

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**INFLUÊNCIA DA REQUEIMA NA POZOLANICIDADE DE CINZAS DE
BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR DE DIFERENTES CARACTERÍSTICAS**

Ramon Tadeu Lopes Ferreira
Orientadora: Prof.^a Maria Teresa Paulino Aguilar

Belo Horizonte
Janeiro/2015

Ramon Tadeu Lopes Ferreira

INFLUÊNCIA DA REQUEIMA NA POZOLANICIDADE DE CINZAS DE
BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR DE DIFERENTES CARACTERÍSTICAS

Dissertação apresentada a Escola de Engenharia da
Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos
requisitos para obtenção do título de Mestre em
Construção Civil. Área de concentração: Materiais de
Construção Civil. Linha de pesquisa: Resíduos como
Materiais de Construção Civil.

Orientadora: Prof.^a Maria Teresa Paulino Aguilari

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2015

Ramon Tadeu Lopes Ferreira

**INFLUÊNCIA DA REQUEIMA NA POZOLANICIDADE DE CINZAS DE
BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR DE DIFERENTES CARACTERÍSTICAS**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Construção Civil do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte, 20 de janeiro de 2015

Prof. Paulo Roberto Pereira Andery
Coordenador do Programa de Pós-graduação em Construção Civil

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Maria Teresa Paulino Aguilár
Orientadora - (UFMG/DEMC)

Prof.^a Dr.^a Rosemary Bom Conselho Sales
(UEMG/ED)

Prof. Dr. Augusto Cesar da Silva Bezerra
(CEFET/MG/DET)

F383i

Ferreira, Ramon Tadeu Lopes.

Influência da requeima na pozolanicidade de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar de diferentes características [manuscrito] / Ramon Tadeu Lopes Ferreira. – 2015.

xv, 64 f., enc.: il.

Orientadora: Maria Teresa Paulino Aguilár.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 55-64.

1. Construção civil - Teses. 2. Materiais de construção - Teses.
3. Bagaço de cana - Teses. I. Aguilár, Maria Teresa Paulino III.
II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III.
Título.

CDU: 691(043)

*“Todo mundo é um gênio.
Mas, se você julgar um peixe por
sua capacidade de subir em uma árvore,
ele vai gastar toda a sua vida
acreditando ser estúpido”.*
Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

À Deus por se mostrar presente em todos os momentos da minha vida.

À Prof.^a Dr.^a Maria Teresa Paulino Aguilár pela oportunidade, confiança e carinho. Pela orientação, dedicação, disponibilidade, compreensão e pelo conhecimento transmitido, que muito contribuiu para a minha formação pessoal e acadêmica.

À minha família por todo o carinho, paciência e por proporcionar que eu me tornasse quem sou. Ao meu filho João Pedro por fazer com que eu tenha de ser sempre uma pessoa melhor.

Aos amigos do Departamento e Mestrado em Construção Civil (Felipe, Fabíola, Dayana, Ricardo, Fernando e Rose), pela amizade, ajuda e companheirismo.

À VINA Equipamentos e Construções LTDA, representada por Cláudia Pires Lessa, pelo incentivo e apoio desde minha graduação.

Ao Engenheiro Tiago Couto da empresa Cimentos Brennand pela atenção e realização dos ensaios de granulometria.

Aos professores do Departamento de Materiais de Construção Civil da UFMG.

À todas as pessoas que de uma forma ou outra contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

O uso de materiais alternativos que minimizem o impacto ambiental, devido à emissão de gases, consumo de energia e de matéria prima na produção do cimento Portland se tornou nos últimos anos alvo de diversos estudos. Dentre eles, pode-se destacar as pesquisas sobre o uso de resíduos agroindustriais que podem agir como materiais pozolânicos, cimentícios, fíleres ou agregados. A utilização de cinzas de casca de arroz em substituição parcial ao cimento Portland é uma prática usual em alguns lugares do mundo. No Brasil, diversos estudos apontam para o uso de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar como materiais cimentícios suplementares, uma vez que o país é um dos maiores produtores mundiais de cana-de-açúcar. Trabalhos na literatura indicam que, dependendo do tipo, do processo de cultivo da cana-de-açúcar assim como das condições de queima do bagaço, as cinzas podem apresentar características pozolânicas, contribuindo para uma maior durabilidade dos compostos cimentícios. Essas características, usualmente, são associadas à granulometria, ao teor de sílica, e à presença de sílica amorfa no material. Neste contexto, este trabalho estuda a requeima como processo de beneficiamento e homogeneização de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar de diferentes origens. Para isto cinzas antes e após a requeima foram caracterizadas por meio de fluorescência de raios X, perda ao fogo, massa específica, difração de raios X, análise térmica, distribuição granulométrica, índice de atividade pozolânica, ensaio Chapelle Modificado, ensaio de condutividade elétrica, módulo de elasticidade e tração na flexão. A análise dos resultados obtidos indica que as propriedades mecânicas dos compostos cimentícios fabricados com substituição de 10% da massa de cimento pelo volume equivalente de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar justificam seu uso. No entanto, a requeima parece não favorecer a atividade pozolânica das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar assim como não contribuiu para a melhoria das propriedades mecânicas estudadas. A análise global dos dados indica que o mecanismo de ação das cinzas foi de preenchimento de vazios.

Palavras chave: Cinza de bagaço de cana-de-açúcar, requeima, pozolanicidade.

ABSTRACT

The use of alternative materials that can minimize the environmental impact (due to the emission of gases and the consumption of energy and raw materials) for the production of Portland cement in recent years became the focus of several studies. Among these studies, we can highlight the research on the use of agro-industrial waste that can act as pozzolanic material, cement, filler or aggregate. The partial replacement of Portland cement with rice husk ash is a common practice in some parts of the world. In Brazil, several studies point to the use of bagasse ash cane sugar as supplementary cementitious materials, since the country is one of the largest producers of cane sugar. Studies in the literature indicate that, depending on the type of cane sugar cultivation process as well as the bagasse burning conditions, the ashes may present pozzolanic characteristics, which contributes to greater durability of the cementitious compounds. These characteristics usually are associated with particle size, silica content, and the presence of amorphous silica in the material. In this context, this paper studies the blight as beneficiation process and homogenization of bagasse ash cane sugar from different sources. For this, ashes before and after the reburn were characterized by X-ray fluorescence, loss on ignition, density, X-ray diffraction, thermal analysis, particle size distribution, pozzolanic activity index, modified Chapelle test, electric conductivity test, modulus of elasticity and traction in flexion. The analysis of the results obtained indicate that the mechanical properties of cementitious compounds produced by replacing 10% of the cement mass the equivalent volume of cane bagasse ash justify its use. However, the reburn does not appear to favor the pozzolanic activity of the ashes of sugarcane bagasse as it did not contribute to the improvement of the mechanical properties studied. The global analysis of the data indicates that the mechanism of action of the ashes was to fill the empty spaces.

Keywords: Sugar cane bagasse ash; reburning; pozzolanicity.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1. Adições Minerai s	4
3.2. Adições Pozolânicas	7
3.2.1. Influências do uso de material pozolânico	10
3.3. Avaliação da Atividade Pozolânica	11
3.3.1. Estrutura do arranjo atômico	12
3.3.2. Análise química.....	12
3.3.3. Teste Frattini	13
3.3.4. Chappelle modificado	13
3.3.5. Condutividade elétrica.....	14
3.3.6. Índice de atividade pozolânica (IAP).....	16
3.3.7. Análises termodiferencial e termogravimétrica	17
3.4. Tipos de Adições Pozolânicas	18
3.5. Cinza de Bagaço de Cana-de-Açúcar	20
3.5.1. Cinza de bagaço de cana-de-açúcar como material pozolânico.....	23
3.5.2. Influência da requeima nas características das cinzas.....	25
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
4.1. Materiais	28
4.2. Métodos	30
4.2.1. Determinação das condições de requeima	30
4.2.2. Requeima.....	31

4.2.3.	Caracterização física e química.....	32
4.2.4.	Avaliação da atividade pozolânica.....	33
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
5.1.	Requeima das Cinzas de Bagaço de Cana-de-Açúcar	39
5.2.	Caracterização Física e Química.....	41
5.3.	Avaliação da Atividade Pozolânica	46
6.	CONCLUSÕES	53
7.	REFERÊNCIAS	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Fluxograma do processo de produção de cana de açúcar e álcool. Fonte: adaptado de MOREIRA e GOLDEMBERG, 1999 apud CORDEIRO, 2006.....	21
Figura 4.1 - Organograma do procedimento experimental.....	28
Figura 4.2 - Cinzas de bagaço de cana-de-açúcar.	29
Figura 4.3 - Aparato experimental para o ensaio de termogravimetria.	31
Figura 4.4 - Forno utilizado na requeima das cinzas.....	31
Figura 4.5 - Modelo de programação de requeima das cinzas.	32
Figura 4.6 - Aparato experimental para o ensaio de condutividade elétrica.	34
Figura 4.7 – Aparato experimental para Chappelle Modificado: ^a mufla e ^b banho-maria.	35
Figura 4.8 – Equipamentos utilizados para produção dos compostos cimentícios: ^a argamassadeira e ^b moldes.....	36
Figura 4.9 - Equipamento de compressão utilizado no ensaio.	36
Figura 4.10 – Execução do ensaio de tração na flexão.....	37
Figura 4.11 – Aparelho de frequência ressonante forçada para a determinação do módulo de elasticidade.	38
Figura 5.1 – Análise termogravimétrica e termodiferencial das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar <i>in natura</i>	39
Figura 5.2 – Derivada da curva termogravimétrica das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar <i>in natura</i>	40
Figura 5.3 – Difratomogramas de raios X das cinzas de cana-de-açúcar <i>in natura</i>	44
Figura 5.4 – Difratomogramas de raios X das cinzas de cana-de-açúcar requeimadas.....	45
Figura 5.5 – Resistência à compressão dos compostos cimentícios com e sem substituição de 10% da massa de cimento pelo volume equivalente de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, para relações água/cimento (A/C) e água/aglomerante (A/Ag) constantes, antes(AR) e pós requeima(PR).....	49
Figura 5.6 – Módulo de elasticidade dos compostos cimentícios com e sem substituição de 10% da massa de cimento pelo volume equivalente de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, para relações água/cimento (A/C) e água/aglomerante (A/Ag) constantes, antes(AR) e pós requeima(PR).	50
Figura 5.7 – Resistência à tração pela flexão dos compostos cimentícios com e sem substituição de 10% da massa de cimento pelo volume equivalente de cinzas de bagaço	

de cana-de-açúcar, para relações água/cimento (A/C) e água/aglomerante (A/Ag) constantes, antes (AR) e pós queima (PR). 52

