no estado sólido, quer ainda no momento da passagem de um estado a outro (COUTINHO, 1988).

Esta definição não engloba as substâncias minerais moídas que se juntam ao concreto, como pozolanas e escórias, que são adicionadas em proporções muito maiores do que 5% para atuarem significativamente nas propriedades do cimento Portland.

Tendo em conta o descrito anteriormente, e analisando as fichas técnicas dos vários adjuvantes disponíveis, foi utilizado nas amassaduras um superplastificante de terceira geração para concretos denominado de Sika ViscoCrete 3002 HE, estando conforme a NP EN 934-2 (2003) (referência brasileira NBR 11768 – ABNT, 1992).

A escolha efetuada teve como objetivo reduzir a relação água/cimento mantendo uma consistência fluida, possibilitando assim a produção de concretos de melhor desempenho.

O adjuvante Sika ViscoCrete 3002 HE apresenta-se na forma de um líquido castanho claro, levemente turvo, tendo base em uma solução aquosa de policarboxilatos modificados, com massa volúmica aproximada de 1,06 kg/L, pH em torno de 4,3 e teor de sólidos de 26,5% aproximadamente.

Água

A água potável utilizada em todas as amassaduras foi proveniente da rede pública de abastecimento do Porto. Sendo água potável, de acordo com o ponto 3.1 da norma NP EN 1008 (2003) (referência brasileira NM 137 – ABNT, 1997) apresenta características satisfatórias para ser utilizada como água de amassadura na fabricação de concretos, o que está de acordo com a NP EN 206-1 (2005) (referência brasileira NBR 12655 - ABNT, 2006).

Sílica de fumo

A sílica de fumo é um subproduto da preparação do silício ou de ligas de silício, especialmente de ferro-silício, em fornos elétricos de arco, onde o quartzo é reduzido pelo carvão, a elevadas temperaturas.

As matérias-primas introduzidas no forno variam com o produto que se pretende obter, sendo constituídas por quartzo, carvão e pedaços de madeira, na fabricação do silício. As reações químicas que têm lugar são complexas, mas uma delas envolve a formação de monóxido de silício (SiO), que se oxida e condensa em pequenas esferas de sílica amorfa. Essas partículas são arrastadas nos gases de escape e captadas em filtros de saco, antes da sua saída para a atmosfera, obtendo-se assim a designada sílica de fumo ou sílica ativa (COUTINHO, 1988).

A sílica de fumo é constituída fundamentalmente por dióxido de silício, cujo teor é superior a 90%, no caso da produção do silício, e por pequenas quantidades de óxidos de alumínio, ferro, cálcio e magnésio, em teores normalmente inferiores a 1%. A proporção relativa desses compostos varia de acordo com a liga metálica que se está produzindo, podendo o teor de dióxido de silício diminuir para cerca de 80%, na fabricação de algumas ligas de ferro-silício, ou para 50% ao se produzir cálcio-silício.

A dimensão das partículas varia entre 0,01 e 0,5 μm , com um valor médio próximo de 0,1 μm , o qual é cerca de 100 vezes inferior à dimensão média das partículas de cimento Portland. A superfície específica é elevada, chegando a atingir 20 m^2/g , medida por adsorção do nitrogênio.

A massa volúmica é da ordem dos 2,2 g/cm^3 , podendo-se, no entanto, aumentar para 3,0 g/cm^3 , no caso da fabricação de ligas de silício e manganês. A baridade da sílica de fumo proveniente da preparação do silício é cerca de 250 kg/m^3 , o que origina dificuldades no seu transporte e manuseio.

12.7.4 Caracterização da argila expandida

Granulometria

A granulometria de um agregado traduz-se numa curva de frequência ponderal das classes elementares das dimensões das partículas, definidas pelas malhas das peneiras utilizadas. Nas Tabelas 13 e 14, apresentam-se as séries referentes às normas americana (ASTM) e europeia (CEN) (LOURENÇO *et al.*, 2004).

Tabela 13. Série de peneiras CEN.

SÉRIES EUROPÉIAS (CEN)					
Série principal		Série principal + Série 1		Série principal + Série 2	
Nº série	Malha (mm)	Nº série	Malha (mm)	Nº série	Malha (mm)
10	63	10	63	10	63
9	31,5		45		40
8	16	9	31,5	9	31,5
7	8		22,4		20
6	4	8	16	8	16
5	2		11,2		14
4	1	7	8		12,5
3	0,500		5,6		10
2	0,250	6	4	7	8
1	0,125	5	2		6,3
0	0,0625	4	1	6	4
	Fundo	3	0,500		3,15
		2	0,250	5	2
		1	0,125	4	1
		0	0,0625	3	0,500
			Fundo	2	0,250
				1	0,125
				0	0,0625
					Fundo

Tabela 14. Série de peneiras ASTM.

SÉRIES AMERICANAS (ASTM)			
Série principal		Série principal + Secundária	
Nº série	Malha (mm)	Nº série	Malha (mm)
10	76,1	10	76,1
9	38,1		50,8
8	19,0	9	38,1
7	9,51		25,4
6	4,76	8	19,0
5	2,38		12,7
4	1,19	7	9,51
3	0,595		6,35
2	0,297	6	4,76
1	0,149	5	2,38
0	0,075	4	1,19
	Fundo	3	0,595
		2	0,297
		1	0,149
		0	0,075
			Fundo

Existe uma variedade muito grande de granulometrias de argilas expandidas disponíveis no mercado, sendo que a escolha consiste no tipo de concreto a ser produzido.

A dimensão individual das partículas e sua dimensão granulométrica exercem grande influência nas propriedades do concreto leve e relacionam-se com outras características destes materiais. É de se destacar que o emprego de partículas de menor dimensão conduz, em geral, à maior resistência mecânica, bem como ao aumento da massa volúmica e da rigidez, e ainda ao aumento da condutibilidade térmica.

A determinação da distribuição granulométrica dos agregados leves de argila expandida faz-se de modo idêntico ao que se pratica para os agregados correntemente utilizados (Figura 13). As curvas granulométricas foram obtidas segundo a norma NP EN 933-1 (2000) (referência brasileira NBR NM 248 – ABNT, 2003).

Figura 13. Realização do ensaio de granulometria segundo a norma NP EN 933-1 (2000).

Massa volúmica

A determinação da massa volúmica das partículas secas é essencial para o estudo de composição de concretos de agregados leves. Mas as dificuldades são várias, como, por exemplo, definir o volume das partículas a partir do volume deslocado por imersão (Figura 14). De fato, uma parcela do fluído de ensaio penetra nos poros abertos (à superfície das partículas e ligados a poros interiores), o que afeta o volume de fluído deslocado, que será menor do que se a superfície fosse impermeável. Além disso, a quantidade e os tipos de poros penetrados pelo fluído dependem também das características do fluído penetrante. Os ensaios são geralmente realizados com água, resultando em penetração excessiva. Na realidade, os poros são envolvidos pela pasta de cimento, pelo que, provavelmente, a pasta não “penetraria” nos poros mais estreitos (COUTINHO, 2005).

Define-se massa volúmica como a relação entre a massa e o volume total dos grãos com os poros incluídos, sendo a porosidade um fator que muito a condiciona.

Para os agregados de argila expandida, a porcentagem total de vazios dos grãos é superior à dos agregados naturais. Esta atinge um valor entre 50 e 75%, sendo que a porosidade fechada representa uma parcela relativamente reduzida desses vazios (5 a 20%). A quantidade, a conectividade e a dimensão dos poros influenciam a velocidade de absorção de água pelo material.

A determinação da massa volúmica das partículas secas e das partículas saturadas com superfície seca, realizou-se segundo o procedimento descrito na NP EN 1097-6 (2003) (referência brasileira NBR NM 53 – ABNT, 2006).

Figura 14. Ensaio para determinação de massa volúmica.

Absorção

A absorção, que se define como sendo a relação entre a massa de água absorvida e a massa das partículas no estado seco, é uma das características mais importantes dos agregados leves, pela influência que tem no desempenho do concreto, tanto no estado fresco, como no estado endurecido.

A totalidade da água absorvida (estado de saturação), assim como a evolução da absorção ao longo do tempo, dependem do valor da porosidade, da distribuição e da conectividade entre poros, das características da superfície e da água previamente incorporada.

A utilização de agregados porosos é freqüentemente considerada como um fator que, em geral, incrementa a permeabilidade do concreto, mas, felizmente, esta relação não é tão comum. Na relação porosidade-permeabilidade, é essencial o tipo de conexão entre os poros. Um material pode ser poroso sem ser permeável, se os seus poros não estiverem conectados.

Num concreto leve, a absorção de água pela pasta é acompanhada pela expulsão do ar dos agregados, formando-se uma camada de bolhas que fragiliza a zona de interface pasta/agregado. Um procedimento utilizado normalmente para diminuir esse efeito consiste em reamassar o concreto depois de um determinado período de espera, conseguindo-se assim distribuir as bolhas pela pasta.

O conhecimento da capacidade de absorção de água pelos grãos é de extrema importância. Na normalização, tal capacidade está limitada, pois pode ter efeitos negativos nas propriedades do concreto endurecido. É de se destacar, por exemplo, que um teor elevado de água, nos poros dos grãos, potencializa o aumento das tensões internas por retração não uniforme no processo de secagem, aumentando assim o risco de fissuração. A água

absorvida aumenta ainda a massa volúmica e a condutibilidade térmica. A água retida nos poros também tem influência na evolução da resistência do concreto com o tempo, e revela tendência para o maior crescimento de resistência.

A determinação da absorção de água à pressão atmosférica foi realizada segundo a NP EN 1097-6 (2003) (referência brasileira NBR NM 53 – ABNT, 2006), efetuando-se a medição desta propriedade para um período de tempo igual a 24 h.

12.7.5 Análises físicas das cinzas e cimento Portland

Foram analisadas, no Centro de Materiais da Universidade do Porto (CEMUP), amostras das cinzas, assim como do cimento anidro, utilizadas na formulação. Também realizou-se a caracterização das microestruturas dos fragmentos do ensaio mecânico para as diferentes formulações. As cinzas foram fixadas em um porta-amostras com ajuda de filme de carbono e levadas para deposição da camada de ouro (para evitar os efeitos da concentração de carga do feixe eletrônico). Os fragmentos do material cimentício foram fixados no porta-amostras com ajuda de cola epóxi tipo Araldite®.

12.7.6 Produção do concreto leve

Foi considerada a quantidade de água de absorção de 7% da massa do agregado leve na composição dos concretos. Este valor corresponde sensivelmente à absorção ao fim de 5 min, como se sabe por trabalhos anteriores (LOURENÇO *et al.*, 2004).

As quantidades utilizadas e o traço das argamassas estudadas estão respectivamente indicados nas Tabelas 15 e 16.

Tabela 15. Quantidades (em gramas) utilizadas para a fabricação das argamassas.

	Controle	10% CCA	10% CCF	10% SF	10% CAZ
Cimento CEM1 42,5R	445,00	400,50	400,50	400,50	400,50
Cinza	-	44,50	44,50	-	44,50
Sílica de fumo	-	-	-	44,50	-
Superplastificante	6,23	10,00	10,00	10,00	10,00
Leca	362,32	362,32	362,32	362,32	362,32
Areia	618,11	618,11	618,11	618,11	618,11
Água	155,75	169,10	169,10	169,10	169,10
Água absorção (7%)	25,36	25,36	25,36	25,36	25,36
Água total	181,11	194,46	194,46	194,46	194,46

Tabela 16. Traços em peso (em relação à massa de ligante).

	Ligante		Areia	Leca	Água	Superplastificante
	Cimento	Cinza				
Controle	1,00	0,00	1,39	0,81	0,41	0,014
10% CCA	0,90	0,10	1,39	0,81	0,44	0,022
10% CCF	0,90	0,10	1,39	0,81	0,44	0,022
10% SF	0,90	0,10	1,39	0,81	0,44	0,022
10% CAZ	0,90	0,10	1,39	0,81	0,44	0,022

Para determinação do diâmetro de espalhamento das argamassas no estado fresco, foi seguido o procedimento descrito no item 10.3.1 da norma ASTM C 109 (Figura 15) (referência brasileira NBR NM 68 – ABNT, 1998). A mesa e o molde utilizados estão de acordo com a norma ASTM 230 (1998) (referência brasileira NBR NM 68 – ABNT, 1998).

O procedimento consiste no seguinte:

1. Limpeza e secagem cuidadosas da superfície da mesa de espalhamento.
2. Colocação do molde tronco-cônico no centro da mesa.
3. Colocação no molde de uma camada de aproximadamente 25 mm de espessura.
4. Compactação da camada com 10 pancadas com o pilão normalizado (de borracha ou madeira, secção quadrada 13 x 13 mm e comprimento de 120 a 150 mm), de modo a uniformizar o enchimento do molde.
5. Completação do enchimento e compactação com mais 10 pancadas.
6. Alisamento da superfície com movimentos de serrilha com uma régua normalizada (100 a 150 mm).
7. Limpeza e secagem da mesa.
8. Retirada do molde na vertical, durante 10 a 15 s, após o final da operação de nivelamento da superfície da argamassa.
9. Na sequência, espalhamento com 15 quedas da mesa em 15 s, com auxílio da manivela.
10. Medida de pelo menos quatro diâmetros eqüidistantes.
11. Cálculo do valor médio do diâmetro de espalhamento.
12. O espalhamento é o aumento médio do diâmetro de espalhamento em relação ao diâmetro original (100 mm).

A trabalhabilidade, segundo o procedimento descrito, teve como objetivo obter um espalhamento de 200 ± 10 mm.

Figura 15. Ensaio de trabalhabilidade (*flow table*).

Para fabricação dos provetes (4 x 4 x 16 cm), foi seguido, em geral, o procedimento descrito na NP EN 196-1 (1996) (referência brasileira NBR 7215 – ABNT, 1996). Após a pesagem de todos os materiais, inicialmente colocou-se, na misturadora, a argila expandida e parte da água de amassamento (1/3 do total). Efetuou-se a mistura em rotação lenta (140 rpm) por 2 min. Após decorrido esse período, desligou-se a misturadora e efetuou-se um período de “descanso” da mistura por 3 min, para melhor hidratação da argila expandida. A seguir, colocou-se o restante dos materiais. O superplastificante foi dosado e diluído a uma quantidade fixa de água retirada da água de amassamento, e a cinza, quando utilizada, foi misturada previamente ao cimento. Colocou-se a misturadora em rotação lenta por 150 s, e depois em rotação rápida (285 rpm) por mais 90 s (Figura 16).