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Classificação, composição, e características das adições minerais para concreto.	6
Tabela 3.2 - Composição química média das cinzas volantes brasileiras.	9
Tabela 3.3 - Exigências químicas e físicas segundo ABNT.....	19
Tabela 3.4 - Fração de sílica ativa e perda ao fogo em diversos estudos realizados no Brasil nos últimos anos.....	20
Tabela 5.1 - Resultado da análise química das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar <i>in natura</i>	41
Tabela 5.2 - Resultado da análise química das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar após a requeima.....	42
Tabela 5.3 – Distribuição granulométrica das cinzas de cana-de-açúcar <i>in natura</i> e pós requeima.	43
Tabela 5.4 – Avaliação da atividade pozolânica das cinzas de cana-de-açúcar por meio do ensaio Chapelle Modificado.	46
Tabela 5.5 - Avaliação da atividade pozolânica das cinzas de cana-de-açúcar por meio do ensaio de condutividade elétrica segundo o método proposto por Luxan <i>et al.</i> (1989).	47
Tabela 5.6 – Materiais utilizados para fabricação dos corpos-de-prova para determinação das resistências mecânicas e o módulo de elasticidade dos compostos cimentícios com cinzas (CCinza 1, CCinza 1M e CCinza 2) e sem cinzas de cana-de-açúcar, antes e pós requeima para relações água/cimento (A/C) e água/aglomerante (A/Ag) constantes, antes(AR) e pós requeima(PR).....	48
Tabela 5.7 – Índice de Atividade Pozolânica dos compostos cimentícios com e sem cinzas de cana-de açúcar, antes e pós requeima para relações água/cimento (A/C) e água/aglomerante (A/Ag) constantes, antes (AR) e pós requeima (PR).	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

% – Porcentagem.

°C – Grau Celsius.

a.C. – Antes de Cristo.

A/Ag – Relação água aglomerante.

A/C – Relação água cimento.

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ACI – American Concrete Institute.

Al₂O₃ – Óxido de Alumínio.

AR – Antes da requieima

ASTM - American Society for Testing and Materials.

C₂S – Silicato Dicálcio.

C₃A – Aluminato Tricálcio.

C₃S – Silicato Tricálcio.

C₃S₂H₃ – Bissilicato Tricálcio Hidratado.

Ca – Cálcio.

Ca(AlO₂)₂ – Aluminato de Cálcio

Ca(OH)₂ – Hidróxido de Cálcio.

CaCO₃ – Carbonato de Cálcio.

CaO – Óxido de Cálcio.

CAH – Aluminato de Cálcio Hidratado.

CCinza i – Composto cimentício produzido com cinza.

CIESP – Centro das Indústrias do Estado de São Paulo.

cm – Centímetro.

CO₂ – Dióxido de Carbono.

COPASA/MG - Companhia de Saneamento de Minas Gerais.

CPV – Cimento de alta resistência inicial.

CSH – Silicato de Cálcio Hidratado.

CTC – Centro de Tecnologia Canavieira.

Cu – Cobre.

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral.

DTA – Termodiferencial.

DTG – Derivada da termogravimetria.
E – Módulo de elasticidade.
Fe₂O₃ – Óxido de Ferro.
FIESP – Federação das Indústrias do Estado de São Paulo.
g – Grama.
g/l – Grama por litro.
H – Hidrogênio.
H₂O – Água.
ha – Hectare.
IAP – Índice de Atividade Pozolânica.
IP – Índice Pozolânico.
IPEA – Instituto de Pesquisas Econômicas Aplicadas.
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas.
K – Potássio.
K₂O – Óxido de Potássio.
kg – Quilograma.
kg/s – Quilograma por Segundo.
kV – Quilovolt.
LEE – Laboratório de Ensaios Especiais.
Ltda – Sociedade Limitada.
M – Massa molecular.
Máx – Máximo.
mg – Miligrama.
MgO – Óxido de Magnésio.
Mín – Mínimo.
ml – Mililitro.
mm – Milímetro.
MPa – Megapascal.
mS/cm – Milisiemens por Centímetro.
Na₂O – Óxido de Sódio.
NBR – Norma Brasileira.
NF – Norma Francesa.
NP – Norma portuguesa.
OH – Hidróxido.

pH – Potencial hidrogeniônico

PR – Pós requeima

SiO₂ – Sílica.

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento.

SO₂ – Dióxido de enxofre

SO₃ – Anidrido Sulfúrico.

TGA – Termogravimetria

UNICA – União da Indústria de Cana-de-açúcar.

μm – Micrómetro

μm – Microns

μV – Microvolt

ρ – Densidade

1. INTRODUÇÃO

O consumo de recursos naturais pela indústria da construção civil provoca grande impacto ambiental. A exploração desses recursos é da ordem de 40% do total de recursos extraídos no mundo, segundo estimativa descrita por GHAVAMI (2009). Associa-se a isto, o fato de que a produção de cimento Portland, principal insumo da construção civil, também impacta desfavoravelmente o meio ambiente. A produção mundial de cimento no ano de 2014 chegou a 4,04 bilhões de toneladas (CIMENTO, 2014). Atualmente, o Brasil é o maior produtor da América Latina e quarto colocado no ranking mundial, apresentando no ano de 2014 uma produção de 70 milhões de toneladas (SNIC, 2014). No processo de produção do clínquer, principal constituinte do cimento, são emitidos diversos gases poluentes, destacando-se o dióxido de carbono (CO₂) e dióxido de enxofre (SO₂). Aproximadamente 90% das emissões de CO₂ oriundas da fabricação de cimento ocorrem durante a produção do clínquer, nos processos de calcinação/descarbonatação da matéria prima, e de queima de combustíveis no forno (ABCP, 2010). De acordo com RUIZ-SANTAQUITERIA et al. (2009), a cada tonelada de clínquer produzido, são lançados na atmosfera 870 kg de CO₂. Um dos grandes desafios para as indústrias é aliar a crescente demanda de produção à adoção de medidas sustentáveis. Diversos estudos analisam a substituição parcial do clínquer por resíduos industriais ou agrícolas que poderiam atuar como materiais cimentícios ou pozolânicos (CVALCANTI e RIBEIRO, 2013; CORDEIRO e BARROSO, 2011; COCIÑA et al. 2013; FERREIRA et al, 2014).

O Brasil é um dos grandes produtores de cana-de-açúcar no mundo. A safra 2013/14 foi de 653,5 milhões de toneladas (UNICA, 2014). Da cana-de-açúcar é extraído o caldo, que é utilizado para a fabricação de açúcar e etanol, sendo, gerado o bagaço, que constitui o maior resíduo da agricultura brasileira, aproximadamente 70% da produção nacional (IPEA, 2012). Uma tonelada de cana de açúcar gera em média 280 kg de bagaço (CTC, 2010), logo, para a safra 2013/2014 são esperados 182,98 milhões de toneladas de bagaço. Normalmente este subproduto é empregado como combustível em processos de cogeração de energia: a partir da combustão do bagaço, a usina de açúcar e álcool gera vapor a alta pressão que é expandido em turbinas produzindo energia mecânica/elétrica (LAMONICA, 2007; SOUZA et al., 2007). A queima do bagaço de

cana-de-açúcar gera, além de vapor, cerca de 2,4% de cinzas, que contêm, aproximadamente, 77% de areia e pó de carvão (FIESP/CIESP. 2001; CORDEIRO, 2006). Por conter alto teor de sílica e baixa porcentagem de nutrientes, a utilização das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar na adubação orgânica exige correções que limitam seu uso como tal (CORDEIRO, 2006).

Uma alternativa de uso das cinzas de cana-de-açúcar seria como adição para concretos, uma vez que outros tipos de cinzas já são utilizadas como fíler ou materiais pozolânicos, sendo, em ambos os casos, materiais importantes para a fabricação de concretos duráveis. O maior limitante à sua utilização é a variabilidade das características físico e químicas das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar produzidas, uma vez que essas características dependem do tipo de cana cultivada, do tipo de solo, do clima, do processo de queima do bagaço, e da finura das cinzas produzidas (CORDEIRO, 2006). De acordo com Soares (2010) e Cordeiro *et al.* (2009)b, o processo de requeima controlada deste material poderia potencializar as características pozolânicas das cinzas. Neste contexto, este trabalho estudou o processo de requeima de forma a uniformizar e potencializar as características pozolânicas de cinzas de diferentes origens, por meio de ensaios de caracterização química e física e avaliação da pozolanicidade do material. Este estudo poderá contribuir para a homogeneização e potencialização de diferentes cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, viabilizando seu uso como material pozolânico na substituição parcial do cimento Portland.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da requeima na atividade pozolânica de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar de diferentes características. Para isto os objetivos específicos deste trabalho são:

- estudar diferentes métodos de avaliação da pozolanicidade;
- estudar as condições de requeima;
- estudar a influência da requeima na uniformização e potencialização das características pozolânicas das cinzas tratadas.
- estudar a influência das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar na resistência mecânica e no módulo de elasticidade.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Adições Minerais

Adições minerais são materiais silicosos finamente moídos, que são adicionados em grandes proporções ao concreto, de forma a somar ou substituir parcialmente à massa de cimento Portland (MEHTA E MONTEIRO, 2008), por isso, muitas vezes, são chamados de materiais cimentícios suplementares. De acordo com Gonçalves e Margarido (2012), as adições minerais devem ser chamadas de materiais cimentícios, uma vez que participam da reação de hidratação de forma a produzir mais material ligante, silicatos e/ou aluminatos de cálcio hidratados (CSH e/ou CAH), que conferem maior compacidade à microestrutura e maior resistência mecânica.

As adições minerais tem a capacidade de produzir efeitos químicos e físicos na microestrutura do concreto. O efeito químico está associado à capacidade do material reagir na presença de água com hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), ou aluminato de cálcio ($\text{Ca(AlO}_2)_2$), dando origem ao silicato de cálcio hidratado. A velocidade desta reação dependerá da superfície específica das partículas, de sua composição química e de seu arranjo cristalino. Diversos efeitos físicos são gerados pelas adições ao concreto:

- efeito microfíler que consiste no aumento da densidade da mistura, devido ao preenchimento dos vazios;
- refinamento da estrutura de poros uma vez que as pequenas partículas das adições agem como pontos de nucleação para os produtos hidratados;
- alteração da microestrutura da zona de transição, pois as adições tem a capacidade de interferir na movimentação das partículas de água, promovendo a redução da água de exsudação e do acúmulo de água livre retida sobre os agregados.

De acordo com Isaia (2005), o uso de adições minerais contribui para a redução do consumo de energia na produção de cimento e da poluição gerada, assim como para o aumento da trabalhabilidade e durabilidade do concreto. Mehta e Monteiro (2008) e Isaia (2007), apresentam diversos efeitos benéficos proporcionados pela utilização destes materiais. Quanto à reologia obtém-se melhora na coesão e trabalhabilidade,

redução da exsudação e segregação de agregados. A resistência mecânica também se beneficia de seu uso uma vez que ocorre ganho de resistência à compressão e tração. De maneira geral a utilização de adições minerais propicia maior durabilidade aos compostos produzidos, pois reduz a porosidade capilar, obtendo menor permeabilidade e absorção; proporciona maior resistência ao ataque por sulfatos, são inibidores de reações expansivas álcali-agregado e ainda reduzem a difusão de cloretos e entrada de oxigênio que favorecem a corrosão de armaduras.

Para Gonçalves e Margarido (2012), adições minerais podem ser classificadas como materiais pozolânicos ou pozolanas e materiais cimentantes, também chamados de ligantes hidráulicos latentes. Segundo Dal Molin (2005), as adições minerais podem ser classificadas como materiais cimentantes, materiais não reativos (fíleres) e materiais pozolânicos. Mehta e Monteiro (2008), classificam os aditivos minerais como materiais pozolânicos, cimentantes e materiais tanto cimentantes como pozolânicos. Uma classificação dos aditivos minerais de acordo com suas características pozolânicas ou cimentantes, segundo estes autores, é apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Classificação, composição, e características das adições minerais para concreto.

Classificação	Composição química e mineralógica	Características das partículas
Cimentantes		
Escória granulada de alto-forno	Silicatos vítreos contendo cálcio, magnésio, alumínio e sílica.	Não estando processado tem as dimensões da areia. Antes de ser usado deve ser seco e moído até partículas menores do que 45 µm. Possuem textura grossa.
Cimentantes e Pozolânicos		
Cinza volante (cimentante e pozolânico) com alto teor de cálcio.	Vidro de silicato, contendo principalmente cálcio, magnésio, alumínio e álcalis. A pequena porção cristalina é composta por quartzo e C ₃ A.	Pó com 10 - 15% de partículas maiores que 45 µm. Muitas partículas são esferas sólidas menores que 20 µm de diâmetro.
Pozolanas altamente reativas		
Microssílica	Constituída de sílica pura na forma não cristalina.	Pó extremamente fino, constituído de esferas sólidas de diâmetro médio de 0,1 µm.
Cinza de casca de arroz	Constituída de sílica pura na forma não cristalina.	As partículas são menores que 45 µm.
Pozolanas comuns		
Cinza volante de baixo teor de cálcio	Vidro de silicato contendo alumínio, ferro e álcalis. Pequena quantidade de matéria cristalina, geralmente quartzo, mulita, silimanita, hematita e magnetita.	Pó com 10 - 15% de partículas maiores que 45 µm. Muitas partículas são esferas sólidas menores que 20 µm de diâmetro.
Materiais naturais	As pozolanas naturais contêm quartzo, feldspato e mica, além de vidro de aluminossilicato.	As partículas são moídas abaixo de 45 µm, na maior parte tem textura rugosa.
Pozolanas pouco reativas		
Escória de alto-forno resfriada lentamente, cinza de grelha, escória, cinza de casca de arroz queimada em campo.	Constituídas de silicatos cristalinos e somente uma pequena parcela de matéria não cristalina.	Podem ser moídas a um pó fino, para desenvolver certa atividade pozolânica. Possuem textura rugosa.

Fonte: Adaptada de Mehta e Monteiro, 2008.

Segundo Isaia (2005), a hidratação das adições minerais é lenta, e seu produto cimentante não é suficiente para sua aplicação isolada, sendo, normalmente, utilizado como adição ou substituição parcial do cimento Portland. Sua hidratação pode ser acelerada quando em presença de hidróxido de cálcio e gipsita.

Material cimentante é aquele que não necessita de hidróxido de cálcio para produzir compostos cimentantes, possui hidratação lenta e seus produtos aglutinantes normalmente são insuficientes para sua utilização com fins estruturais, comumente utiliza-se cimento Portland para acelerar sua hidratação (DAL MOLIN, 2005 e SILVA, 2007).

Segundo ISAIA (2007), o fíler é uma adição mineral finamente dividida, com diâmetro próximo ao do cimento Portland, que apresenta ação física com a capacidade de melhorar algumas propriedades do concreto, desde que esteja em teores inferiores a 15% em relação à massa do cimento. São inertes, mas podem apresentar alguma atividade hidráulica ou reagir com alguns compostos do clínquer. Nas melhorias proporcionadas ao concreto, pode-se citar o aumento da trabalhabilidade e massa específica, redução da permeabilidade, exsudação e fissuração.

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 11578 (1997), a proporção máxima de filler utilizado para o cimento Portland é de 10%. Segundo ACI 234R-96 (2001), o efeito fíler é o empacotamento dos sólidos presentes, devido ao preenchimento dos vazios entre as partículas de cimento. Dessa forma, promovem o refinamento dos poros (CORDEIRO *et al.*, 2008). Este material pode ter origem natural ou industrial.

Segundo a ABNT NBR 12653 (2012), materiais pozolânicos são materiais silicosos ou silicoaluminosos que, sozinhos, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, porém, estando finamente divididos e na presença de água, têm a capacidade de reagir com hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando compostos aglomerantes (CSH, CAH).

3.2. Adições Pozolânicas

Todo material inorgânico que endurece em contato com a água e misturado com hidróxido de cálcio deve ser chamado de pozolana (MASSAZZA, 1988). O termo pozolana é um nome derivado da cidade italiana Pozzuoli, localizada nas imediações do Vesúvio, onde são encontradas cinzas vulcânicas que foram utilizadas na construção do

Império Romano. Embora seu nome hoje esteja mais ligado aos materiais produzidos industrialmente, ou derivados de cinzas volantes de processos de queima industrial, sua origem está na natureza: pozolanas são rochas de origem vulcânica. Essa rocha é constituída de argilas, siltes e areias, ricos em sílica não cristalina. Possui coloração clara, variando do branco ao cinza escuro.

As primeiras evidências das pozolanas foram observadas em edificações gregas e romanas, construídas aproximadamente 2000 anos a.C. Os romanos desvendaram que, misturando uma cinza vulcânica encontrada nas proximidades do monte Vesúvio (Itália), chamada pozolana, com cal hidratada (proporção variável, de 25% a 45%), conseguiam um aglomerante que endurecia em contato com a água (KAEFER, 1998).

Segundo a ABNT NBR 12653 (2012), os materiais pozolânicos podem ter diversas origens. As pozolanas naturais, de formação vulcânica, geralmente de caráter petrográfico ácido ou de origem sedimentar. As pozolanas artificiais são provenientes de tratamentos térmicos ou são subprodutos industriais, também são encontradas as cinzas volantes, que são resíduos finamente divididos resultantes da combustão de carvão mineral.