Realizou-se a moldagem por compactação. Os provetes produzidos permaneceram no molde por 24 horas e em seguida realizou-se a desforma e colocação dos provetes em bandejas com água, permanecendo imersos por 48 horas. A partir desse período (conforme idade de ensaio) os provetes foram ensaiados.

Figura 16. Fabricação dos concretos leves em misturadora com movimento planetário da pá.

12.7.7 Ensaios dos concretos

As propriedades mecânicas foram determinadas de acordo com a norma NP EN 196-1 (1996) (referência brasileira NBR 7215 – ABNT, 1996).

12.7.7.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão é um dos fatores mais importantes dos concretos leves estruturais (Figura 17). Essa propriedade é afetada por vasto conjunto de fatores, nomeadamente, a densidade e a resistência dos agregados aplicados, podendo, assim, produzirem-se concretos com altas resistências à compressão.

Figura 17. Ensaio de resistência a compressão.

12.7.7.2 Resistência à flexão

Os concretos leves apresentam valores de resistência à tração na flexão ligeiramente inferiores aos dos concretos de densidade normal, para o mesmo nível de resistência à compressão (Figura 18). A resistência à tração na flexão dos concretos de agregado leve é influenciada pela resistência à tração dos agregados e da argamassa, e pela aderência entre os agregados e a matriz.

Figura 18. Ensaio de resistência à tração na flexão.

12.7.7.3 Resistência à penetração de cloretos pelo método rápido CTH

O método rápido CTH (Chalmers Tekniska Högskola) foi desenvolvido na Suécia (Chalmers University of Technology), posteriormente regulamentado pela norma NT BUILD 492 (1999) e recentemente adotado na especificação do LNEC E 463 (2004). Este método não estacionário baseia-se numa relação

teórica entre os fenômenos de difusão e migração e através do qual se pode determinar a profundidade de penetração dos cloretos ou o seu perfil.

A medição da profundidade de penetração dos cloretos é efetuada pelo processo colorimétrico sobre as superfícies de fratura dos provetes abertos por compressão linear. O processo colorimétrico permite realçar as zonas do provete onde existiu penetração de cloretos (zona mais clara na Figura 19), facilitando a definição do perfil de penetração. Assim, utilizando a 2ª lei de Fick e a profundidade média de penetração dos cloretos, calcula-se o coeficiente de difusão aparente (D_{ns}).

Figura 19. Profundidade de penetração de cloretos.

Ainda utilizando o ensaio CTH, é possível determinar a resistividade do concreto. A resistividade é uma propriedade intrínseca dependente da capacidade do concreto para transportar carga elétrica e que, por sua vez, depende da natureza e da topografia da estrutura porosa, da distribuição de água, da concentração iônica na solução intersticial e da temperatura. Compreende-se que, pelo fato de todos os provetes no ensaio CTH se encontrarem nas mesmas condições, esta medida permita avaliar a estrutura porosa do concreto, constituindo uma valiosa informação do ponto de vista da durabilidade. Após a montagem do provete na respectiva célula de difusão, aplica-se uma diferença de potencial conhecida e mede-se a intensidade de corrente que passa através do provete (Figura 20). A partir dos valores de potencial e da intensidade de corrente, a resistividade elétrica do provete é determinada pela Lei de Ohm, conforme se indica a equação 9:

$$R = \frac{V}{I} \Leftrightarrow R = \rho \frac{L}{A} \Leftrightarrow \rho = \frac{V.A}{L.I} \quad (9)$$

Onde:

R: Resistência elétrica (Ω);

I: Intensidade da corrente (A);

V: Diferença de potencial (V);

ρ : Resistividade elétrica ($\Omega.m$);

L: Comprimento (m);

A: Área (m^2).

Figura 20. Ensaio de penetração de cloretos.

O coeficiente de difusão em regime não estacionário é calculado a partir da equação 10:

$$D = \frac{0,0239 (273 + T) L}{(U - 2) t} \left(x_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273 + T) L x_d}{U - 2}} \right) \quad (10)$$

Onde:

D: coeficiente de difusão em regime não estacionário ($\times 10^{-12} m^2/s$);

U: valor absoluto da voltagem aplicada (V);

T: valor médio das temperaturas inicial e final na solução anódica ($^{\circ}C$);

L: espessura do provete (mm);

x_d : valor médio da profundidade de penetração (mm);

t: duração do ensaio (h).

12.7.7.4 Absorção por capilaridade

O ensaio de absorção por capilaridade foi elaborado com provetes cilíndricos das várias argamassas com 90 dias de idade aproximadamente. Esses provetes tinham $78,54 \text{ cm}^2$ de base e foram preparados antecipadamente, colocados em estufa a 40°C até massa constante. Para o ensaio propriamente dito, os provetes foram colocados em caixas plásticas com a base apoiada sobre uma “grelha” plástica para ocorrer o contato com a água, que possuía 4 mm de altura em relação à base do provete. A água foi entrando nos provetes por capilaridade e, durante o ensaio, foram pesados os provetes ao longo de intervalos de tempo crescentes (Figura 21). O procedimento do ensaio é semelhante ao preconizado na LNEC E 393 (1993) (referência brasileira NBR 9779 – ABNT, 1995) para provetes de concreto, exceto sobretudo no que diz respeito às dimensões dos provetes, cujo volume é de cerca de 64 cm^3 , valor muitíssimo reduzido relativamente ao indicado na LNEC 393 (1993) (referência brasileira NBR 9779 – ABNT, 1995), segundo a qual o volume mínimo deve ser de 1000 cm^3 . Essa grande diferença pode comprometer a interpretação dos resultados desse ensaio.

Figura 21. Ensaio de absorção por capilaridade: (a) Provetes acondicionados na caixa plástica; (b) Detalhe da absorção de água pelo provete.

Para provetes de dimensões normalizadas, sabe-se que a absorção de água por capilaridade no concreto é dependente da raiz quadrada do tempo e pode ser calculada pela equação 11:

$$A = \alpha_0 + S.t^{0,5} \quad (11)$$

Onde: A (mg/mm^2) = absorção por unidade de área desde o momento em que o provete é colocado na água;

α_0 (mg/mm^2) = é a água inicialmente absorvida pelos poros em contato com a água;

S ($\text{mg}/(\text{mm}^2 \times \text{min}^{1/2})$) = coeficiente de absorção do material;

t (min) = tempo passado desde o instante inicial.

12.7.7.5 Carbonatação

Para a realização do ensaio de carbonatação, os provetes permaneceram na câmara de carbonatação acelerada a 65% de umidade relativa, temperatura aproximada de 20°C e sujeitos a concentração de CO_2 de 5% durante três meses e meio (Figura 22). Seguiu-se a LNEC E391 (1993) na parte aplicável dos provetes, tendo-se cortado fatias de cerca 0,5 cm e utilizado fenolftaleína para avaliar a profundidade de carbonatação. As partes restantes dos provetes foram novamente introduzidas na câmara para posterior avaliação da profundidade de carbonatação.

Figura 22. Ensaio de carbonatação.

12.7.8 Delineamento Estatístico

As análises estatísticas dos ensaios dos compósitos fibrosos foram realizadas por meio da análise de variância, utilizando o procedimento PROC GLM (*General Linear Model*) do programa *Statistical Analysis System* (SAS, 1995) com o delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial, constituído por quatro tratamentos e três níveis de adição de compósitos (10, 15 e 20%) e um testemunho (0% de substituição). Quando a interação dos fatores foi significativa, analisou-se qual o melhor compósito para cada nível de substituição. Quando o efeito de interação não foi significativo, analisou-se os fatores separadamente. Em ambos foi aplicado o teste de Tukey, para as comparações de médias, a 5% de probabilidade.

As análises estatísticas dos ensaios dos concretos leves foram realizadas por meio da análise de variância, utilizando o procedimento PROC GLM (*General Linear Model*) do programa *Statistical Analysis System* (SAS, 1995) com o delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC). Foi aplicado o teste de Tukey, para as comparações de médias, a 5% de probabilidade.

13 RESULTADOS

13.1 Análises bromatológicas

Os resultados das análises bromatológicas realizadas nas amostras dos resíduos agroindustriais utilizados estão expressos na Tabela 17.

Tabela 17. Análises bromatológicas das amostras dos resíduos (% MS 100%).

Amostra	MS* 100°	PB*	FB*	EE*	MM*	ENN*	FDN*	FDA*	Lignina
Bagaço de cana	96,94	3,40	25,27	0,82	48,98	23,10	92,74	77,55	14,64
Cama de frango	89,67	22,15	31,81	1,77	16,57	36,43	55,55	39,60	9,52
Casca de arroz	91,10	4,07	45,85	0,93	14,09	35,06	88,42	68,63	18,42

* MS: matéria seca; PB: proteína bruta; FB: fibra bruta; EE: extrato etéreo; MM: matéria mineral; ENN: extrato não nitrogenado; FDN: fibra em detergente neutro; FDA: fibra em detergente ácido.

13.2 Análises químicas das cinzas

Na Tabela 18, são apresentados os resultados das análises químicas das cinzas em estudo.

Tabela 18. Valores das análises químicas das amostras das cinzas dos resíduos (% em massa).

Composto	Cama de frango	Casca de arroz	Bagaço de cana	
			1ª queima	2ª queima
SiO ₂	37,70	91,80	9,69	40,30
Al ₂ O ₃	1,30	0,06	1,18	4,50
Fe ₂ O ₃	0,67	0,09	2,15	7,88
CaO	15,40	1,02	1,37	5,87
Na ₂ O	2,79	0,06	0,02	0,10
K ₂ O	6,64	1,73	2,65	11,30
MnO	0,16	0,31	0,04	0,17
TiO ₂	0,06	-	0,30	1,29
MgO	4,23	0,42	1,27	4,86
P ₂ O ₅	13,90	0,94	1,26	5,31
Cr ₂ O ₃	-	-	0,07	0,05
SrO	0,11	0,01	0,01	0,05
Perda ao fogo	11,70	2,86	77,70	9,29

13.2.1 Atividade pozolânica das cinzas

De acordo com a Figura 23, a cinza de casca de arroz apresentou o comportamento esperado para o ensaio proposto, com decréscimo dos valores de condutividade no decorrer do ensaio, indicando a reação da cinza com o hidróxido de cálcio, o mesmo não ocorrendo para as demais cinzas.

Figura 23. Condutividade das cinzas utilizadas.

Conforme metodologia proposta, os valores obtidos da atividade pozolânica para cada cinza são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19. Atividade pozolânica encontrada para cada cinza.

Cinza	Valor atividade pozolânica (mS/cm)	Classificação
Casca de arroz	3,429	Boa pozolanicidade
Cama de frango	-4,692	Não pozolânico
Bagaço de cana	-0,025	Não pozolânico

13.3 Análises físicas das cinzas

13.3.1 Área específica das cinzas

De acordo com a Tabela 20, a cinza de casca de arroz apresentou maior valor de área de superfície específica em comparação às demais cinzas.

Tabela 20. Resultados de determinação de área específica pelo método BET.

Amostra	Área superfície específica (m ² /g)
Casca de arroz	67,5
Cama de frango	6,95
Bagaço de cana	8,09

13.3.2 Espectrometria a dispersão de energia

A seguir, são apresentados os resultados das caracterizações morfológicas e das análises de EDS realizadas nas amostras de cimento Portland, cinzas de casca de arroz (Brasil e Portugal), cinza de cama de frango e sílica de fumo.

Figura 24. Morfologia e análise de EDS do cimento Portland.

Figura 25. Morfologia e análise de EDS da cinza de casca de arroz (Brasil).

Figura 26. Morfologia e análise de EDS da cinza de cama de frango.

Figura 27. Morfologia e análise de EDS da cinza de casca de arroz (Portugal).

Figura 28. Morfologia e análise de EDS da sílica de fumo.

13.3.3 Análise granulométrica das cinzas

De acordo com a curva granulométrica da cinza, apresentada na Figura 29, a cinza de casca de arroz apresenta granulometria fina, com maior concentração de partículas com tamanhos entre 1 μm e 1 mm.

Figura 29. Distribuição granulométrica da cinza de casca de arroz.

A distribuição de tamanho de grãos da cinza de cana-de-açúcar é variada e revela a presença de partículas maiores que 1 μm e menores que 100 μm , conforme Figura 30.

Figura 30. Distribuição granulométrica da cinza de cana-de-açúcar.

A partir da curva granulométrica da Figura 31, nota-se que a cinza de cama de frango apresenta granulometria variada, com maior parte de tamanho de partículas superiores a 10 μm .

Figura 31. Distribuição granulométrica da cinza de cama de frango.

13.3.4 Difração de raios X das cinzas

De acordo com a difratometria da cinza de casca de arroz, apresentada na Figura 32, observa-se que não foram identificadas fases cristalinas. Material amorfo é evidenciado pela existência de uma banda larga característica entre 15 e 30° de 2 θ .

Figura 32. Difratometria da cinza de casca de arroz.

A difratometria da cinza de bagaço de cana-de-açúcar é variada e revela a presença de fases cristalinas conforme discriminadas na Tabela 21, e como pode ser observado na Figura 33.

Figura 33. Difractometria da cinza de bagaço de cana-de-açúcar.

Tabela 21. Identificação das fases cristalinas presentes na cinza de bagaço de cana-de-açúcar.

Nome do composto	Fórmula química
Berlinita	AlPO_4
Silvita	KCl
Arcanita	K_2SO_4
Quartzo	SiO_2
Graftonita	$\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$
Anortita	$\text{CaAl}_2(\text{SiO}_4)_2$

A difratometria da cinza de cama de frango também apresentou resultado variado e revelou a presença de fases cristalinas conforme discriminadas na Tabela 22, e como pode ser observado na Figura 34.

Figura 34. Difractometria da cinza de cama de frango.