De acordo com Isaia (2007), os materiais pozolânicos são constituídos principalmente por óxido de alumínio, de ferro e cálcio e anídrico sulfúrico. A Tabela 3.2 apresenta a variação da composição química das cinzas volantes, material pozolânico mais utilizado na produção de cimento Portland no Brasil.

Tabela 3.2 - Composição química média das cinzas volantes brasileiras.

Constituintes	Teor (%)
SiO ₂	55,62 – 60,85
Al ₂ O ₃	28,85 – 29,25
Fe ₂ O ₃	7,15 – 3,15
CaO	1,36 – 2,32
MgO	0,94 – 0,48
SO ₃	0,35 – 0,20
Na ₂ O	0,23 – 0,36
K ₂ O	2,32 – 1,28

Fonte: Isaia (2007)

Segundo Neville e Brooks (2010), a hidratação do cimento Portland consiste na reação entre a água (H), os silicatos (C₃S e C₂S) e aluminatos (C₃A e C₄AF) de cálcio presentes no mesmo. Esta interação produz compostos hidratados que, com o decorrer do tempo produzem uma massa sólida e resistente. As reações de hidratação aproximadas são apresentadas nas equações abaixo:



De acordo com Freire e Beraldo (2004) e Cordeiro (2006), o material pozzolânico possui sílica amorfa que reage com o hidróxido de cálcio liberado na reação de hidratação do cimento Portland, formando um composto aglomerante, pode-se formar também aluminatos e sílicoaluminatos. De acordo com Scrivener e Nonat (2011) e Soares (2010) nem sempre as fases amorfas são mais reativas que fases cristalinas. Divergências entre resultados de diferentes ensaios para uma mesma amostra foram obtidos por Pádua

(2012), evidenciando esta ocorrência. De acordo com Scandiuzzi e Andriolo (1986), o material pozolânico de boa qualidade é aquele que apresenta melhor fixação de hidróxido de cálcio com uma maior velocidade de reação, estando diretamente ligada à finura com que este material se encontra, quanto mais fino maior sua capacidade de reação.

3.2.1. Influências do uso de material pozolânico

Mehta e Monteiro (2008), apresentam uma comparação entre a formação de CSH com cimento Portland e com cimento pozolânico, onde três aspectos são ressaltados:

- a reação pozolânica é lenta, logo a liberação de calor e ganho de resistência também são lentas;
- a reação consome óxido de cálcio ao invés de produzi-lo, o que é uma grande contribuição para a durabilidade da pasta endurecida contra meios ácidos;
- os produtos da reação são muito eficientes no preenchimento dos espaços capilares, aumentando a resistência e reduzindo a permeabilidade do sistema.

De acordo com Isaia (2007) e Mehta e Monteiro (2008), os materiais pozolânicos têm a capacidade de produzir diversos efeitos nas propriedades do concreto, alterando a reologia, o calor de hidratação, a retração de secagem, a resistência à compressão e tração, o módulo de deformação, e a durabilidade. A reologia é afetada quando os diâmetros médios das partículas desse material são inferiores ao do cimento, alterando a coesão e a viscosidade do concreto no estado fresco e aumentando o consumo de água.

O uso dos materiais pozolânicos tem a capacidade de reduzir o calor de hidratação no tempo, uma vez que a reação pozolânica é mais lenta; aumentar a retração por secagem, pois a retração é diretamente ligada à quantidade de CSH na pasta de cimento, a qual é relativamente maior em cimentos pozolânicos. O uso destes materiais provoca o aumento da resistência mecânica à compressão e à tração em todas as idades, devido ao refinamento de poros e de grãos, e melhoria na microestrutura da zona de transição. O módulo de elasticidade não acompanha os resultados da resistência mecânica: o módulo cai de acordo com o aumento da proporção de adição (ISAIA, 2007; MEHTA E MONTEIRO, 2008).

Segundo Mehta e Monteiro (2008) e Isaia (2007), a durabilidade, também é bastante afetada por este tipo de adição, pois a porosidade capilar é reduzida, devido aos silicatos e sílicoaluminatos de cálcio hidratados que precipitam nos poros reduzindo a permeabilidade. As adições pozolânicas aumentam a resistência ao ataque por sulfatos principalmente por reduzir a quantidade de Ca(OH)_2 disponível para a reação com sulfatos, que produz etringita, um produto expansivo. A reação álcali-agregado é minimizada devido à redução da porosidade, dos álcalis totais e por desfavorecer a absorção de álcalis. A corrosão das armaduras pode ser reduzida com o uso de materiais pozolânicos, uma vez que sua utilização reduz a difusão de cloretos, a entrada de água e oxigênio no concreto. A corrosão da armadura devido à carbonatação do concreto pode ser mais propícia devido ao uso de pozolana, pois ocorre uma diminuição da reserva alcalina. No entanto, pode ser minimizada com uma cura adequada, de forma a reduzir a porosidade e permeabilidade superficial e barrar a entrada de CO_2 . Segundo Sales (2014), o uso de materiais pozolânicos na produção de compostos cimentícios tem a capacidade de consumir os íons Ca^{2+} e OH^- , o que proporciona o aumento da resistividade elétrica do material, o que muito contribui para a não ocorrência da corrosão das armaduras.

3.3. Avaliação da Atividade Pozolânica

Não existe um método específico que permita determinar o comportamento de um material pozolânico, uma vez que não há correlação entre os ensaios e sua eficiência em um cimento Portland (COUTINHO, 1997). De acordo com DONATELLO *et al.*, (2010), os métodos para avaliação da atividade pozolânica podem ser descritos como diretos, que avaliam a variação do teor de Ca(OH)_2 com o tempo, e métodos indiretos, que medem propriedades físicas e mecânicas do material pozolânico ou de compostos produzidos com esse material. O teste Frattini, o teste da cal saturada, o ensaio Chapelle Modificado, a medida da condutividade elétrica pelo método Luxan são exemplos de métodos diretos. Testes de resistência mecânica, resistividade elétrica, termogravimetria, termodiferencial e Índice de Atividade Pozolânica (IAP) são exemplos de métodos indiretos. A presença e o teor de determinados compostos químicos, a sílica vítrea e a sua quantificação também têm sido considerados indicativos

de atividade pozolânica (ABNT NBR 12653, 2012; ASTM C 218, 2005; DONATELLO *et al.*, 2010).

3.3.1. Estrutura do arranjo atômico

De acordo com Cordeiro *et al.* (2008) e Freire e Beraldo (2004), um arranjo não cristalino muito contribui para a atividade pozolânica de um material. A difração de raios-X é um dos principais métodos de se caracterizar a estrutura do arranjo atômico de um material cristalino (apresenta átomos ordenados sobre longas distâncias atômica). Um feixe de raios-X ao difratar sobre o material em estudo permite a determinação de seu ângulo de difração. Com este dado é possível determinar a distância entre os planos no cristal e assim identificar a composição do elemento estudado.

O ensaio de espectroscopia infravermelha é um método que obtém os melhores resultados de investigação e/ou identificação de compostos para amostras amorfas. Ao emitir radiação eletromagnética com exatamente a mesma energia de vibração de um elemento constituinte da amostra, a luz será absorvida por este componente. A energia de vibração de um elemento depende da forma da superfície de energia potencial da molécula, da geometria molecular, das massas dos átomos e eventualmente do acoplamento vibrônico HAACK (2010).

3.3.2. Análise química

A determinação da composição química de um material supostamente pozolânico, tem como objetivo a classificação do mesmo em relação às recomendações normativas prescritas pela ABNT NBR 12653 (2012). A análise química semiquantitativa por espectrometria de fluorescência de raios X é um ensaio prático e rápido para a determinação dos elementos presentes em amostras, além de constituir um método de análise passível de ser aplicado à grande maioria dos elementos. Uma fonte de raios X é utilizada para ionizar níveis internos dos átomos de uma amostra de modo a excitá-la. No retorno do material ao seu estado fundamental, ocorre à liberação da energia em excesso acumulada em forma de um fóton X, esta energia é característica do elemento,

sua identificação e análise permite quantificar e determinar a composição da amostra em estudo (CARVALHO, 2013).

3.3.3. Teste Frattini

Este método de ensaio é datado de 1954. O ensaio consiste em duas etapas. Na primeira, coloca-se 6 g de material pozolânico, 14 g de cimento e 100 cm³ de água destilada em um erlenmayer sob forte agitação. Após a mistura, o frasco é fechado e mantido a 40°C por 7 dias. Decorrido este período se inicia a segunda etapa de ensaio, onde a solução é filtrada em papel filtro com poro nominal de 2,7 µm e resfriada até a temperatura ambiente. Após tal procedimento, se determina o teor de álcalis, em milimoles de OH⁻ por litros e o teor em óxido de cálcio. Com o auxílio de um diagrama de solubilidade de hidróxido de cálcio a 40°C em função do teor de álcalis, determina-se a saturação ou não da solução filtrada. Para que o material supostamente pozolânico seja considerado reativo e satisfatória a sua adição ao cimento Portland, a solução obtida não deve estar saturada de hidróxido de cálcio, indicando que a mesma reagiu com o material pozolânico (DONATELLO *et al.*, 2010).

Segundo Donatello *et al.* (2010), uma variante simplificada desse método é o ensaio da cal satura, que tem a possibilidade de realização do ensaio em diferentes tempos, uma vez que não é necessário esperar o fim da reação de hidratação do cimento. Neste ensaio é utilizada uma solução de cal saturada com cimento Portland, material pozolânico e água. A quantidade de cal fixada pelo material pozolânico é determinada pela medição residual de cálcio dissolvido.

3.3.4. Chapelle modificado

O ensaio Chapelle Modificado é um método direto que avalia a capacidade do material de fixar hidróxido de cálcio. A ABNT NBR 15895 (2010) explicita as orientações para a realização deste ensaio, assim como a listagem dos materiais que podem ser avaliados (pozolanas naturais, pozolanas artificiais, argilas calcinadas, cinzas volantes, sílica ativa e metacaulim).

O procedimento de ensaio consiste basicamente em preparar uma solução contendo 2 g de óxido de cálcio, 1 g do material pozolânico e 200 ml de água destilada. Esta solução deverá permanecer em banho-maria e agitação mecânica por 16 horas. Ao final desta etapa, 50 ml desta nova solução é titulada com uma solução contendo 0,1 M de ácido clorídrico e 1 g/L de fenolftaleína como indicador. A titulação deve terminar com a mudança da coloração rósea para transparente da solução e o volume de ácido clorídrico deve ser anotado. O mesmo procedimento de ensaio deve ser realizado para uma amostra em branco, não contendo o material pozolânico. A fórmula utilizada para a determinação do Índice Pozolânico é apresentada na Equação 3.4:

$$IP = \frac{28 \cdot (V_3 - V_2) \cdot F_c}{M_2} * 1,32 \quad (3.4)$$

onde: IP é o índice pozolânico, M2 é a massa de material pozolânico, V2 é o volume de ácido consumido com o material pozolânico em ml, V3 é o volume de ácido consumido no ensaio em branco, Fc é o fator de correção do ácido clorídrico e 1,32 é a relação molecular do Ca(OH)₂/CaO.

A ABNT NBR 15895 (2010) não determina um limite mínimo de IAP para que o material seja considerado pozolânico ou não. Raverdy *et al.* (1980) prescrevem que para ser considerado pozolânico, o mesmo deve proporcionar fixação de no mínimo 330 mg de hidróxido de cálcio por amostra. De acordo com a Association Française de Normalisation (NF) P18-513 (2010), o material pozolânico é aquele que apresenta valores de fixação superiores a 700 mg de hidróxido de cálcio.

3.3.5. Condutividade elétrica

De acordo com Luxan *et al.* (1989), Raask e Bhaskar, em 1975, elaboraram um método de avaliação da atividade pozolânica por meio da condutividade elétrica, medindo a quantidade de sílica dissolvida em uma solução de ácido fluorídrico. O método proposto por Luxan avalia a atividade pozolânica de um material através da variação da condutividade elétrica em uma solução de cal saturada.

O procedimento de ensaio consiste em preparar a solução saturada de cal, utilizando água destilada (200 ml) e hidróxido de cálcio (2,0 g) e medir a condutividade elétrica inicial desta solução a 40°C, com o auxílio de um condutivímetro e um agitador magnético com aquecimento. Após esta primeira medida de condutividade deve-se acrescentar à solução 5 g do material em estudo e, após 2 minutos, deve-se medir novamente a condutividade elétrica da solução, com o objetivo de se obter a variação de condutividade em função do tempo.

Se o material em estudo for pozolânico, a condutividade elétrica da mistura deve cair devido à menor disponibilidade de íons OH⁻ e Ca⁺². Luxan *et al.* (1989) propõe uma classificação para a amostra estudada, quando a variação de condutividade elétrica for menor que 0,4 mS/cm o material é considerado não pozolânico, se o valor obtido estiver entre 0,4 e 1,2 mS/cm a amostra é pozolânica moderada e para valores maiores que 1,2 mS/cm o material é considerado com boa atividade pozolânica.

McCarter e Tran (1996), propõem um método otimizado que baseia-se no apresentado por Luxan *et al.* (1989), porém, a avaliação da variação de condutividade elétrica de uma amostra, no ensaio ocorre ao longo de 2 dias. O procedimento consiste em medir a condutividade elétrica de uma solução de hidróxido de cálcio antes e depois da adição de um material pozolânico à solução. A temperatura de ensaio deve ser controlada, mantida a 20°C e a coleta de dados deve ser realizada a cada 10 minutos. Dessa forma, o aparato experimental deve executar esta tarefa automaticamente, devido ao grande tempo gasto para a realização do mesmo. Após a realização do ensaio são produzidos dois gráficos: condutividade elétrica (Siemens por metro) x tempo (horas); e o segundo é obtido da normalização do anterior. Os gráficos citados anteriormente permitem a análise comparativa da evolução da condutividade elétrica no tempo. Como a reação pozolânica é muito lenta, este ensaio permite uma melhor caracterização da amostra em estudo.

3.3.6. Índice de atividade pozolânica (IAP)

3.3.6.1 Índice de atividade pozolânica com cimento

Este ensaio, que é um método indireto para se avaliar a atividade pozolânica de um material, é descrito pela norma brasileira ABNT NBR 5752, (1992), e pela Norma Portuguesa (EN) 4220, (2010). De acordo com as normas, este índice é determinado produzindo-se dois traços diferentes de argamassa. O primeiro traço, de referência, é produzido na proporção 1:3, utilizando areia normal; no segundo traço, a proporção utilizada é a mesma para cimento e areia, diferindo apenas na substituição parcial de 35% (ABNT), qualquer proporção (NP), de cimento pelo material pozolânico. De acordo com Donatello *et al.*, (2010), este método é bastante utilizado para a determinação da atividade pozolânica de um material. Como o cimento e o material pozolânico possuem massas específicas diferentes, a substituição do cimento por material pozolânico se dá em termos de volume equivalente. A massa de material pozolânico utilizada no ensaio depende de sua densidade, para se obter tal valor deve-se utilizar a Equação 3.5:

$$Massa\ Cinza = (Massa\ Cimento * \% \text{ substituição}) * \frac{Massa\ Específica}{Massa\ Específica} \quad (3.5)$$

Após 28 dias de cura, os corpos de prova são submetidos ao ensaio de resistência à compressão. O IAP é determinado com o auxílio da Equação 3.6:

$$IAP = \frac{F_{cp}}{F_{cc}} * 100 \quad (3.6)$$

onde: F_{cp} é a resistência mecânica à compressão dos corpos de prova com substituição parcial de cimento e F_{cc} é a resistência à compressão dos corpos de prova produzidos somente com cimento Portland.

Segundo a norma brasileira, para que um material seja considerado pozolânico o mesmo deve apresentar IAP igual ou superior a 75%, para a norma portuguesa o material deveria atingir resistência à compressão mínima correspondente à porcentagem de cimento utilizado para produzir a amostra com substituição parcial do cimento.

3.3.6.2 Índice de atividade pozolânica com cal

A ABNT NBR 5751 (1992), prescreve as recomendações para a realização deste ensaio, também conhecido como índice de atividade pozolânica acelerado. Diferentemente do IAP com cimento, o rompimento dos corpos de prova é realizado aos 7 dias e não aos 28 dias de sua produção. São produzidos dois traços diferentes, o traço de referência que possui 9 partes de areia normalizada e cimento Portland, e o traço com a adição de material supostamente pozolânico, que contém uma parte em massa de hidróxido de cálcio, 9 partes em massa de areia, e mais uma parte de material pozolânico correspondente ao dobro do volume de hidróxido de cálcio. A consistência deve ser de 225 ± 5 mm (água da mistura). Nas primeiras 24 horas, a cura deve ser realizada a $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, após este período os corpos de prova devem permanecer nas próprias formas para se evitar a perda de umidade na temperatura de $55^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

3.3.7. Análises termodiferencial e termogravimétrica

As análises termogravimétricas e termodiferenciais são amplamente utilizadas em estudos com materiais cimentícios devido às mudanças ocorridas quando submetidos ao aquecimento (ALARCON-RUIZ *et al*, 2005; CORDEIRO, 2006; NEVES JÚNIOR *et al.*, 2011). A termogravimetria permite determinar a variação de massa da amostra com o aumento da temperatura. A análise termodiferencial permite monitorar, durante o aquecimento, as diferenças de temperatura entre a amostra e um material de referência. Processos endotérmicos e exotérmicos são registrados como deflexões, de forma a possibilitar a identificação dos compostos presentes nas amostras pela posição, forma e intensidade dos picos endotérmicos e exotérmicos.

De acordo com Rêgo *et al.* (2006) e Rodrigues *et al* (2010), com a análise dos resultados é possível calcular o teor, o índice e a porcentagem de hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ nas amostras. O teor de hidróxido de cálcio é obtido em relação à massa total da amostra. O índice é determinado pela divisão do teor de uma amostra produzida com material pozolânico pelo teor das pastas produzidas somente com cimento Portland. O percentual de hidróxido de cálcio é obtido a partir da derivada das curvas termogravimétricas e da análise dos pontos de desidratação da portlandita nas curvas termodiferenciais com e sem adição do material pozolânico.