Tabela 22. Identificação das fases cristalinas presentes na cinza de cama de frango.

Nome do composto	Fórmula química
Silvita	KCl
Carbonato de cálcio	CaCO_3
Sulfito de sódio	$\text{Na}_2(\text{SO}_3)$
Quartzo	SiO_2
Carbonato fosfato ácido hidratado de potássio e cálcio	$\text{Ca}_8\text{H}_2(\text{PO}_4)_6\text{H}_2\text{OKHCO}_3\text{H}_2\text{O}$
Gordonita	$\text{MgAl}_2((\text{PO}_4)_2(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_6)(\text{H}_2\text{O})_2$
Fosfato ácido de potássio	$\text{K}_8\text{H}_2\text{P}_4\text{O}_{15}$
Fosfato de sódio magnésio e cálcio	$\text{Ca}_9\text{MgNa}(\text{PO}_4)_7$

13.4 Compósitos Fibrosos

13.4.1 Caracterização mecânica dos compósitos

Neste item, são apresentados os resultados dos ensaios mecânicos dos compósitos fabricados com as cinzas dos resíduos agroindustriais em substituição ao cimento Portland.

13.4.1.1 Módulo de Ruptura

A seguir são apresentados os resultados obtidos para o ensaio de módulo de ruptura, na Tabela 23 e Figura 35 encontram-se os valores obtidos aos 28 dias e na Tabela 24 e Figura 36 os valores obtidos para o ensaio realizado após 100 ciclos.

Tabela 23. Médias $\pm$ erros padrão do módulo de ruptura (MPa) para os compósitos com diferentes tipos de cinzas aos 28 dias.

Substituição	Bagaço de cana	Cama de frango	Casca de arroz
0%		12,56 $\pm$ 1,47	
10%	9,85 $\pm$ 1,22	8,88 $\pm$ 1,16	10,05 $\pm$ 0,85
15%	10,43 $\pm$ 1,95	8,59 $\pm$ 1,63	10,14 $\pm$ 1,20
20%	11,32 $\pm$ 1,69	9,32 $\pm$ 1,09	9,37 $\pm$ 0,99

Figura 35. Valores do módulo de ruptura (MPa) dos compósitos com diferentes teores e tipos de cinzas aos 28 dias.

Tabela 24. Médias $\pm$ erros padrão do módulo de ruptura (MPa) obtidos para os diferentes tipos de cinzas após 100 ciclos de envelhecimento acelerado de imersão-secagem.

Substituição	Bagaço de cana	Cama de frango	Casca de arroz
0%	12,70 $\pm$ 2,39		
10%	10,30 $\pm$ 1,55	9,63 $\pm$ 1,77	12,56 $\pm$ 2,08
15%	9,19 $\pm$ 1,04	9,87 $\pm$ 1,25	11,55 $\pm$ 1,37
20%	8,74 $\pm$ 1,71	9,33 $\pm$ 2,11	10,79 $\pm$ 0,92

Figura 36. Valores do módulo de ruptura (MPa) dos compósitos com diferentes teores e tipos de cinzas após 100 ciclos de imersão-secagem.

Nos ensaios de módulo de ruptura aos 28 dias e após 100 ciclos de imersão-secagem, não houve efeito de interação entre os níveis de substituições e o tipo de cinza. Assim, os diferentes tipos de cinzas são tratados como uma média global, não levando em conta a porcentagem de substituição, para o intervalo considerado no presente estudo, tendo-se na Tabela 25 a média para cada tipo de cinza:

Tabela 25. Médias globais do módulo de ruptura (MPa) obtidos para os diferentes tipos de cinzas e diferentes idades de ensaio.

Idade ensaio	Bagaço de cana	Cama de frango	Casca de arroz
28 dias	10,54 ^a	8,91 ^b	9,85 ^{ab}
100 ciclos	9,37 ^b	9,59 ^b	11,68 ^a

Valores com diferentes letras dentro da mesma linha (a,b) são significativamente diferentes ($P < 0,05$).

No ensaio aos 28 dias, o compósito fibroso produzido com cinza de bagaço de cana apresentou melhores resultados que os compósitos com as demais cinzas. Mas esse compósito com cinza de bagaço de cana foi o único que apresentou redução no valor de módulo de ruptura ao ser avaliado após 100 ciclos de envelhecimento acelerado.

O compósito com adição de cinza de casca de arroz apresentou valor mais alto do módulo de ruptura após 100 ciclos de imersão-secagem. Foi também o compósito que apresentou melhor ganho em porcentagem (18%) em relação ao ensaio inicial aos 28 dias de idade.

13.4.1.2 Módulo de elasticidade

A seguir são apresentados os resultados obtidos para o ensaio de módulo de elasticidade, na Tabela 26 e Figura 37 encontram-se os valores obtidos aos 28 dias e na Tabela 28 e Figura 38 os valores obtidos para o ensaio realizado após 100 ciclos.

Tabela 26. Médias $\pm$ erros padrão do módulo de elasticidade (GPa) obtidos para os compósitos com diferentes tipos de cinzas aos 28 dias.

Substituição	Bagaço de cana	Cama de frango	Casca de arroz
0%		13,22 $\pm$ 1,65	
10%	10,70 $\pm$ 1,76	9,48 $\pm$ 1,06	11,03 $\pm$ 1,47
15%	10,46 $\pm$ 2,30	9,28 $\pm$ 1,57	11,07 $\pm$ 0,73
20%	11,02 $\pm$ 1,66	10,48 $\pm$ 0,90	9,97 $\pm$ 0,55

Figura 37. Valores do módulo de elasticidade (GPa) dos compósitos com diferentes teores e tipos de cinzas aos 28 dias.

Nos ensaios de módulo de elasticidade aos 28 dias, não houve efeito de interação entre os níveis de substituições e o tipo de cinza. Assim, os diferentes tipos de cinzas são tratados como uma média global, não levando em conta a porcentagem de substituição, tendo-se na Tabela 27 a média para cada tipo de cinza:

Tabela 27. Médias globais do módulo de elasticidade (GPa) obtidos para os diferentes tipos de cinzas aos 28 dias de ensaio.

Idade ensaio	Bagaço de cana	Cama de frango	Casca de arroz
28 dias	10,74 ^a	9,72 ^a	10,75 ^a

Valores com diferentes letras dentro da mesma linha (a,b) são significativamente diferentes ($P < 0,05$).

Para o ensaio aos 28 dias, os compósitos fibrosos com os três tipos de cinzas não apresentaram diferença estatística entre si.

Tabela 28. Médias $\pm$ erros padrão do módulo de elasticidade (GPa) obtidos para os compósitos com diferentes tipos de cinzas após 100 ciclos.

Substituição	Bagaço de cana	Cama de frango	Casca de arroz
0%	13,80 $\pm$ 1,30		
10%	11,22 ^{aA} $\pm$ 0,88	9,54 ^{bAB} $\pm$ 1,47	11,67 ^{aA} $\pm$ 1,78
15%	9,92 ^{bB} $\pm$ 1,51	9,93 ^{bA} $\pm$ 1,41	11,09 ^{aA} $\pm$ 0,90
20%	9,30 ^{aB} $\pm$ 1,13	9,29 ^{aB} $\pm$ 1,98	8,82 ^{bB} $\pm$ 0,40

Valores com diferentes letras dentro da mesma linha (a,b) ou da mesma coluna (A,B) são significativamente diferentes ($P < 0,05$).

Figura 38. Valores do módulo de elasticidade (GPa) dos compósitos com diferentes teores e tipos de cinzas aos 100 ciclos.

No ensaio aos 100 ciclos, houve efeito da interação entre os níveis de substituição e os diferentes tipos de cinza. Ao se analisar o nível de substituição, o compósito com 10% de substituição de cinza de cama de frango apresentou resultado inferior em relação aos compósitos com o mesmo teor de substituição das outras duas cinzas, que não diferiram entre si. Para 15% de substituição, o compósito com cinza de casca de arroz apresentou

resultado superior em relação aos compósitos com as outras duas cinzas, que não diferiram entre si. Para 20% de substituição, o compósito com cinza de casca de arroz apresentou resultado inferior em relação àqueles com as outras duas cinzas, que não diferiram entre si.

No caso da cinza de casca de arroz, o compósito com 20% de substituição apresentou resultado inferior em relação aos compósitos com os outros dois níveis de substituição, que não diferiram entre si, após 100 ciclos de imersão-secagem. Para a cinza de cana, o nível de 10% de substituição correspondeu ao compósito com resultado superior em relação àqueles com os outros dois níveis de substituição, que não diferiram entre si. E para a cinza de cama de frango, o nível de 15% de substituição apresentou resultado superior em relação aos outros dois níveis de substituição.

13.4.1.3 Limite de proporcionalidade

A seguir são apresentados os resultados obtidos para o ensaio de limite de proporcionalidade, na Tabela 29 e Figura 39 encontram-se os valores obtidos aos 28 dias e na Tabela 30 e Figura 40 os valores obtidos para o ensaio realizado após 100 ciclos.

Tabela 29. Médias $\pm$ erros padrão do limite de proporcionalidade (MPa) obtidos para os compósitos com diferentes tipos de cinzas aos 28 dias.

Substituição	Bagaço de cana	Cama de frango	Casca de arroz
0%	8,72 $\pm$ 1,38		
10%	6,60 $\pm$ 0,94	6,32 $\pm$ 0,74	7,31 $\pm$ 1,79
15%	6,46 $\pm$ 1,89	6,29 $\pm$ 1,47	6,87 $\pm$ 0,99
20%	6,85 $\pm$ 0,74	6,70 $\pm$ 0,34	6,69 $\pm$ 2,21

Figura 39. Valores do limite de proporcionalidade (MPa) dos compósitos com diferentes teores e tipos de cinzas aos 28 dias.

Tabela 30. Médias $\pm$ erros padrão do limite de proporcionalidade (MPa) obtidos para os compósitos com diferentes tipos de cinzas após 100 ciclos.

Substituição	Bagaço de cana	Cama de frango	Casca de arroz
0%	8,51 $\pm$ 1,43		
10%	7,25 $\pm$ 1,22	5,91 $\pm$ 1,69	8,26 $\pm$ 1,35
15%	6,41 $\pm$ 0,83	6,74 $\pm$ 1,36	9,28 $\pm$ 0,90
20%	5,54 $\pm$ 1,07	6,46 $\pm$ 1,96	7,69 $\pm$ 2,21

Figura 40. Valores do limite de proporcionalidade (MPa) dos compósitos com diferentes teores e tipos de cinzas após 100 ciclos.

Nos ensaios de limite de proporcionalidade aos 28 dias e após 100 ciclos de envelhecimento acelerado, não houve efeito de interação entre os níveis de substituições e o tipo de cinza. Assim, os compósitos fibrosos com diferentes tipos de cinzas são tratados como uma média global, não levando em conta a porcentagem de substituição, tendo-se na Tabela 31 a média para cada tipo de cinza:

Tabela 31. Médias globais do limite de proporcionalidade (MPa) obtidos para os diferentes tipos de cinzas e diferentes idades de ensaio.

Idade ensaio	Bagaço de cana	Cama de frango	Casca de arroz
28 dias	6,65 ^a	6,42 ^a	6,84 ^a
100 ciclos	6,36 ^b	6,36 ^b	8,40 ^a

Valores com diferentes letras dentro da mesma linha (a,b) são significativamente diferentes ($P < 0,05$).

No ensaio aos 28 dias, os compósitos com os três tipos de cinzas apresentaram resultados estatisticamente semelhantes.

No ensaio após 100 ciclos de imersão-secagem, o compósito com cinza de casca de arroz apresentou resultado superior àqueles com as demais cinzas, e também foi o único que apresentou elevação (21%) no resultado para este tipo de teste em relação ao ensaio aos 28 dias. O compósito com adição de cinza de bagaço de cana apresentou decréscimo de 4,4% e o compósito com cinza de cama de frango apresentou decréscimo de 0,94%, ao se compararem os resultados das séries após 100 ciclos de envelhecimento com os das séries com 28 dias de idade.

13.4.1.4 Energia específica

A seguir são apresentados os resultados obtidos para o ensaio de energia específica, na Tabela 32 e Figura 41 encontram-se os valores obtidos aos 28 dias e na Tabela 33 e Figura 42 os valores obtidos para o ensaio realizado após 100 ciclos.

Tabela 32. Médias $\pm$ erros padrão de energia específica (kJ/m^2) obtidos para os compósitos com diferentes tipos de cinzas aos 28 dias.

Substituição	Bagaço de cana	Cama de frango	Casca de arroz
0%		5,54 $\pm$ 0,68	
10%	4,31 $\pm$ 0,56	4,17 $\pm$ 0,54	4,82 $\pm$ 0,65
15%	4,56 $\pm$ 0,87	4,17 $\pm$ 0,68	5,10 $\pm$ 0,55
20%	4,96 $\pm$ 0,84	4,21 $\pm$ 0,41	4,63 $\pm$ 0,52

Figura 41. Valores de energia específica (kJ/m^2) dos compósitos com diferentes teores e tipos de cinzas aos 28 dias.

Tabela 33. Médias $\pm$ erros padrão de energia específica (kJ/m^2) obtidos para os compósitos com diferentes tipos de cinzas após 100 ciclos.

Substituição	Bagaço de cana	Cama de frango	Casca de arroz
0%	5,67 $\pm$ 1,03		
10%	4,73 $\pm$ 0,77	4,37 $\pm$ 0,67	6,00 $\pm$ 0,98
15%	4,12 $\pm$ 0,46	4,43 $\pm$ 0,60	5,73 $\pm$ 0,89
20%	4,07 $\pm$ 0,78	4,16 $\pm$ 1,02	5,32 $\pm$ 0,44

Figura 42. Valores de energia específica (kJ/m²) dos compósitos com diferentes teores e tipos de cinzas após 100 ciclos.

Nos ensaios de energia específica aos 28 dias e após 100 ciclos de imersão-secagem, não houve efeito de interação entre os níveis de substituições e o tipo de cinza. Os diferentes tipos de cinzas são tratados como uma média global, não levando em conta a porcentagem de substituição, tendo-se na Tabela 34 a média para cada tipo de cinza:

Tabela 34. Médias globais da energia específica (kJ/m²) obtidos para os diferentes tipos de cinzas e diferentes idades de ensaio.