3.4. Tipos de Adições Pozolânicas

Mehta e Monteiro (2008), dividem as adições minerais pozolânicas em dois grupos:

- materiais naturais – materiais processados com o único objetivo de produzir uma pozolana. Seu processo de produção consiste em britagem, moagem e classificação por tamanho, podendo ou não existir ativação. Apenas as terras diatomáceas não são derivadas de rochas ou minerais vulcânicos, em exemplo temos: vidros vulcânicos, tufos vulcânicos e argilas ou folhetos calcinados;
- subprodutos Industriais – materiais que não são produtos primários na cadeia produtiva, e podem ou não necessitar de um novo processamento antes de seu emprego como aditivo (secagem, pulverização). Diversos são os setores que geram este tipo de subproduto: geração de energia, metalurgia e agrícola. Os principais subprodutos são: cinza volante, obtida da queima de carvão para geração de energia, escória granulada de alto-forno com origem na produção de ferro fundido; fumo de sílica obtida na produção de silício metálico e ferrosilício.

Segundo a ABNT NBR 12653 (2012), estes materiais devem ser classificados em:

- classe N – pozolanas naturais e artificiais;
- classe C – cinza volante produzida pela queima de carvão mineral em usinas termelétricas;
- classe E – qualquer pozolana cujos requisitos diferem das classes anteriores.

As exigências quanto à composição química e características físicas impostas por esta mesma norma para um material pozolânico são apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Exigências químicas e físicas segundo ABNT.

Propriedade	Classe de Material Pozolânico		
	N	C	E
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ , % mín.	70	70	50
SO ₃ , % máx.	4	5	5
Teor de umidade, % máx..	3	3	3
Perda ao fogo, % máx.	10	6	6
Álcalis disponíveis em Na ₂ O, % máx.	1,5	1,5	1,5
Material retido na peneira 45µm, % máx.	34	34	34
Índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias, em relação ao controle, % mín.	75	75	75
Índice de atividade pozolânica com o cal aos 7 dias, em MPa.	6	6	6
Água requerida, % máx.	115	110	110

Fonte ABNT NBR 12653 (2012).

Diversos estudos indicam a viabilidade do uso das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar como material pozolânico semelhante ao uso da cinza da casca de arroz, uma vez que este material é um dos maiores resíduos agrícolas do Brasil (PADUA, 2012; SOARES, 2010; CORDEIRO, 2008; ANJOS E MARTINELLI, 2008) . A Tabela 3.4 apresenta os resultados para a porcentagem de sílica ativa e perda ao fogo em diversos estudos realizados nos últimos anos com a cinza de bagaço de cana-de-açúcar.

Tabela 3.4 - Fração de sílica ativa e perda ao fogo em diversos estudos realizados no Brasil nos últimos anos.

Autor	Ano	% de SiO₂	Perda ao Fogo (%)
Pádua	2012	61,53	20
Bessa	2011	93,5	0,34
Soares	2010	85,68	14
Anjos; Ferreira; Borja	2012	80,5	NR*
Anjos; Martinelli	2008	70,02	18,9
Borlini <i>et al.</i>	2006	77,5	0,31
Cociña	2002	62,69	2,04
Cordeiro; Toledo; Fairbain	2005	78,3	0,42
Cordeiro	2008	78,34	0,42
Ferreira	2013	57,4	4,71
NR* - Não Realizado			

3.5. Cinza de Bagaço de Cana-de-Açúcar

Um dos maiores resíduos do setor agrícola brasileiro é obtido na produção de açúcar e álcool (IPEA, 2012). Até a obtenção do resíduo existe um grande percurso que se inicia no plantio e colheita da cana. A próxima etapa consiste no preparo e moagem, tendo como finalidade condicionar a cana, extrair o caldo e reduzir a umidade final do bagaço. Após estes procedimentos ocorre, então, o tratamento do caldo de forma a corrigir o pH e realizar a remoção de impurezas. O caldo tratado pode ser enviado para a produção de açúcar ou álcool. Invariavelmente após estes processos obtêm-se dois resíduos principais, a torta de filtro e bagaço de cana. A torta de filtro que é produzida após a filtragem do caldo, normalmente é utilizada como fertilizante. O bagaço da cana que é obtido após a retirada do caldo da cana, possui uma gama maior de destinos: síntese de polímeros, fabricação de painéis, produção de etanol de 2ª geração, composição em ração animal, uso em artesanato e produção de eletricidade.

A produção de energia tem um papel de destaque uma vez que ela é utilizada para alimentar a própria cadeia produtiva e o restante é vendido às concessionárias de energia elétrica. De acordo com Perez et al. (2011), no estado de Minas Gerais, praticamente toda a biomassa (bagaço e palha) gerada na extração do caldo-de-cana é encaminhada para a produção de energia nas próprias indústrias. O material excedente é

vendido para outros setores industriais, que também o utilizam como combustível na produção de energia.

Após a queima do bagaço obtém-se um resíduo de resíduo, a cinza de bagaço de cana de açúcar geralmente é utilizada como adubo nas próprias lavouras de cana-de-açúcar. Este destino não é recomendado, pois em sua maior parte é inerte, possui baixa concentração de potássio, em alguns casos encontra-se contaminada por metais pesados, é de difícil degradação e apresenta baixo índice de nutrientes ao solo (VASCONCELOS, 2010). A Figura 3.1 mostra, de forma simplificada, as etapas que envolvem a produção sucroalcooleira.

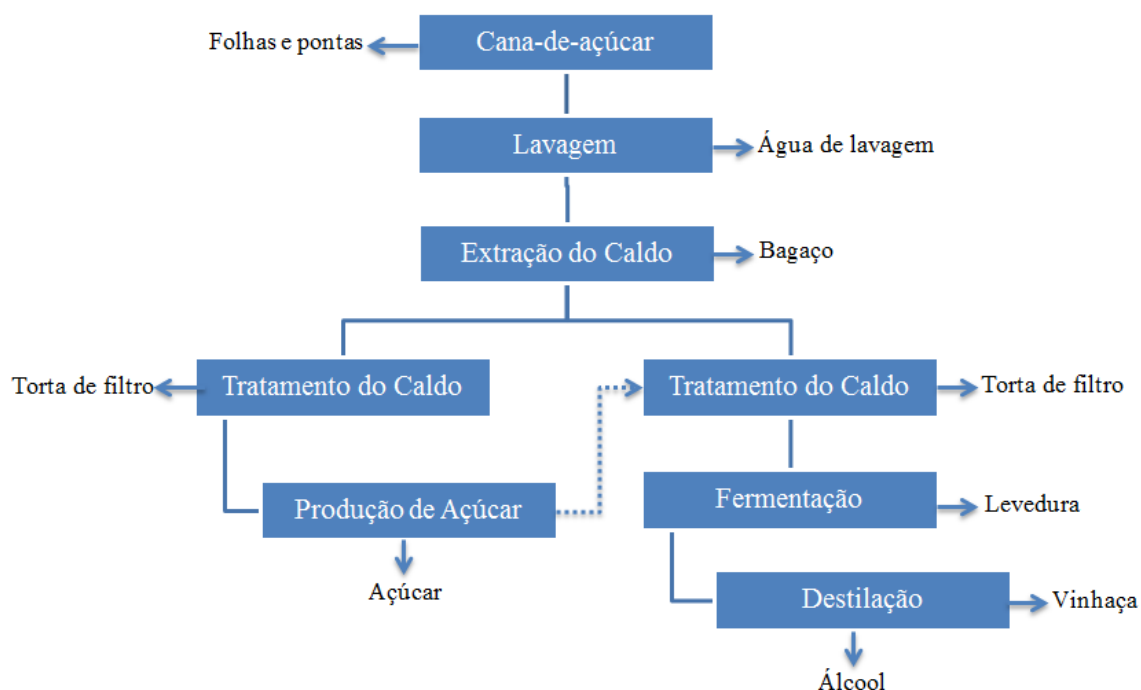


Figura 3.1 - Fluxograma do processo de produção de cana de açúcar e álcool. Fonte: adaptado de MOREIRA e GOLDEMBERG, 1999 apud CORDEIRO, 2006

O Brasil é o maior produtor de cana de açúcar do mundo: a safra 2013/2014 foi de 653,5 milhões toneladas com área plantada média de 9.616.615 ha, o estado de Minas Gerais possui um papel de destaque no cenário nacional, ocupando a 3ª colocação, liderado por São Paulo e Goiás (UNICA, 2014). Uma tonelada de cana de açúcar gera aproximadamente 280 quilos de bagaço, nesta última safra foram produzidos 182,98 milhões de toneladas de resíduo, o maior resíduo agrícola brasileiro, utilizado basicamente como combustível na produção de energia elétrica (CTC, 2010).

A geração de energia elétrica nas usinas com a queima do bagaço possui diversos pontos positivos, pois vem a atender às demandas e gera economia energética na cadeia produtiva, além de eliminar um grande volume de resíduo. Seu balanço nas emissões de CO₂ é praticamente nulo, uma vez que, através da fotossíntese, a biomassa é inserida no ciclo seguinte de produção de cana.

A queima de uma tonelada de bagaço de cana para produção de energia elétrica gera aproximadamente 25 kg de cinza (FIESP/CIESP, 2001), resultado muito próximo ao obtido para a queima do bagaço em laboratório sob condições controladas, que obteve rendimento de aproximadamente 2% (FERREIRA, 2012). Com os dados para esta última safra de cana são esperados 3,3 milhões de toneladas de cinzas, valor superior ao encontrado por Cordeiro no ano de 2006, quando foram produzidas aproximadamente 2,5 milhões de toneladas de cinza. Esta produção é um fator de grande relevância para a busca de novas tecnologias que propiciem a utilização deste material. Diversos estudos foram realizados com o objetivo de aproveitá-lo como adição mineral, de forma similar ao trabalho realizado com a cinza de casca-de-arroz, que é um material pozolânico de grande valor (FERREIRA, 2013; COCIÑA et al, 2006; BESSA, 2011, CORDEIRO et al., 2005).

A cinza do bagaço de cana-de-açúcar apresenta elevado teor de dióxido de silício, que possui origem basicamente em duas fontes: as raízes da cana e areia do solo. As raízes da cana absorvem ácido monossilícico, que se deposita na epiderme do vegetal como sílica gel, após a queima do bagaço transforma-se em sílica vítrea ou cristalina (BARBOZA FILHO e PRABHU, 2002). A areia do solo se torna uma fonte de sílica uma vez que o processo de lavagem da cana não é satisfatório em eliminar este tipo de material. Outro elemento também encontrado seria o potássio, que aumenta o equivalente alcalino do cimento e favorece a reação álcali-agregado (NEVILLE, 1982).

De acordo com Pádua (2012) e Cordeiro (2006), a qualidade da cinza está diretamente ligada ao processo de queima, uma vez que a temperatura de combustão do material irá determinar a formação de fases amorfas ou cristalinas da sílica contida na cana. Diversos são os fatores que influenciam a composição química da cinza de bagaço de cana-de-açúcar: o tipo de cana cultivada, o uso de fertilizantes e herbicidas, o tipo de

solo, o período e modo de cultivo, a finura da cinza, o processo de colheita e condições de queima do bagaço.

3.5.1. Cinza de bagaço de cana-de-açúcar como material pozolânico

A viabilidade do uso das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar na substituição parcial ao cimento Portland já foi confirmada por diversos autores em seus trabalhos científicos. Segundo Toledo Filho *et al.* (2007), se no Brasil fosse substituído 20% do cimento destinado à produção de concreto, por cinza de bagaço de cana-de-açúcar, a redução na emissão de CO₂ seria da ordem de 6 milhões de toneladas por ano.

No trabalho desenvolvido por Souto *et al.* (2009), a substituição de 10% de cimento por cinza de bagaço de cana-de-açúcar *in natura*, não proporciona nenhum comprometimento quanto à resistência e a consistência do concreto. Para a utilização de teores de substituição superiores a 20%, faz-se necessário o beneficiamento das cinzas, como forma de elevar seu potencial pozolânico.

Cordeiro *et al.* (2009)^a produziu em laboratório diferentes tipos de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar sob condições controladas. Os resultados indicam que a cinza produzida com temperatura de 600°C apresentou maior amorficidade, menor porção de matéria orgânica e considerável atividade pozolânica. Soares (2010), produziu em laboratório cinzas de bagaço de cana-de-açúcar em diversas temperaturas (400°C, 600°C, 800°C), com e sem circulação forçada de ar. Os resultados indicam que as cinzas obtidas a 600°C com circulação de ar apresentaram maior atividade pozolânica para os ensaios utilizados.

Paula *et al.* (2009), caracterizou e avaliou cinzas de bagaço de cana-de-açúcar quanto à sua pozolanicidade. As cinzas estudadas apresentaram-se na fase amorfa e nas fases cristalinas de cristobalita e quartzo. Quanto a pozolanicidade, as substituições de até 20% de cimento por cinzas foram satisfatórias para o ensaio de compressão. Poggiali (2010), obteve resultados positivos na utilização de cinzas moídas e *in natura* na

substituição parcial do cimento, as proporções de substituição com melhores resultados foram de 10 e 15%.

Segundo Sá *et al.* (2011), as cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, apresentam elevado teor de sílica, por meio do ensaio Índice de Atividade Pozolânica foi confirmado a reatividade do material com resultados superiores ao recomendado pela ABNT NBR 5752 (1992). Cordeiro (2006), obteve resultados para este mesmo ensaio inferiores ao recomendado pela norma brasileira.

Pádua (2012), em seus estudos avaliou o desempenho de compostos cimentícios com cinzas de bagaço de cana-de-açúcar *in natura* e beneficiadas. Os resultados indicaram atividade pozolânica considerável em diversos ensaios (Chapelle Modificado, Luxan, Índice de Atividade Pozolânica com cal e com cimento, entre outros).

Cociña *et al.* (2013), avaliaram dois tipos diferentes de cinzas quanto à pozolanicidade, uma amostra de cinza de bagaço de cana-de-açúcar tem origem na caldeira de uma usina de açúcar de Cuba e o outro material foi obtido da calcinação controlada em laboratório. A fluorescência de raios X identificou a grande proporção de sílica presente, cerca de 80% nas duas amostras, a cristobalita foi o principal elemento encontrado na difração de raios X além de uma banda de material amorfo. A atividade pozolânica das amostras foi determinada com um ensaio de condutividade elétrica, os cinzas foram classificadas como bons materiais pozolânicos devido à considerável redução na condutividade elétrica.

Cavalcanti e Ribeiro (2013), realizaram a substituição parcial da areia por cinzas de bagaço de cana-de-açúcar em diversas proporções (25%, 50%, 75% e 100%), com resultados satisfatórios para propriedades físicas (porosidade e densidade aparente e absorção de água) e mecânicas (resistência à flexão e compressão axial). Segundo o autor, tal ocorrência seria devido às características pozolânicas das cinzas devido ao ganho de resistência das argamassas nas idades mais tardias.

Hojo *et al.* (2013), caracterizaram as cinzas de bagaço de cana-de-açúcar por meio de ensaios de granulometria, análise química e difração de raios X e avaliaram a atividade pozolânica das cinzas com o ensaio Chapelle Modificado. Este estudo permitiu

identificar a presença de sílica amorfa na amostra, o somatório SiO_2 , Fe_2O_3 e Al_2O_3 igual a 77% e resultado para o ensaio de pozolanicidade indicou atividade de aproximadamente 436 mg de Ca(OH) fixado por grama de amostra.

3.5.2. Influência da requeima nas características das cinzas

As características físicas e químicas das cinzas são influenciadas por diversos fatores. A temperatura e tempo de queima, bem como a velocidade de aquecimento e resfriamento do forno são fatores determinantes dessas características, influenciando a amorficidade e finura das cinzas (KAWABATA, 2008). Segundo Cook (1986), as transformações ocorridas no bagaço durante o processo de queima podem ser descritas como se segue:

- temperatura até 100°C ocorre a perda de massa devido à evaporação de água absorvida;
- entre 100 e 350°C inicia-se a ignição de materiais mais voláteis.;
- entre 400 e 500°C tem-se a maior perda de massa, devido à oxidação do carbono residual, tornando a cinza rica em sílica amorfa;
- acima de 700°C pode ocorrer a formação de quartzo;
- acima de 800°C toda a sílica se torna cristalina.

Segundo Tashima (2006), a temperatura de combustão de resíduos agrícolas promove o surgimento de fases amorfas ou cristalinas da sílica presente em suas cinzas. Ganesan *et al.* (2007), em seus estudos afirmam que para se obter sílica amorfa a temperatura de queima de resíduos agrícolas deve ser inferior a 700°C .

Cordeiro e Barroso (2011), promoveram a requeima de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar a 600°C , com o objetivo de beneficiar este material. A atividade pozolânica da cinza foi melhorada devido à liberação do carbono e conseqüentemente aumento do teor de sílica. A substituição de 20% de cimento por cinzas beneficiadas promoveu aumento significativo da resistência à compressão, e manutenção do módulo de elasticidade em comparação ao traço referência.

De acordo com Soares (2010), as condições de queima (temperatura, tempo de queima, tipo de resfriamento e circulação de ar) influenciam nas características das cinzas.

Ainda segundo esta autora, as cinzas produzidas a 600 °C atenderam aos diversos ensaios de avaliação da pozolanicidade utilizados, apesar de se apresentarem predominantemente cristalinas, possivelmente em função da contaminação por areia do solo durante a colheita da cana. Segundo Pádua (2012), a requeima de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar promove a queima da matéria orgânica remanescente, aumento da cristalinidade, melhoria no desempenho mecânico das argamassas e redução da porosidade aparente dos compósitos fabricados.

Chagas e Cordeiro (2012), avaliaram a pozolanicidade de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar e casca de arroz antes e pós requeima mediante diversos ensaios de caracterização física e química. Segundo estes autores o processo de beneficiamento por meio da requeima proporcionou melhores resultado quanto às características pozolânicas das amostras que se apresentaram mais reativas que as amostras *in natura*.

Ferreira *et al.* (2014), avaliaram o processo de requeima de diferentes cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, os resultados indicaram este método permitiu a eliminação da contaminação das amostras por matéria orgânica, promoveu um aumento na proporção de sílica e uma maior homogeneização das diferentes amostras de cinza de bagaço de cana-de-açúcar.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo da influência da requeima na pozolanicidade de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar de diferentes características foi realizado em sete etapas:

- obtenção das cinzas de bagaço de cana de açúcar a serem estudadas;
- caracterização física e química das cinzas in natura;
- avaliação da atividade pozolânica das cinzas;
- determinação das condições de requeima;
- requeima do material;
- caracterização física e química das cinzas requeimadas;
- avaliação da atividade pozolânica do material requeimado.