Idade ensaio	Bagaço de cana	Cama de frango	Casca de arroz
28 dias	4,61 ^{ab}	4,18 ^b	4,84 ^a
100 ciclos	4,30 ^b	4,31 ^b	5,70 ^a

Valores com diferentes letras dentro da mesma linha (a,b) são significativamente diferentes ($P < 0,05$).

No ensaio aos 28 dias, o compósito com cinza de casca de arroz apresentou resultado estatisticamente superior em relação àqueles com as demais cinzas. O compósito com cinza de cama de frango apresentou resultado inferior ao ser comparado àquele com cinza de casca de arroz.

No ensaio após 100 ciclos de envelhecimento, o compósito com cinza de casca de arroz apresentou resultado superior àqueles com as demais cinzas, que não diferiram entre si. O compósito com cinza de casca de arroz foi também o que apresentou maior elevação (17,2%) no resultado, para este tipo de teste, em relação ao ensaio aos 28 dias. O compósito com cinza de bagaço de cana, por seu turno, apresentou decréscimo de 6,7%, após 100 ciclos de envelhecimento, ao ser comparado ao compósito correspondente aos 28 dias de idade.

13.4.2 Caracterização física dos compósitos

A seguir são apresentados os resultados obtidos para os ensaios de caracterização física dos compósitos, realizados no Laboratório de Construções e Ambiente da FZEA USP, em Pirassununga, SP.

13.4.2.1 Absorção Aparente

A seguir são apresentados os resultados obtidos para o ensaio de absorção aparente, na Tabela 35 e Figura 43 encontram-se os valores obtidos aos 28 dias e na Tabela 37 e Figura 44 os valores obtidos para o ensaio realizado após 100 ciclos.

Tabela 35. Médias $\pm$ erros padrão de absorção aparente de água (% em massa) para os compósitos com diferentes tipos de cinzas aos 28 dias.

Substituição	Bagaço de cana	Cama de frango	Casca de arroz
0%	19,77 $\pm$ 0,71		
10%	23,12 $\pm$ 1,40	23,37 $\pm$ 1,80	24,49 $\pm$ 2,22
15%	23,65 $\pm$ 1,24	23,59 $\pm$ 2,10	27,72 $\pm$ 2,49
20%	24,83 $\pm$ 1,62	23,20 $\pm$ 1,73	27,26 $\pm$ 0,64

Figura 43. Valores de absorção aparente de água (% em massa) dos compósitos com diferentes teores e tipos de cinzas aos 28 dias.

Nos ensaios de absorção de água para os compósitos aos 28 dias de idade, não houve efeito de interação entre os níveis de substituição e o tipo de cinza. Os diferentes tipos de cinzas são tratados como uma média global, não levando em conta a porcentagem de substituição, tendo-se na Tabela 36 a média para cada tipo de cinza:

Tabela 36. Médias globais de absorção aparente (%) obtidos para os diferentes tipos de cinzas aos 28 dias.

Idade ensaio	Bagaço de cana	Cama de frango	Casca de arroz
28 dias	23,86 ^a	23,39 ^a	26,46 ^b

Valores com letras diferentes na mesma linha (a,b) são significativamente diferentes ($P < 0,05$).

Para o ensaio aos 28 dias de idade, o compósito com cinza de casca de arroz apresentou maior valor de absorção de água se comparado àqueles com as demais cinzas, que não diferiram entre si.

Tabela 37. Médias $\pm$ erros padrão de absorção aparente de água (% em massa) para os compósitos com diferentes tipos de cinzas após 100 ciclos de envelhecimento acelerado.

Substituição	Bagaço de cana	Cama de frango	Casca de arroz
0%		18,09 $\pm$ 1,34	
10%	21,30 ^{aA} $\pm$ 1,58	20,57 ^{aA} $\pm$ 1,38	21,19 ^{aA} $\pm$ 1,13
15%	21,53 ^{aA} $\pm$ 1,06	20,64 ^{aA} $\pm$ 1,78	22,75 ^{aAB} $\pm$ 0,60
20%	23,19 ^{bA} $\pm$ 1,40	21,04 ^{aA} $\pm$ 1,40	24,67 ^{bB} $\pm$ 0,74

Valores com letras diferentes na mesma linha (a,b) ou na mesma coluna (A,B) são significativamente diferentes entre si ($P < 0,05$).

Figura 44. Valores de absorção aparente de água (%) dos compósitos com diferentes teores e tipos de cinzas após 100 ciclos.

No ensaio após 100 ciclos, houve efeito da interação entre os níveis de substituição e os diferentes tipos de cinza. Ao se analisarem níveis de 10% e 15% de substituição, os compósitos com as três cinzas apresentam valores estatisticamente semelhantes entre si. Para 20% de substituição, o compósito com cinza de cama de frango apresentou resultado inferior em relação àqueles correspondentes com as outras duas cinzas, que não diferiram entre si.

Ao se tratar da cinza de casca de arroz, o nível de 10% de substituição apresentou resultado inferior em relação aos outros dois níveis de substituição. Para os compósitos com cinza de cana, independente do nível de substituição, os valores foram estatisticamente semelhantes entre si, o mesmo acontecendo para os compósitos com cinza de cama de frango.

Nota-se, também, uma função crescente em relação ao “compósito referência” (0% de substituição), à medida que se aumenta o teor de substituição do cimento pela cinza. O acúmulo de água no decorrer do ensaio

pode comprometer a durabilidade dos concretos fabricados com as cinzas, pelo fato da maior quantidade de água estar associada a maior porosidade capilar, que constitui o canal de ataque dos agentes agressores em geral (fungos e bactérias, chuva ácida, dejetos de animais, abrasão superficial), além de problemas de “descolamento” da argamassa e/ou revestimento.

O aumento da absorção em função do aumento da taxa de incorporação das cinzas pode ser explicado pelo aumento na porosidade dos corpos-de-prova.

13.4.2.2 Densidade aparente

A seguir são apresentados os resultados obtidos para o ensaio de densidade aparente, na Tabela 38 e Figura 45 encontram-se os valores obtidos aos 28 dias e na Tabela 39 e Figura 46 os valores obtidos para o ensaio realizado após 100 ciclos.

Tabela 38. Médias $\pm$ erros padrão de densidade aparente (g/cm^3) obtidos para os compósitos com diferentes tipos de cinzas aos 28 dias.

Substituição	Bagaço de cana	Cama de frango	Casca de arroz
0%		1,637 $\pm$ 0,026	
10%	1,541 $\pm$ 0,043	1,551 $\pm$ 0,050	1,519 $\pm$ 0,064
15%	1,528 $\pm$ 0,039	1,542 $\pm$ 0,066	1,437 $\pm$ 0,069
20%	1,507 $\pm$ 0,045	1,555 $\pm$ 0,054	1,459 $\pm$ 0,019

Figura 45. Valores de densidade aparente (g/cm^3) dos compósitos com diferentes teores e tipos de cinzas aos 28 dias.

Tabela 39. Médias $\pm$ erros padrão de densidade aparente (g/cm^3) obtidos para os compósitos com diferentes tipos de cinzas após 100 ciclos.

Substituição	Bagaço de cana	Cama de frango	Casca de arroz
0%	1,642 $\pm$ 0,049		
10%	1,557 $\pm$ 0,053	1,574 $\pm$ 0,045	1,555 $\pm$ 0,037
15%	1,566 $\pm$ 0,034	1,583 $\pm$ 0,061	1,530 $\pm$ 0,021
20%	1,530 $\pm$ 0,042	1,586 $\pm$ 0,044	1,487 $\pm$ 0,018

Figura 46. Valores de densidade aparente (g/cm^3) dos compósitos com diferentes teores e tipos de cinzas após 100 ciclos.

Nos ensaios de densidade aparente aos 28 dias e após 100 ciclos de envelhecimento, não houve efeito de interação entre os níveis de substituição e o tipo de cinza. Os resultados dos compósitos com diferentes tipos de cinzas são tratados como uma média global, não levando em conta a porcentagem de substituição, tendo-se na Tabela 40 a média para cada tipo de cinza:

Tabela 40. Médias globais de densidade aparente (g/cm^3) obtidos para os diferentes tipos de cinzas e diferentes idades de ensaio.

Idade ensaio	Bagaço de cana	Cama de frango	Casca de arroz
28 dias	1,53 ^a	1,55 ^a	1,47 ^b
100 ciclos	1,55 ^b	1,58 ^a	1,52 ^b

Valores com letras diferentes na mesma linha (a,b) são significativamente diferentes ($P < 0,05$).

No ensaio aos 28 dias, o compósito com cinza de casca de arroz apresentou resultado estatisticamente inferior em relação àqueles com as demais cinzas, que não apresentaram diferença estatística entre si.

No ensaio após 100 ciclos, o compósito com cinza de cama de frango apresentou resultado superior àqueles com as demais cinzas, que não diferiram entre si.

13.4.2.3 Porosidade aparente

A seguir são apresentados os resultados obtidos para o ensaio de porosidade aparente, na Tabela 41 e Figura 47 encontram-se os valores obtidos aos 28 dias e na Tabela 42 e Figura 48 os valores obtidos para o ensaio realizado após 100 ciclos.

Tabela 41. Médias $\pm$ erros padrão de porosidade aparente (%) obtidos para os compósitos com diferentes tipos de cinza aos 28 dias.

Substituição	Bagaço de cana	Cama de frango	Casca de arroz
0%	32,35 $\pm$ 0,68		
10%	35,57 ^{aA} $\pm$ 1,21	36,18 ^{aA} $\pm$ 1,63	37,08 ^{aA} $\pm$ 1,70
15%	36,10 ^{aA} $\pm$ 1,00	36,25 ^{aA} $\pm$ 1,60	39,67 ^{bB} $\pm$ 1,60
20%	37,36 ^{aA} $\pm$ 1,36	35,99 ^{aA} $\pm$ 1,42	39,77 ^{bB} $\pm$ 0,41

Valores com diferentes letras dentro da mesma linha (a,b) ou mesma coluna (A,B) são significativamente diferentes ($P < 0,05$).

Figura 47. Valores de porosidade aparente dos compósitos com diferentes teores e tipos de cinzas aos 28 dias.

Tabela 42. Médias $\pm$ erros padrão de porosidade aparente (%) obtidos para os diferentes tipos de cinzas aos 100 ciclos.

Substituição	Bagaço de cana	Cama de frango	Casca de arroz
0%	29,64 $\pm$ 1,33		
10%	33,08 ^{aA} $\pm$ 1,29	32,33 ^{aA} $\pm$ 1,27	32,92 ^{aA} $\pm$ 1,12
15%	33,69 ^{abAB} $\pm$ 0,94	32,58 ^{aA} $\pm$ 1,51	34,80 ^{bB} $\pm$ 0,52
20%	35,42 ^{bB} $\pm$ 1,19	33,33 ^{aA} $\pm$ 1,37	36,67 ^{bB} $\pm$ 0,64

Valores com diferentes letras dentro da mesma linha (a,b) ou mesma coluna (A,B) são significativamente diferentes ($P < 0,05$).

Figura 48. Valores de porosidade aparente dos compósitos com diferentes teores e tipos de cinzas após 100 ciclos.

Nos ensaios aos 28 dias e após 100 ciclos de imersão-secagem, houve efeito da interação entre os níveis de substituição e os diferentes tipos de cinza. Quando se analisa o nível de substituição, para o nível de 10% de substituição, os compósitos com as três cinzas apresentam valores estatisticamente semelhantes. Para 15 e 20% de substituição, o compósito com cinza de casca de arroz apresentou resultado superior em relação àqueles outras duas cinzas, que não diferiram entre si, para o ensaio aos 28 dias. Nas análises realizadas após os 100 ciclos, os compósitos com cinzas apresentam resultados estatisticamente semelhantes quando comparados ao nível de 10% de substituição. Já para 15% e 20% de substituição, a cinza de cama de frango esteve associada ao menor valor de porosidade aparente do compósito.

No ensaio aos 28 dias, quando se trata da cinza de casca de arroz, o nível de 10% de substituição apresentou resultado inferior em relação outros dois níveis de substituição. Para a cinza de cana, independente do nível de

substituição, os valores foram estatisticamente semelhantes, o mesmo acontecendo para a cinza de cama de frango.

No ensaio após os 100 ciclos, quando se trata de compósitos com cinza de casca de arroz e cinza de bagaço de cana, o nível de 10% de substituição apresentou resultado inferior em relação aos outros dois níveis de substituição. Para a cinza de cama de frango, independente do nível de substituição, os valores foram estatisticamente semelhantes.

Nota-se, também, uma função crescente em relação ao “compósito referência” (0% de substituição), à medida que se aumenta o teor de substituição do cimento pela cinza, correlacionando este comportamento com os valores de absorção aparente de água, descritos anteriormente.

13.4.3 Interface fibra-matriz

A seguir são apresentados os resultados obtidos para o estudo da zona de transição dos compósitos fibrosos, nas Figuras 49 a Figura 52 encontram-se as imagens obtidas para os compósitos produzidos com 20% dos diferentes tipos de cinzas em substituição ao cimento Portland.

Figura 49. Imagem da interface fibra-matriz do compósito fibroso produzido sem adição de cinza.

Figura 50. Imagem da interface fibra-matriz do compósito fibroso produzido com cinza de casca de arroz.

Figura 51. Imagem da zona de transição do compósito fibroso produzido com cinza de casca de bagaço de cana-de-açúcar.

Figura 52. Imagem da zona de transição do compósito fibroso produzido com cinza de casca de cama de frango.

13.5 Concreto leve

Nos itens seguintes são apresentados os resultados obtidos nos estudos com concreto leve realizados na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Nota-se a ausência dos valores para o tratamento CAZ (cinza de casca de arroz produzida em Portugal) aos 90 dias, devido a ocorrência de fissuras nos corpos-de-prova, que impediram a realização dos ensaios para este tratamento. Tais fissuras ocorreram pela presença excessiva de etringita segundo caracterizações morfológicas dos provetes realizadas posteriormente. A formação de etringita no concreto requer sulfato no meio ambiente ou no próprio cimento, neste caso específico o sulfato estava presente na cinza de casca de arroz, já que os demais provetes não apresentaram fissuras.

13.5.1 Flexão

Na Tabela 43 são apresentados os resultados obtidos para o ensaio de flexão, e da Figura 53 à Figura 56 são apresentados os resultados para cada idade de ensaio, e na Figura 57 um comportamento dos concretos leves no decorrer do experimento.

Tabela 43. Médias $\pm$ erros padrão de resistência à flexão (MPa) obtidos para os concretos leves com diferentes tipos de cinzas às diferentes idades.

	CCA*	CTLA*	CCF*	SF*	CAZ*
3 dias	6,50 ^a $\pm$ 0,08	6,09 ^a $\pm$ 0,00	5,92 ^a $\pm$ 0,24	6,15 ^a $\pm$ 0,24	6,32 ^a $\pm$ 0,00
7 dias	7,13 ^a $\pm$ 0,30	6,40 ^{ab} $\pm$ 0,33	6,13 ^{ab} $\pm$ 0,24	5,75 ^b $\pm$ 0,61	5,98 ^{ab} $\pm$ 0,64
28 dias	8,16 ^a $\pm$ 0,87	7,20 ^{ab} $\pm$ 0,40	6,32 ^b $\pm$ 0,11	6,78 ^b $\pm$ 0,11	2,84 ^c $\pm$ 0,40
90 dias	7,05 ^{ab} $\pm$ 0,27	7,63 ^{ab} $\pm$ 0,46	6,13 ^b $\pm$ 0,07	8,09 ^a $\pm$ 0,48	-

* CCA: cinza de casca de arroz (Brasil); CTLA: controle; CCF: cinza de cama de frango; SF: sílica de fumo; CAZ: cinza de casca de arroz (Portugal).

Valores com diferentes letras dentro da mesma linha (a,b,c) são significativamente diferentes ($P < 0,05$).

Figura 53. Valores de resistência à flexão dos concretos leves com diferentes tipos de cinzas aos 3 dias.

Figura 54. Valores de resistência à flexão dos concretos leves com diferentes tipos de cinzas aos 7 dias.

Figura 55. Valores de resistência à flexão dos concretos leves com diferentes tipos de cinzas aos 28 dias.

Figura 56. Valores de resistência à flexão dos concretos leves com diferentes tipos de cinzas aos 90 dias.

Figura 57. Valores de resistência à flexão dos concretos leves com diferentes tipos de cinzas nas diferentes idades de ensaio.

Os concretos leves não apresentaram diferença estatística significativa nos ensaios realizados aos 3 dias. O concreto leve produzido com cinza de casca de arroz (Brasil) apresentou o melhor resultado dentre os concretos leves nos ensaios realizados aos 7 e 28 dias de idade. Os concretos leves produzidos com cinza de cama de frango e sílica de fumo apresentaram os menores valores de resistência a flexão aos 28 dias de idade. O concreto leve produzido com sílica de fumo apresentou melhoria significativa no ensaio realizado aos 90 dias sendo o concreto com melhor resultado para esta idade de ensaio.

Observa-se, pela Figura 53, que os concretos apresentaram elevação da resistência no decorrer do tempo, como era esperado, indicando que a substituição parcial do cimento Portland pelas cinzas não interferiu nos resultados finais. Ressalta-se também, que após os 28 dias de ensaios, os concretos alcançaram valores superiores a 80% dos valores obtidos nos ensaios aos 90 dias, indicando que as reações ocorrem principalmente nos 28 dias iniciais de cura.

O concreto leve produzido com a cinza de casca de arroz (Portugal) não foi ensaiado aos 90 dias e apresentou um decréscimo dos valores no ensaio de resistência à flexão devido à presença de fissuras nos concretos, ocasionados pela formação de etringita nos concretos. A formação de etringita é resultado da combinação entre cálcio, sulfato, aluminato e íons hidroxila.

13.5.2 Compressão

Na Tabela 44 são apresentados os resultados obtidos para o ensaio de compressão, e da Figura 58 à Figura 61 são apresentados os resultados para cada idade de ensaio, e na Figura 62 um comportamento dos concretos leves no decorrer do experimento.

Tabela 44. Médias $\pm$ erros padrão de resistência à compressão (MPa) obtidos para os concretos leves com diferentes tipos de cinzas às diferentes idades.

	CCA	CTLA	CCF	SF	CAZ
3 dias	43,07 ^a $\pm$ 2,31	39,24 ^b $\pm$ 1,79	37,32 ^b $\pm$ 1,38	36,79 ^b $\pm$ 1,32	45,14 ^a $\pm$ 1,79
7 dias	46,70 ^a $\pm$ 1,31	42,36 ^b $\pm$ 1,51	37,96 ^c $\pm$ 1,26	37,86 ^c $\pm$ 2,17	44,96 ^{ab} $\pm$ 2,00
28 dias	50,74 ^a $\pm$ 3,48	49,05 ^a $\pm$ 2,62	46,14 ^a $\pm$ 3,91	45,42 ^a $\pm$ 8,97	37,81 ^b $\pm$ 1,94
90 dias	52,32 ^a $\pm$ 3,28	49,82 ^a $\pm$ 3,22	50,58 ^a $\pm$ 3,12	47,62 ^a $\pm$ 5,20	

* CCA: cinza de casca de arroz (Brasil); CTLA: controle; CCF: cinza de cama de frango; SF: sílica de fumo; CAZ: cinza de casca de arroz (Portugal).

Valores com diferentes letras dentro da mesma linha (a,b,c) são significativamente diferentes ($P < 0,05$).

Figura 58. Valores de compressão dos compósitos com diferentes tipos de cinzas aos 3 dias.

Figura 59. Valores de resistência à compressão dos concretos leves com diferentes tipos de cinzas aos 7 dias.

Figura 60. Valores de resistência à compressão dos concretos leves com diferentes tipos de cinzas aos 28 dias.

Figura 61. Valores de resistência à compressão dos concretos leves com diferentes tipos de cinzas aos 90 dias.

Figura 62. Valores de resistência à compressão dos concretos leves com diferentes tipos de cinzas nas diferentes idades de ensaio.

No ensaio aos 3 dias de idade, os concretos leves produzidos com as cinzas de casca de arroz (Brasil e Portugal) apresentaram os melhores resultados, diferentes significativamente dos demais concretos. Aos 7 dias de idade, os concretos leves produzidos com cinza de cama de frango e sílica de fumo apresentaram os menores valores estatisticamente significativos de resistência à compressão. Nos ensaios realizados aos 28 e 90 dias de idade, os concretos leves fabricados com as diferentes cinzas apresentaram resultados que não diferiram estatisticamente.

Nota-se, pela Figura 58, que os concretos leves apresentaram comportamentos semelhantes para o teste, com elevação da resistência no decorrer do tempo, como era esperado, indicando que a substituição parcial do cimento Portland pelas cinzas não interferiu nos resultados finais. Ressalta-se, também, que após os 28 dias de ensaios, os concretos alcançaram valores superiores a 90% dos valores obtidos nos ensaios aos 90

dias, indicando que as reações ocorrem principalmente nos 28 dias iniciais de cura.

Os valores encontrados nos ensaios aos 7 e 28 dias são semelhantes àqueles encontrados por PAULA (2006), que encontrou os melhores valores de resistência à compressão nos compósitos com 10% de substituição do cimento por cinzas de bagaço de cana-de-açúcar.

O concreto leve produzido com a cinza de casca de arroz (Portugal) não foi ensaiado aos 90 dias e apresentou um decréscimo dos valores no ensaio de resistência à flexão devido à presença de fissuras nos compósitos, ocasionados pela formação de etringita nos compósitos.

13.5.3 Resistência à penetração de cloretos

A resistência à penetração de cloretos foi avaliada pelo método E 463 (2004). A norma estabelece um método para determinar o coeficiente de difusão dos cloretos no concreto por meio do ensaio de migração em regime não estacionário. O coeficiente de difusão dos cloretos determinado por este método é uma medida da resistência à penetração dos cloretos do material ensaiado. Os resultados deste ensaio encontram-se na Tabela 45 e Figura 63.

Tabela 45. Resultados do coeficiente de difusão (m^2/s) aos 90 dias.

	Coeficiente de difusão (m^2/s)
Controle	$8,8 \times 10^{-12}$
10% CCA	$4,3 \times 10^{-12}$
10% CCF	$13,2 \times 10^{-12}$
10% SF	$5,8 \times 10^{-12}$

Observação: aos 90 dias os provetes CAZ apresentaram fissuras, não sendo possível a realização de tal ensaio para este tipo de provete.

Figura 63. Coeficientes de difusão aparente para as cinzas em estudo.

De acordo com os resultados, os provetes produzidos com o RHA, apresentaram o melhor coeficiente de difusão, pertencendo, segundo a norma, à classe **Muito Elevada** (valor maior que 2,5 e menor que 5,0) de resistência à penetração de cloretos.

Já os provetes do grupo controle e os produzidos com sílica de fumo, pertencem segundo a norma, à classe **Elevada** (valor maior que 5,0 e menor que 10,0) de resistência à penetração de cloretos.

E os provetes produzidos com as cinzas de cama de frango, pertencem segundo a norma à classe **Moderada** (valor maior que 10,0 e menor que 15,0) de resistência à penetração de cloretos.

O melhor resultado para o provete produzido com cinza de casca de arroz, pode ter tido influência pelo menor tamanho das partículas que esta cinza apresentou, facilitando o “empacotamento”.

13.5.4 Absorção por capilaridade

Os ensaios de absorção por capilaridade conduziram aos resultados apresentados na Figura 64 em que a partir dos dados correspondentes a cada provete se determinaram, por regressão linear, funções lineares equivalentes à Equação 2, tendo-se obtido valores do coeficiente de correlação superiores a 0,9868.

Os coeficientes de absorção obtidos, apresentam-se na Tabela 46.

Tabela 46. Coeficientes de absorção por capilaridade obtidos.

	S ($\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2})$)	Correlação (R^2)
Controle	$y = 0,0652x - 0,1011$	0,9868
10% RHA	$y = 0,0661x - 0,0426$	0,9986
10% CCF	$y = 0,0119x - 0,1246$	0,9950
10% SF	$y = 0,0606x - 0,1428$	0,9974
10% CAZ	$y = 0,0865x - 0,1193$	0,9949

Figura 64. Regressão linear aos resultados dos ensaios de absorção por capilaridade.

Os provetes produzidos com 10% de cinza de casca de arroz (CAZ), apresentaram fissuras no decorrer do teste, o que justifica o elevado valor de absorção encontrado para este tipo de cinza.

13.5.5 Carbonatação

Durante o período do teste, observou-se profundidade de carbonatação nula, em todos os provetes, provavelmente devido ao fato do tempo de ensaio ser insuficiente para tal ensaio.

14 DISCUSSÕES

14.1 RESÍDUOS

Os valores encontrados de MS, FDN E FDA estão próximos aos encontrados em pesquisa desenvolvida por FADEL *et al.* (2003). Comparado com os resultados das análises bromatológicas dos outros resíduos, a casca de arroz apresenta valores próximos àqueles encontrados para o bagaço de cana-de-açúcar. A casca de arroz, por ser um resíduo vegetal sem contaminação dos dejetos animais, apresenta maiores valores de FB e lignina em comparação à cama de frango.

14.2 CINZAS

Existe uma variação na composição química das amostras das cinzas dos resíduos, principalmente para os teores de SiO_2 e CaO , o que pode estar relacionado à presença de carbono residual e óxidos contaminantes. GAVA *et al.* (1999) relatam que a composição química da cinza varia como consequência do solo em que o arroz é plantado, dos tipos e dos teores de fertilizantes utilizados, bem como do tipo de arroz propriamente dito.

CORDEIRO *et al.* (2004) apresentam, como principais impurezas encontradas em cinzas, os óxidos K_2O , CaO e P_2O_5 . Esses óxidos estão presentes em maiores proporções na cama de frango e no bagaço de cana-de-açúcar após a segunda queima dentre os resíduos analisados. De acordo com DELLA *et al.* (2001), esses mesmos óxidos são considerados fundentes e formadores de fase vítrea, uma vez que tendem a baixar o ponto de fusão e, por isto, tornam-se indesejáveis nas cinzas.

O alto teor de K_2O na cinza de bagaço de cana-de-açúcar deve ser decorrente do tipo e da quantidade de fertilizante utilizado, segundo HERNANDEZ *et al.* (1998), ARMESTO *et al.* (2002) e DELLA *et al.* (2006), ou ainda, decorrente da baixa eficiência do processo de extração de caldo durante a moagem (CINCOTTO & KAUPATEZ, 1988).

A NBR 12653 – ABNT, 1992, norma brasileira que prescreve os critérios para que um material possa ser classificado como pozolana, estabelece perda ao fogo máxima de 6%, teor máximo de álcalis disponíveis em Na_2O de 1,5% e valor somatório mínimo de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 de 50%.

Com relação às propriedades químicas, percebe-se que a cinza de casca de arroz atende aos requisitos da norma citada. A cinza de bagaço de cana-de-açúcar não atende à prescrição quanto a perda ao fogo, assim como a cinza de cama de frango, indicando um alto teor de carbono. A cinza de cama de frango não atendeu a nenhum dos requisitos indicados pela norma.

Os valores dos compostos encontrados para as cinzas de casca de arroz estão próximos aos encontrados em estudos realizados por FENG *et al.* (2004), SENSALÉ (2006) e BUI *et al.* (2005).

Nota-se, que apenas a cinza de casca de arroz apresentou valor satisfatório para a atividade pozolânica. A baixa atividade pozolânica para as cinzas de cama de frango e bagaço de cana-de-açúcar pode ter explicação na baixa área específica superficial apresentada por essas cinzas, assim como por serem materiais cristalinos.

A cinza de cama de frango apresentou um valor negativo de atividade pozolânica, podendo ser explicado pela sua inadequada composição química, que apresentou elevada quantidade de óxido de cálcio (superior em 10 vezes à quantidade presente na cinza de casca de arroz e três vezes àquela

presente na cinza de cana-de-açúcar), fazendo com que o consumo de hidróxido de cálcio não acontecesse nos primeiros instantes.

A cinza de casca de arroz apresentou valor de área superficial superior às demais cinzas, e compatível com o apresentado por MEHTA (1992) e DELLA *et al.* (2006). A baixa área superficial das cinzas de cama de frango e bagaço de cana-de-açúcar faz com que essas cinzas apresentem baixa reatividade. Para uma melhora da reatividade através da melhoria da área específica, é preciso um estudo mais adequado em relação a moagem dessas cinzas. Segundo COOK (1986) e BUI *et al.* (2005), a área superficial está relacionada diretamente com a reatividade da cinza, como consequência principalmente do volume de microporos presente na superfície das partículas.

De acordo com NAKATA *et al.* (1989), a tendência de decréscimo da área superficial com o aumento da temperatura está relacionada com o fato da superfície das partículas sofrerem fusão e agregarem-se umas às outras.

Os resultados das análises de espectrometria por dispersão de energia (EDS), revelam a presença de sílica como principal componente nas amostras das cinzas de casca de arroz (Brasil e Portugal), assim como na amostra de sílica de fumo, conforme também apresentado por JAUBERTHIE *et al.* (2000).

A amostra de cinza de cama de frango não apresentou, nessa análise, um elemento predominante, o que já era demonstrado nos resultados de análise química da amostra.

Observam-se, nas caracterizações morfológicas, que as partículas de sílica de fumo apresentam aparência esférica. Diferentemente, as partículas de cinza de cama de frango e casca de arroz apresentaram aparências irregulares, como relatado por SATA *et al.* (2007).

De acordo com a micrografia apresentada, a cinza de casca de arroz apresentou uma estrutura porosa. Isto está associado provavelmente à maior atividade pozolânica dessa cinza.

A cinza de casca de arroz (Brasil) apresentou granulometria mais refinada em relação às outras duas cinzas, com a presença de maior número de partículas de tamanhos mínimos.

A cinza de casca de arroz (Brasil) apresentou o resultado de difração com ausência de picos, indicativo de ser uma cinza com características amorfas (sem fases cristalinas).

A presença de partículas de quartzo nas cinzas de bagaço de cana-de-açúcar (2ª queima) e cama de frango revela a “contaminação” destas cinzas. O quartzo é provavelmente oriundo da areia que se encontra aderido na cana-de-açúcar e não totalmente retirada durante a etapa de lavagem antes da moagem da cana-de-açúcar.

14.3 COMPÓSITOS FIBROSOS

Os resultados de módulo de ruptura, limite de proporcionalidade e energia específica apresentaram poucas variações entre os tratamentos comparados, para as duas idades ensaiadas. A cinza de casca de arroz para estes ensaios foi a que apresentou melhores resultados, devido ao seu teor de SiO_2 e a finura da cinza, que auxilia nas reações com o cimento (SATA *et al.*, 2007).

Absorção de água e porosidade são propriedades inter-relacionadas. À medida que o teor de cinzas aumenta, a absorção de água e porosidade aumentam, como já reportados por MEHTA, 1992; ISAIA, 1995, COUTINHO, 2003, SAVASTANO JUNIOR, 2000.

Os valores de porosidade aparente para as duas idades analisadas e para os compósitos produzidos com cinza de casca de arroz são maiores, devido sua reação de hidratação ser mais lenta para este tipo de cinza, relatado também por BUI *et al.* (2005). A porosidade aparente é maior também pela possível incorporação de ar durante a mistura dos compósitos, reduzindo assim sua densidade aparente.

A redução da porosidade aparente para todos os tipos de cinzas após o envelhecimento acelerado deve-se a densificação da matriz, com conseqüente redução da absorção aparente. Para todas as formulações, os valores de densidade aparente aumentaram e os de absorção aparente diminuíram após o envelhecimento, podendo ser atribuído à formação de produtos de hidratação ao redor das fibras celulósicas e de polipropileno após o envelhecimento, conforme descrito por TONOLI (2006).

A substituição parcial do cimento por cinza de casca de arroz aumentou significativamente os valores de resistência, e o efeito foi mais evidente após os 100 ciclos de envelhecimento, de acordo com o encontrado por BUI *et al.* (2005). FREITAS *et al.* (1998) encontraram melhores valores de resistência à compressão substituindo 15% do cimento Portland por cinza de bagaço de cana-de-açúcar quando comparado a menores níveis de substituições.

As imagens obtidas no estudo da interface fibra-matriz mostram uma maior aderência entre as fibras e a matriz cimentícia nos compósitos produzidos com a cinza de casca de arroz e os compósitos que não tiveram substituição do cimento Portland em relação aos compósitos produzidos com as cinzas de cama de frango e bagaço de cana-de-açúcar.

14.4 CONCRETO LEVE

A utilização do concreto leve requer precauções e estudos quanto ao dimensionamento das peças e sua utilização. Os resultados do estudo mostraram a viabilidade da utilização das cinzas na fabricação do concreto leve, com exceção da cinza de cama de frango e cinza de casca de arroz (Portugal), que apresentou resultados inadequados.

Como a absorção capilar é um mecanismo preponderante de entrada de água e de agentes agressivos através do concreto, os concretos em estudo podem ser considerados como de boa durabilidade, exceção feita aos provetes produzidos com cinzas de cama de frango e aqueles produzidos com cinza de casca de arroz (Portugal) que apresentaram fissuração.

De acordo com os resultados obtidos, nota-se que os valores de absorção dos provetes produzidos com a cinza de casca de arroz (Brasil), foram menores que o dos concretos controle, tendo possível explicação no tamanho das partículas apresentado por esta cinza, como os encontrados por COUTINHO (2003).

A substituição do cimento por 10% de cinzas levou à redução nos valores de permeabilidade dos concretos aos cloretos, em conformidade com os resultados apresentados por NEHDI *et al.* (2003), POSSAN *et al.* (2007) e ZHANG & MALHORTA (1996). Esses autores afirmaram que a inclusão de cinzas leva à redução no valor da penetração de cloretos nos concretos e, conseqüentemente, ao aumento da durabilidade destes.

Os valores obtidos para os ensaios de compressão e flexão aos 28 dias foram superiores àqueles encontrados por DANTAS & SBRIGHI (1986), que trabalharam com concreto leve, com diferentes composições.

A redução na resistência à compressão dos compósitos produzidos com cinza de cama de frango é consequência da baixa atividade pozolânica associada às condições de calcinação e à baixa superfície específica, como encontrado também por MESA VALENCIANO (1999).

15 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho, as cinzas de casca de arroz obtidas com as condições controladas de queima (tempo e temperatura) e de moagem, apresentaram desempenho adequado à aplicação em substituição parcial de cimento Portland na fabricação de compósito fibroso e concreto leve.

As cinzas de cama de frango e bagaço de cana de-açúcar apresentaram desempenho satisfatório, mas inferiores a cinza de casca de arroz quanto a utilização para a substituição do cimento Portland na produção de concreto. Mas, em razão das suas propriedades não pozolânicas, suas adições no concreto funcionam apenas como material inerte (*“micro filler”*).

Nos ensaios mecânicos dos compósitos fibrosos, a cinza de casca de arroz apresentou melhor efeito em relação às outras duas cinzas (comportamento que pode ser atribuído à estrutura amorfa da sílica presente neste aditivo e ao reduzido teor de carbono, que conferiram à cinza a maior reatividade). O nível de substituição apresentou diferença significativa em apenas um dos ensaios, ou seja, é possível a substituição parcial do cimento pelas cinzas estudadas em até 15%.

Nos ensaios físicos, a cinza de cama de frango apresentou melhores efeitos em relação às outras duas cinzas, sendo que o nível de substituição ideal encontrado foi o de até 15% para os três tipos de cinzas estudadas.

Nos ensaios com o concreto leve, a cinza de cama de frango apresentou-se inadequada quando da realização dos ensaios de flexão. Mas quando analisado no ensaio de compressão dos provetes, todas as cinzas analisadas apresentaram resultado final semelhantes (sem diferença estatística significativa).

Deve-se destacar que o emprego das cinzas estudadas é muito apropriado sob o ponto de vista ambiental, pois agrega valor aos resíduos agroindustriais, reduz o consumo de cimento Portland.

16 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADESANYA, D.A. Evaluation of blended cement mortar concrete and stabilized earth made from ordinary Portland cement and corn cob ash. **Construction and Building Materials**, v.10, n.6, p.451-456, 1996.
- AGGARWAL, L.K. Bagasse-reinforced cement composites. **Cement and Concrete Composites**, v.17, n.2, p.107-112, 1995.
- AGOPYAN, V. **Materiais reforçados com fibras para a construção civil nos países em desenvolvimento: o uso de fibras vegetais**. 1991. 204 f. Tese (Livre docência). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.
- AIQIN, W.; CHENGZHI, Z. Study of the influence of the particle size distribution on the properties of cement. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 5, p. 685-695, 1997.
- ALVES, A.A.; AZEVEDO, A.R.; SOUSA, F.M.; CIRÍACO, A.L.T. Digestibilidade e nutrientes digestíveis totais de camas de frango para ruminantes. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.28, n.5, p.1037-1041, 1999.
- ANGELO, J.C.; GONZALES, E.; KONDO, N.; ANZAI, N.H.; CABRAL, M.M. Material de cama: qualidade, quantidade e efeito sobre o desempenho de frangos de corte. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.26, n.1, p.121-130, 1997.
- ÂNGULO, S.C.; ZORDAN, S.E.; JOHN, V.M. **Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil**. São Paulo, Departamento Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, p. 1-13, 2001.
- ARAI, Y.; LANZIROTTI, A.; SUTTON, S.; DAVIS, J.A.; SPARKS, D.L. Arsenic speciation and reactivity in poultry litter. **Environmental Science and Technology**, v.37, n.18, p.4083-4090, 2003.
- ARMESTO, L.; BAHILLO, A.; VEIJONEN, K.; CABANILLAS, A.; OTERO, J. Combustion behaviour of rice husk in a bubbling fluidized bed. **Biomass & Bioenergy**, v.23, n.3, p.171-179, 2002.
- ASAVAPISIT, S.; RUENGRIT, N. The role of RHA-blended cement in stabilizing metal-containing wastes. **Cement and Concrete Composites**, v.27, n.7-8, p.782-787, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5642: Telha de fibrocimento – verificação da impermeabilidade**. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215:** Cimento Portland – determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578:** Cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768:** Aditivos para concreto de cimento Portland. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653:** Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655:** Concreto de cimento Portland – preparo, controle e recebimento - procedimento. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53:** Agregado graúdo – determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 68:** Concreto – determinação da consistência pelo espalhamento na mesa de Graff. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 137:** Argamassa e concreto – água para amassamento e cura de argamassa e concreto de cimento Portland, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:** Agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 3310-1:** Peneiras de ensaio – requisitos técnicos e verificação - Parte 1: peneiras de ensaio com tela de tecido metálico. Rio de Janeiro, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 109/C 109 M:** Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or 50-mm cube specimens). Pennsylvania, 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 230/C 230 M:** Standard specification for flow table for use in tests of hydraulic cement. Pennsylvania, 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 989**: Standard specification for ground granulated blast-furnace slag for use in concrete and mortars. Pennsylvania, 2006.

AVELLAR, M. Programa ABNT de meio ambiente. In: SEMINÁRIO SOBRE O MEIO AMBIENTE “ISO 14000 – UMA VISÃO ATUAL”, 3., 1995, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: 1995.

AVISITE. Disponível em: <<http://www.avisite.com.br/reportagem/usda2004>>. Acesso em 16/01/2006.

BEDNAR, A.J.; GARBARINO, J.R.; FERRER, I.; RUTHERFORD, D.W.; WERSHAW, R.L.; RANVILLE, J.F.; WILDEMAN, T.R. Photodegradation of roxarsone in poultry litter leachates. **The Science of the Total Environment**, v.302, n.1-3, p.237-245, 2003.

BELLAVER, C.; PALHARES, J.C.P. Uma visão sustentável sobre a utilização da cama de aviário. Informe EMBRAPA. 2003. Disponível em : http://www.aviculturaindustrial.com.br/site/dinamica.asp?id=5365&LogonInvalido=sim&tipo_tabela=cet&categoria=manejo

BERALDO, A.L. Compósito Biomassa Vegetal-Cimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 26., 1997, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: SBEA, 1997. p. 2.

BHATTACHARYA, A.N.; TAYLOR, J.C. Recycling animal waste as a feedstuff: a review. **Journal of Animal Science**, v.41, n.5, p.1438-1457, 1975.

BILBA, K.; ARSENE, M.; OUENSANGA, A. Sugar cane bagasse fibre reinforced cement composites. Part I. Influence of the botanical components of bagasse on the setting of bagasse/cement composite. **Cement and Concrete Composites**, v.25, n.1, p.91-96, 2003.

BRANCO, A.F. **Utilização de excrementos de aves na alimentação de ruminantes**. Belo Horizonte: UFMG, 35 p., 1984.

BUI, D.D.; HU, J.; STROEVEN, P. Particle size effect on the strength of rice rusk ash blended gap-graded Portland cement concrete. **Cement and Concrete Composites**, v.27, n.3, p.357-366, 2005.

CHANDRA, S.; BERNTSSON, L. Lightweight aggregate concrete – science, technology, and applications. Chapter 3: supplementary cementing materials. William Andrew Publishing Noyes, 2002.

CIB – **Agenda 21 para a construção sustentável**. Tradução de I. Gonçalves e T. Whitaker. São Paulo: G. Weinstock, D.M. Weinstock. São Paulo: EP/USP, 2000. 131p.

CINCOTTO, M.A.; KAUPATEZ, R.M.Z. Seleção de materiais quanto a atividade pozolânica. In: **Tecnologia de edificações**. São Paulo: IPT – Pini, 1988, p. 23-26.

CINCOTTO, M.A.; AGOPYAN, V.; JOHN, V.M. Optimization of rice husk ash production. In: SECOND INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM, 2., 1990, Salvador. **Proceedings...** Salvador: Universidade Federal da Bahia, 1990. p. 334-342.

CODLING, E.E.; CHANEY, R.L.; MULCHI, C.L. Use of aluminum and iron-rich residues to immobilize phosphorus in poultry litter-amended soils. **Journal of Environmental Quality**, v.29, n.6, p.1924-1931, 2000.

CONAB: Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em 16/01/2007.

COOK, D.F.; DADOUR, I.R.; KEALS, N.J.; Stable fly housefly (Diptera: Muscidae), and other nuisance fly development in poultry litter associated with horticultural crop production. **Journal Economic Entomology**, v.92, n.6, p.1352-1357, 1999.

COOK, D.J. Rice husk ash. In: SWAMY, R.N. (ed.) **Concrete technology and design – v.3 Cement Replacement Materials**. London: Blackie and Son Ltd, 1986, p. 171-196.

CORDEIRO, G.C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. 2006. 445p. Tese (Doutorado) – Coppe, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CORDEIRO, G.C.; TOLEDO FILHO, R.D.; FAIRBAIRN, E.M.R. Otimização do processo de queima da casca de arroz visando a obtenção de uma pozolana de elevada reatividade. In: JORNADAS SUD-AMERICANAS DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL, 31., 2004, Mendoza. **Proceedings...** Mendoza: Universidad Nacional de Cuyo, 2004. 12 p.

CORTEZ, L. Potential for burning stillage-industrial fuel oil emulsions in Brazil. In: International Symposium on Alcohol Fuels, 9., 1991, Florença. **Proceedings...** Florença, 1991.

COUTINHO, A.I.S. **Fabrico e propriedades do betão**. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1988.

COUTINHO, J.S. The combined benefits of CPF and RHA in improving the durability of concrete structures. **Cement and Concrete Composites**, v.25, n.1, p.51-59, 2003.

COUTINHO, J.S. **Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento da cofragem**. Porto:FEUP, 444p., 2005.

DANTAS, F.A.S.; SBRIGHI, C.N. Aproveitamento de rejeito de produção de alumínio, a partir da bauxita, como agregado para concreto. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE AGREGADOS, 1., 1986, São Paulo. **Anais...** São Paulo: EPUSP, 1986. p. 191-209.

DAVRAZ, M.; GUNDUZ, L. Engineering properties of amorphous silica as a new natural pozzolan for use in concrete. **Cement and Concrete Research**, v.35, n.7, p.1251-1261, 2005.

DELLA, V.P.; KÜHN, I.; HOTZA, D. Caracterização de cinza de casca de arroz para uso como matéria-prima na fabricação de refratários de sílica. **Química Nova**, v.24, n.6, p.778-782, 2001.

DELLA, V.P.; KÜHN, I.; HOTZA, D. Reciclagem de resíduos agro-industriais: cinza de casca de arroz como fonte alternativa de sílica. **Cerâmica Industrial**, v.10, n.2, p.22-25, 2005.

DELLA, V.P.; HOTZA, D.; JUNKES, J.A.; OLIVEIRA, A.P.N. Estudo comparativo entre sílica obtida por lixívia ácida da casca de arroz e sílica obtida por tratamento térmico da cinza de casca de arroz. **Química Nova**, v.29, n.6, p.1175-1179, 2006.

DI CAMPOS, M.S. **Aproveitamento das cinzas da queima da cama sobreposta de suínos para substituição parcial do cimento Portland**. 2005. 121 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2005.

DUGGAN, J.; BATES, M.P.; PHILLIPS, C.A. The efficacy of subsurface flow reed bed treatment in the removal of *Campylobacter* spp., faecal coliforms and *Escherichia coli* from poultry litter. **International Journal of Environmental Health Research**, v.11, n.2, p.168-180, 2001.

EL BOUSHY, A.R.Y.; VAN DER POEL, A.F.B. **Poultry feed from waste: processing and use**. London: Chapman & Hall, 1 ed., 1994. 438 p.

ENERGYSAVINGNOW. Disponível em:
<<http://energysavingnow.com/biomass/carsbioful.shtml>>. Acesso em 01/02/2005.

ESPERANCINI, M.S.T.; COLEN, F.; BUENO, O.C.; PIMENTEL, A.E.B.; SIMON, E.J. Viabilidade técnica e econômica da substituição de fontes convencionais de energia por biogás em assentamento rural do Estado de São Paulo. **Engenharia Agrícola**, v.27, n.1, p.110-118, 2007.

EUSEBIO, D.A.; CABANGON, R.J; WARDEN, P.G; COUTTS, R.S.P. The manufacture of wood fibre reinforced cement composites from *Eucalyptus pellita* and *Acacia mangium* chemithermomechanical pulp. In: PACIFIC RIM BIO- BASED COMPOSITES SYMPOSIUM, 4., 1998. Bogor. **Proceedings...** Bogor: Bogor Agricultural University, 1998. p. 428-36.

FADEL, R.; ROSA, B.; OLIVEIRA, I.P.; OLIVEIRA, J.D.S. Avaliação de diferentes proporções de água e de uréia sobre a composição bromatológica da palha de arroz. **Ciência Animal Brasileira**, v.4, n.2, p.101-107, 2003.

FANG, M.; YANG, L.; CHEN, G.; SHI, Z.; LUO, Z.; CEN, K. Experimental study on rice husk combustion in a circulating fluidized bed. **Fuel Processing Technology**, v.85, n.11, p.1273-1282, 2004.

FARIAS, J.A. **Cimento para alvenaria utilizando cinza de casca de arroz**. 1990. 90 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1990.

FENG, Q.; YAMAMICHI, H.; SHOYA, M.; SUGITA, S. Study on the pozzolanic properties of rice husk ash by hydrochloric acid pretreatment. **Cement and Concrete Research**, v.34, n.3, p.521-526, 2004.

FERREIRA, A.A.; SILVEIRA, A.A.; DAL MOLIN, D.C.C. A cinza da casca de arroz: possibilidades de utilização como insumo na produção de materiais de construção. In: I ENCONTRO NACIONAL SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 1., 1997, Canela. **Anais...** Canela: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 1997. p. 293-298.

FIALHO, E.T.; ALBINO, L.F.; THIRÉ, M.C. Avaliação química e digestibilidade dos nutrientes de alimentos, para suínos de diferentes pesos. **Revista da Sociedade Brasileira de Zootecnia**, v.13, n.3, p.360-374, 1984.

FIGUEIREDO, E.P.; RÊGO, J.H.S. Viabilidade técnica da cinza de casca de arroz produzida sem controle de temperatura como material substituto ao cimento. In: INTERNATIONAL CONFERENCE SUSTAINABLE CONSTRUCTION INTO THE NEXT MILLENNIUM: ENVIRONMENTALLY FRIENDLY AND INNOVATIVE CEMENT BASED MATERIALS, 2000, João Pessoa. **Proceedings...** João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba/The University of Sheffield, 2000. p. 255-266.

GARBARINO, J.R.; BEDNAR, A.J.; RUTHERFORD, D.W.; BEYER, R.S.; WERSHAW, R.L. Environmental fate of roxarsone in poultry litter. I. Degradation of roxarsone during composting. **Environmental Science and Technology**, v.37, n.8, p.1509-1514, 2003.

GARCIA, C.P.; AZEVEDO, A.R.; ALVES, A.A.; CIRÍACO, A.L.T. Digestibilidade de camas de frango à base de materiais absorventes alternativos. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.26, n.3, p.524-527, 1997.

GASPAR, R.M.B.L. **Utilização de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na região de Toledo - PR**. 2003. 106 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

GATTO, E.G.; KAWABATA, C.Y.; SAVASTANO JÚNIOR, H. Polpas kraft de *Agave sisalana* e de *Musa cavendishii* para reforço de fibrocimento alternativo. **Engenharia Agrícola**, v.23, n.2, p.211-220, 2003.

GEYER, A.L.B., MOLIN, D.D, CONSOLI, N.C. Recycling of sewage sludge from treatment plants of Porto Alegre city, Brazil, and its use as a addition in concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE SUSTAINABLE CONSTRUCTION INTO THE NEXT MILLENNIUM: ENVIRONMENTALLY FRIENDLY AND INNOVATIVE CEMENT BASED MATERIALS, 2000, João Pessoa. **Proceedings...** João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba/The University of Sheffield, 2000. p. 464-473.

GIANNASI, F.; THÉBAUD-MONY, A. Occupation exposures to asbestos in Brazil. **International Journal of Occupational and Environmental Health**, v.3, n.2, p. 150-157, 1997.

GUEDERT, L.O. **Estudo da viabilidade técnica e econômica do aproveitamento da cinza de casca de arroz com material pozolânico.** 1989. 147 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1989.

GUPTA, G.; CHARLES, S. Trace elements in soils fertilized with poultry litter. **Poultry Science**, v.78, n.12, p.1695-1698, 1999.

HANAFI, S.; ABO-EL-ENEIN, S.A.; IBRAHIM, D.M.; EL-HEMALY, S.A. Surface properties of silicas produced by thermal treatment of rice-husk ash. **Thermochimica Acta**, v.37, n.2, p.137-143, 1980.

HARA, N.; YAMADA, H.; INOUE, K.; INOUE, N.; TSUNEMATSU, S.; NOMA, H. Hydrothermal reactivity of rice husk ash and its use for calcium silicate products. In: THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE: FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE. **Proceedings...**, Trondheim, Norway, 1989. p. 114-123.

HASPARYK, N.P.; MONTEIRO, P.J.M.; CARASEK, H. Effect of sílica fume and rice husk ash on alkali-silica reaction. **ACI Materials Journal**, v.97, n.4, p. 486-492, 2000.

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

HERNÁNDEZ, J.F.M.; MIDDENDORF, B.; GEHRKE, M.; BUDELMANN, H. Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: study of the reaction. **Cement and Concrete Research**, v.28, n.11, p.1525-1536, 1998.

HOLM, T.A.; BREMNER, T.W. High strength lightweight aggregate concrete. In: SHAH, S.P.; AHAMAD, S.H. **High Performance Concrete: Properties and Applications**. Grã-Bretanha: McGraw-Hill, 1994. p. 341-374.

HORNING, G.; BRUNSCH, R.; SCHERPING, E. The influence of different litter materials on the emission of poultry manure. DIAS-Report Horticulture, v. 21, p. 58-65, 2000.

HOUSTON, D.F. Rice hulls. In: HOUSTON, D.F. (ed), Rice – Chemistry and technology, St. Paul: American Association of Cereal Chemists, Inc., p. 301-352, 1972

HOSSAIN, A.S.M.; HOQUE, A.M.; ZANIESWSKI, J.P. Stabilization of alluvial soils with cement and cement-rice husk ash blend for low-volume road construction in Bangladesh. In: Transportation Research Record n° 1291, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, p. 275-284, 1991.

HUANG, S.; JING, S.; WANG, J.; WANG, Z.; JIN, Y. Silica white obtained from rice husk in a fluidized bed. **Powder Technology**, v.117, n.3, p.232-238, 2001.

HWANG, C.L.; CHANDRA, S. Waste materials used in concrete manufacturing; Chapter 4: The use of rice husk ash in concrete. William Andrew Publishing/Noyes, 1997.

ISAIA, G.C. **Efeito de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura**. 1995. 140 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

ISAIA, G.C., GASTALDINI, A.L.G., MORAES, R. Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, v.25, n.1, p.69-76, 2003.

ISMAIL, M.S.; WALIUDDIN, A.M. Effect of rice husk ash on high strength concrete. **Construction and Building Materials**, v.10, n.7, p.521-526, 1996.

ISO 9933. Products in fibre-reinforced cement. Long corrugated or asymmetrical section sheets and fittings for roofing and cladding. International Organization for Standardization. 23 p. 1995.

JACKSON, B.P.; BERTSCH, P.M.; CABRERA, M.L.; CAMBERATO, J.J.; SEAMAN, J.C.; WOOD, C.W. Trace element speciation in poultry litter. **Journal of Environmental Quality**, v.32, n.2, p.535-540, 2003.

JAUBERTHIE, R.; RENDELL, F.; TAMBA, S.; CISSE, I. Origin of the pozzolanic effect of rice husks. **Construction and Building Materials**, v.14, n.8, p.419-423, 2000.

JOHN, V.M. Panorama sobre a reciclagem de resíduos na construção civil. In: DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 1999, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 1999.

JOHN, V.M. **Reciclagem de resíduos na construção civil**. 2000. 113 f. Tese (Livre-Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

JOSEPH, S.; BAWEJA, D.; CROOKHAM, G.D.; COOK, D.J. Production and utilization of rice husk ash – preliminary investigations. In: THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE: FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE. **Proceedings...**, Trondheim, Norway, 1989. p. 861-878.

KENT, N.L.; EVERS, A.D. Technology of cereals. Chapter 15 – Feed and industrial uses for cereals. 4th Edition; Woodhead Publishing, 1994.

KRISHNARAO, R.V.; SUBRAHMANYAM, J.; JAGADISH KUMAR T. Studies on the formation of black particles in rice husk silica ash. **Journal of the European Society**, v.21, n.1, p.99-104, 2000.

KUMAR, A. Rice husk ash based cements. Central and Ceramic Research Institute Jadavpur, Calcutta, India, p. 342-367, 1993.

ESPECIFICAÇÃO LNEC. **LNEC E 391**: Betões – Determinação da resistência à carbonatação. Lisboa, 1993

ESPECIFICAÇÃO LNEC. **LNEC E 393**: Betões – Determinação da absorção de água por capilaridade. Lisboa, 1993

ESPECIFICAÇÃO LNEC. **LNEC E 463**: Betões – Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário. Lisboa, 2004.

LOURENÇO, J.; JÚLIO, E.; MARANHA, P. Betões de agregados leves de argila expandida. Guia para a sua utilização. Lisboa: Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto. 196p. 2004.

LUDWIG, V.S. **A agroindústria processadora de arroz: um estudo das principais características organizacionais e estratégicas das empresas líderes gaúchas**. 2004. 137 p. Dissertação (Mestrado) – Centro de Estudos e Pesquisas em Agronegócios. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

LUXÁN, M.P.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. **Cement and Concrete Research**, v.19, n.1, p.63-68, 1989.

MAHAJAN, S.D. Fluidized bed combustion of rice for the production of char suitable for obtaining white ash. In: Singh, K.K. et al. (ed), *Avances in biomass gasification technology*, New Delhi: Himanshu Publications, p. 52-60, 1991.

MALONE, G.W. Evaluación de materiales de camada. **Industria Avícola**, Illinois, v.40, n.10, p.12-20, 1993.

MARTELLO, L.S.; CASADO, C.E.F.; SAVASTANO JR., H. Cinza de dejetos de suínos como adição em produtos à base de cimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31., 2002, Salvador. **Anais...** Salvador: SBEA, 2002.

MAZLUM, F.; UYAN, M. Strength of mortar made with cement containing rice husk ash and cured in sodium sulphate solution. ACI SP – 132, Malhotra, V.M., In: FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE: FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE. **Proceedings...**, Istanbul, Turkey, 1993. p. 513-531.

MEHTA, P.K. Rice husk ash: a unique supplementary cementing material. **Advances in Concrete Technology**, 2ª ed., Ottawa: Canmet, p. 407-431, 1992.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994. p. 300.

MESA VALENCIANO, M.C. **Incorporação de resíduos agroindustriais e seus efeitos sobre as características físico-mecânicas de tijolos de solo melhorado com cimento**. 1999. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade de Campinas, Campinas, 1999.

MME/EPE. Ministério de Minas e Energia. Balanço Energético Nacional. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/site/menu>>. Acesso em: 23/04/2005

MORENG, E.R.; AVENS, J.S. **Ciência e produção de aves**. São Paulo, Roca, 1990. p. 167-168.

MORAVIA, W.G.; OLIVEIRA, C.A.S.; GUMIERI, A.G.; VASCONCELOS, W.L. Caracterização microestrutural da argila expandida para aplicação como agregado em concreto leve estrutural. **Cerâmica**, v.52, n.322, p.193-199, 2006.

NAKATA, Y.; SUZUKI, M.; OKUTANI, T.; KIKUCHI, M.; AKIYAMA, T. Preparation and properties of SiO₂ from rice hulls. **Journal of the Ceramic Society of Japan**, v.97, n.1128, p.842-849, 1989.

NATARAJAN, E.; NORDIN, A.; RAO, A.N. Overview of combustion and gasification of rice husk in fluidized bed reactors. **Biomass and Bioenergy**, v.14, n.5/6, p.533-546, 1998.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**, 2 ed. São Paulo: Editora Pini, 828p., 1995.

NEVILLE, A.M. Aggregate bond and modulus of elasticity of concrete. **ACI Materials Journal**, v.94, n.1, p.71-74, 1997.

NORMA PORTUGUESA. **NP EN 196-1**: Métodos de ensaio de cimentos. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas. Caparica, 1996.

NORMA PORTUGUESA. **NP EN 197-1**: Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes. Caparica, 2001.

NORMA PORTUGUESA **NP EN 206-1**: Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade. Caparica, 2005

NORMA PORTUGUESA. **NP EN 450-1**: Cinzas volantes para betão. Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade. Caparica, 2006.

NORMA PORTUGUESA. **NP EN 933-1**: Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica – Método de peneiração. Caparica, 2000.

NORMA PORTUGUESA. **NP EN 934-2**: Adjuvantes para betão, argamassa e caldas de injeção. Parte 2: Adjuvantes para betão – Definições, requisitos, conformidade, marcação e rotulagem. Caparica, 2003.

NORMA PORTUGUESA. **NP EN 1008**: Água de amassadura para betão. Especificações para a amostragem, ensaio e avaliação da aptidão da água, incluindo água recuperada nos processos da indústria de betão, para o fabrico de betão. Caparica, 2003.

NORMA PORTUGUESA. **NP EN 1097-6**: Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água. Caparica, 2003.

NORDTEST METHOD. **NT BUILD 492**. Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. Espoo, 1999.

PACEWSK, B.; BUKOWSKA, M.; MOTLY, D.; SZAFRAN, M.; BLAZDELL, P. Rice-husk ash as pozzolanic material in cement pastes. In: NOCMAT/3 – VIETNAM INTERNATIONAL CONFERENCE ON NON-CONVENTIONAL MATERIALS AND TECHNOLOGIES. **Proceedings...**, Hanoi, Vietnam, 2002. p. 392-398.

PAULA, M.O. **Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland**. 2006. 60 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Agrícola e Ambiental, Universidade de Viçosa, Viçosa, 2006.

PEREIRA, J.A. Cultura do arroz no Brasil: subsídios para a sua história. Tereseina: EMBRAPA Meio-Norte, 2002. 226 p.

PHOTOSFORPEACE. Disponível em:

<<http://www.photosforpeace.org/photos/v/asia/nepal/steveiams/chickens.jpg.html>>. Acesso em 01/02/2005.

PITT, N. **Process for preparation of siliceous ashes**. United States Patent US 3.959.007, 1976

POSSAN, E.; VENQUIARUTO, S.D.; DAL MOLIN, D.C.C. Adição de cinza de casca de arroz no concreto: benefícios da durabilidade. In: VI ENCONTRO TECNOLÓGICO DA ENGENHARIA CIVIL E ARQUITETURA, 2007, Maringá. **Anais...** Maringá: 2007. p.1-10.

PRUDÊNCIO JÚNIOR, L.R.; SANTOS, S. Influência do grau de moagem na pozolanicidade da cinza da casca de arroz. In: WORKSHOP RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 1996, São Paulo. **Anais...** São Paulo: 1996. p.53-62.

PRUDÊNCIO JÚNIOR, L.R.; SANTOS, S.; DAFICO, D.A. Cinza de casca de arroz. In: ROCHA, J.C. & JOHN, V.M. **Utilização de resíduos na construção habitacional**. Porto Alegre: ANTAC, 2003. Cap. 8, p. 240.

RAMAMURTHY, K.; HARIKRISHNAN, K.I. Influence of binders on properties of sintered fly ash aggregate. **Cement and Concrete Composites**, v.28, n.1, p.33-38, 2006.

RAMACHANDRAN, V.S. Concrete admixtures handbook – properties, science, and technology. William Andrew Publishing/Noyes, 1995.

RASHWAN, M.S.; HATZINIKOLAS, M.; ZMAVC, R. Development of a lightweight, low-cost concrete block using wood residue. **Forest Products Journal**, v.42, n.5, p.57-64, 1992.

RIXON, M.R. Chemical admixtures for concrete. Chapter 7: Application of admixtures. Spon Press: London, 1999.

ROSKOVIC, R.; BJEGOVIC, D. Role of mineral additions in reducing CO₂ emission. **Cement and Concrete Research**, v.35, n.5, p.974-978, 2005.

ROSSI, L.A.; CARDOSO, P.E.R.; BERALDO, A.L. Avaliação térmica de placas de argamassa de cimento e casca de arroz aquecidas por resistência elétrica. **Engenharia Agrícola**, v.25, n.1, p.37-45, 2005.

ROSSIGNOLO, J.A. Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos – dosagem, produção, propriedades e microestrutura. 2003. 210 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SALAS, J.; CASTILLO, P.; ROJAS, M.I.S; VERAS, J. Empleo de cenizas de cáscara de arroz como adiciones en morteros. **Materiales de Construcción**, v.36, n.203, p.21-39, 1986.

SAMPAIO, J.; COUTINHO, J.S.; SAMPAIO, M.N. Portuguese rice husk ash as a partial cement replacement. In: SUSTAINABLE CONSTRUCTION INTO THE NEXT MILLENNIUM: ENVIRONMENTALLY FRIENDLY AND INNOVATIVE CEMENT BASED MATERIALS, 2000, João Pessoa. **Proceedings...** João Pessoa: Ed. BARBOSA, N.P.; SWAMY, R.N.; LYNSDALE, C., 2000. p. 125-137.

SAMPAIO J.; COUTINHO, J.S.; SAMPAIO, M.N. Melhoria do desempenho de betões pelo metacaulino. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: 2001. p.1-14.

SARMIENTO, C.R.; FREIRE, W.J. Argamassa de cimento e areia combinada com fibras de bagaço de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, v.17, n.2, p.1-8, 1997.

SATA, V.; JATURAPITAKKUL, C.; KIATTIKOMOL, K. Influence of pozzolan from various by-product materials on mechanical properties of high-strength concrete. **Construction and Building Materials**, v.21, n.7, p.1589-1598, 2007.

SAVASTANO JUNIOR., H. **Sistema de cobertura para construções de baixo custo: uso de fibras vegetais e de outros resíduos agroindustriais**. 2000. 144 p. Tese (Livre-Docência em Materiais e Componentes de Construção Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

SAVASTANO JUNIOR., H.; WARDEN, P.G.; COUTTS, R.S.P. Brazilian waste fibre as reinforcement for cement based composites. **Cement & Concrete Composites**, v.22, n.5, p.379-84, 2000.

SAVASTANO JUNIOR, H.; JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. PVA and cellulose pulp as substitutes of asbestos in fiber-cement for water tanks production. In: 2002 INTERNATIONAL INORGANIC-BONDED WOOD AND FIBER COMPOSITE MATERIALS CONFERENCE: OPPORTUNITIES FOR THE NEW MILLENNIUM, 2002, Sun Valley. Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials. Moscow: University of Idaho, 2002. v. 8, p. 143-149.

PIRES, A.J.V.; GARCIA, R.; VALADARES FILHO, S.C.; PEREIRA, O.G.; CECON, P.R.; SILVA, F.F.; SILVA, P.A.; ITAVO, L.C.V. Degradabilidade do bagaço de cana-de-açúcar tratado com amônia anidra e/ou sulfeto de sódio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.33, n.4, p.1071-1077, 2004.

SENSALE, G.R. Strenght development of concrete with rice rusk ash. **Cement and Concrete Composites**, v.28, n.2, p.158-160, 2006.

SHINOHARA, Y.; KOHYAMA, N. Quantitative analysis of tridymite and cristobalite crystallized in rice husk ash by heating. **Industrial Health**, v.42, n.2, p.277-285, 2004.

SKALNY, J. Sulfate attack on concrete. Chapter 2: Chemistry and physics of cement paste. Florence: Routledge, 2001.

SMITH, R. Rice husk ash cement, progress in development and application. **Intermediate Technology Development Group Limited**, 45 p., Londres, 1984.

SOUZA M.F.; BATISTA, P.S.; REGIANI, I.; LIBORIO, J.B.L.; SOUZA, D.P.F. Rice hull-derived silica: applications in Portland cement and mullite whiskers. **Materials Research**, v.3, n.2, p.25-30, 2000.

SOUZA, M.F.; MAGALHÃES, W.L.E.; PERSEGIL, M.C. Silica derived from burned rice hulls. **Materials Research**, v.5, n.4, p.467-474, 2002.

STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM. SAS, version 8.0, 1995.

SWAMY, R.N. Vegetable fibre reinforced cement composites - a false dream or a potential reality? In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON VEGETABLE PLANTS AND THEIR FIBRES AS BUILDING MATERIALS, 2., 1990, Salvador. **Proceedings...** London: Chapman and Hall, 1990. p. 3-8. (RILEM Proceedings, 7).

SWAMY, R.N. Sustainable concrete for infrastructures regeneration and reconstruction. In: INTERNATIONAL CONFERENCE SUSTAINABLE CONSTRUCTION INTO THE NEXT MILLENNIUM: ENVIRONMENTALLY FRIENDLY AND INNOVATIVE CEMENT BASED MATERIALS, 2000, João Pessoa. **Proceedings...**, João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba/The University of Sheffield, 2000. p. 15-44.

TABLER, T.G. How much litter do broilers produce? **Avian Advice**, v.2, n.1, p.6-8, 2002.

TAY, J.H.; SHOW, K.Y. Utilization of ashes from oil-palm wastes as a cement replacement material. **Water Science and Technology**, v.34, n.11, p.185-192, 1996.

TOLÊDO FILHO, R.D.; GHAVAMI, K.; ENGLAND, G.L.; SCRIVENER, K. Development of vegetable fibre-mortar composites of improved durability. **Cement & Concrete Composites**, v. 25, n. 2, p. 185-196, 2003.

TONOLI, G.H.D. **Aspectos produtivos e análise do desempenho do fibrocimento sem amianto no desenvolvimento de tecnologia para telhas onduladas**. 2006. 129 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2006.

USGS. United States Geological Survey – Cement Statistics and Information. Disponível em < <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement/>>. Acesso em 30/11/2004

VALADARES FILHO, S.C.; MAGALHÃES, K.A.; ROCHA JÚNIOR, V.R.; CAPELLE, E.R. **Tabelas Brasileiras de Composição de Alimentos para Bovinos**. Viçosa: UFV, 2006. p. 288.

VASCONCELOS, P.M.B. **Guia Prático Para o Confinador**. São Paulo: Nobel, 1993. p. 104-105.

VIEIRA, M.G. **Betões de elevado desempenho com agregados leves – Durabilidade e microestrutura**. 2000. 240 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2000.

VILLAR-COCIÑA, E.; VALENCIA-MORALES, E.; GONZÁLES-RODRÍGUEZ, R.; HERNÁNDEZ-RUÍZ, J. Kinetics of the pozzolanic reaction between lime and sugar cane straw ash by electrical conductivity measurement: A kinetic-diffusive model. **Cement and Concrete Research**, v.33, n.4, p.517-524, 2003.

ZHANG, M.H.; LASTRA, R.; MALHOTRA, V.M. Rice-husk ash paste and concrete: some aspects of hydration and the microstructure of the interfacial zone between the aggregate and paste. **Cement and Concrete Research**, v.26, n.6, p.963-977, 1996.

WCP. World Cement Production – Cement consumption by continent: 1985-2020. Disponível em: <www.palladianpublications.com/Cement/WC_regional_review_july04.htm>. Acesso em 03/04/2004.

WILLIAMS, C.M.; BARKER, J.G.; SIMS, J.T. Management and utilization of poultry wastes. **Revue Environmental Contamination Toxicology**, v.162, p.105-157, 1999.

YIN, G.G.; KOOKANA, R.S.; RU. Y.J. Occurrence and fate of hormone steroids in the environment. **Environment International**, v.28, n.6, p.545-551, 2002.

ZUCCO, L.L. **Estudo da viabilidade de fabricação de placas de compósitos à base de cimento e casca de arroz**. 1999. 118 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade de Campinas, Campinas, 1999.