Na Figura 4.1 é apresentado o organograma do procedimento experimental adotado. Os procedimentos foram realizados no Laboratório de Ensaio Especiais e Laboratório de Concreto do Departamento de Materiais de Construção Civil, no Laboratório de Interpretação de Raios-X do Departamento de Engenharia Metalúrgica, e no Laboratório de Análises Térmicas do Departamento de Química, todos estes internos à UFMG. Também foram realizados ensaios no Laboratório de Análises Granulométricas da empresa Cimentos Brennand (Cimento Nacional).

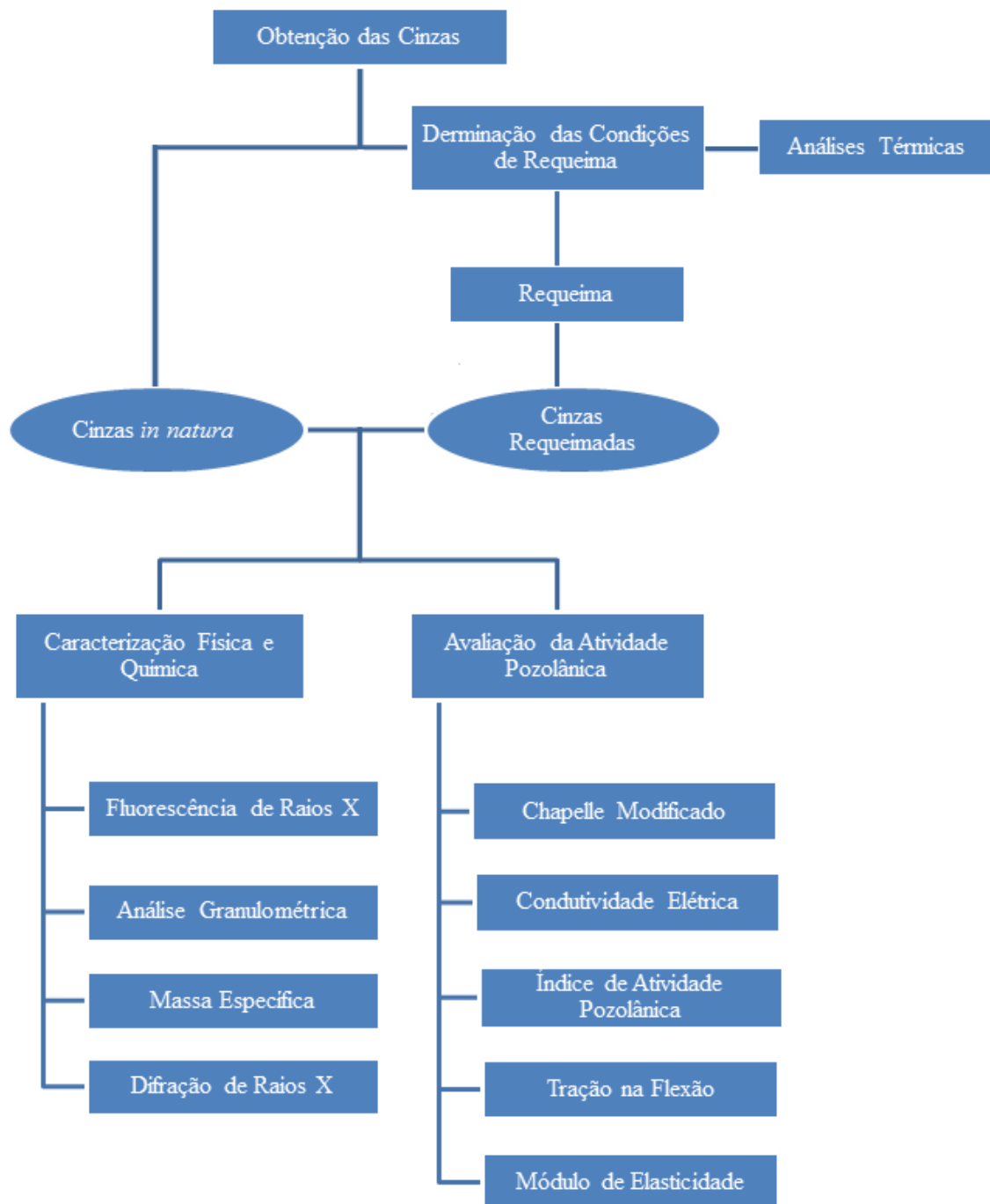


Figura 4.1 - Organograma do procedimento experimental.

4.1. Materiais

Foram utilizadas 3 diferentes cinzas (Figura 4.2). As cinzas denominadas Cinza 1 e Cinza 1M possuem a mesma origem, a Destilaria Alpha Ltda, localizada na cidade de Cláudio, diferindo unicamente pelo fato de que a Cinza 1M foi submetida a um processo de moagem. A Cinza 2 é oriunda da mesorregião do Alto Paranaíba e Triângulo Mineiro, e foi coletada, após a evaporação da água, em tanques de decantação

que recebem a água de lavagem dos gases gerados pela combustão do bagaço em caldeira.

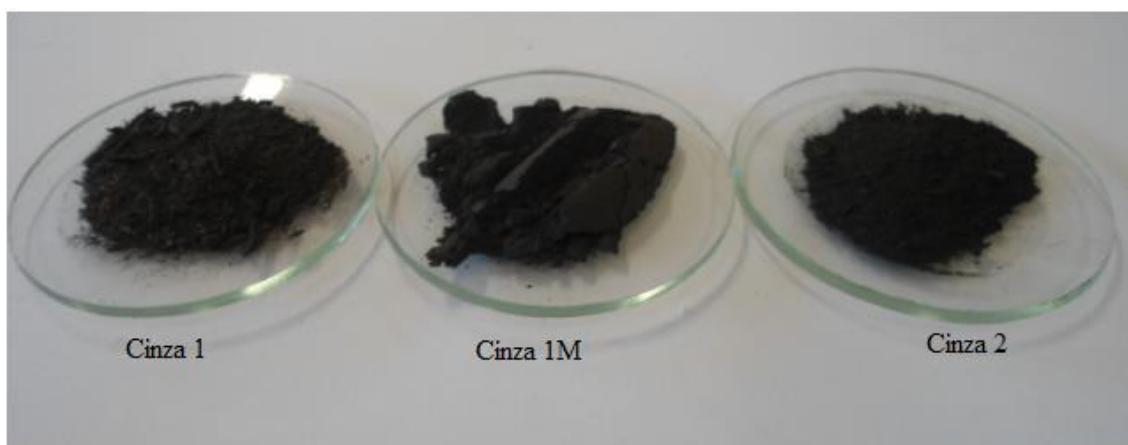


Figura 4.2 - Cinzas de bagaço de cana-de-açúcar.

Para a realização de alguns ensaios (Índice de Atividade Pozolânica (IAP), módulo de elasticidade e flexão na tração) foi necessário à confecção de corpos de prova utilizando além das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, cimento Portland, areia e água.

O cimento utilizado foi o CP V – cimento Portland de alta resistência inicial que possui no máximo 5% de fíleres e nenhum outro tipo de adição que possa alterar as reações entre os materiais utilizados. De acordo com seu fabricante o cimento atende à norma ABNT NBR 5733 (1991). Por se tratar de comparação de resultados de amostras produzidas com os mesmos constituintes, apenas diferindo quanto ao uso de cinzas, não se considerou necessário a caracterização do cimento, uma vez que foi usado o mesmo lote (um saco de 50 kg).

A areia utilizada em diversas frações (grossa, entre 2,4 mm e 1,2 mm; média grossa, entre 1,2 mm e 0,6 mm; média fina, entre 0,6 mm e 0,3 mm e fina, entre 0,3 mm e 0,15 mm) foi beneficiada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). É uma areia que atende a ABNT NBR 7214 (1982). A água utilizada nos ensaios foi fornecida pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA/MG).

4.2. Métodos

Inicialmente as cinzas de bagaço de cana-de-açúcar coletadas foram caracterizadas física e quimicamente. As cinzas, também, foram submetidas a análises térmicas para se determinar as condições adequadas de requeima. Com os dados obtidos das análises térmicas foram realizadas as requeimas. As cinzas tratadas termicamente foram caracterizadas de forma similar às cinzas *in natura*. As cinzas antes e pós requeima, também, foram avaliadas quanto a sua atividade pozolânica por métodos diretos e indiretos.

4.2.1. Determinação das condições de requeima

As condições de requeima foram avaliadas por análise térmica: termogravimetria (TG) e termodiferencial (DTA). O primeiro ensaio permite identificar os pontos de variação de massa com o aumento de temperatura, e com o segundo é possível observar as variações de energia durante o ensaio. A análise conjunta das curvas de variação de massa e energia em função da temperatura permite identificar as regiões onde ocorrem as reações químicas e mudanças de fases.

Para a realização da análise térmica foi utilizado o equipamento DTG-60 SHIMADZU (Figura 4.3). Este equipamento trabalha até a temperatura de 1100°C, possui precisão de $1 \cdot 10^3 \mu\text{V}$ no DTA e $1 \cdot 10^{-3}$ mg e capacidade de 1g no TG. A taxa de aquecimento utilizada foi de aproximadamente 5°C por minuto, taxa recomendada pelo executor do ensaio.



Figura 4.3 - Aparato experimental para o ensaio de termogravimetria.

4.2.2. Requeima

A requeima das cinzas foi realizada segundo as condições obtidas no item 4.2.1. O equipamento utilizado foi um forno tipo mufla com atmosfera controlada via programação computacional, modelo FL1300 e marca Pechini, com circulação de ar (Figura 4.4).

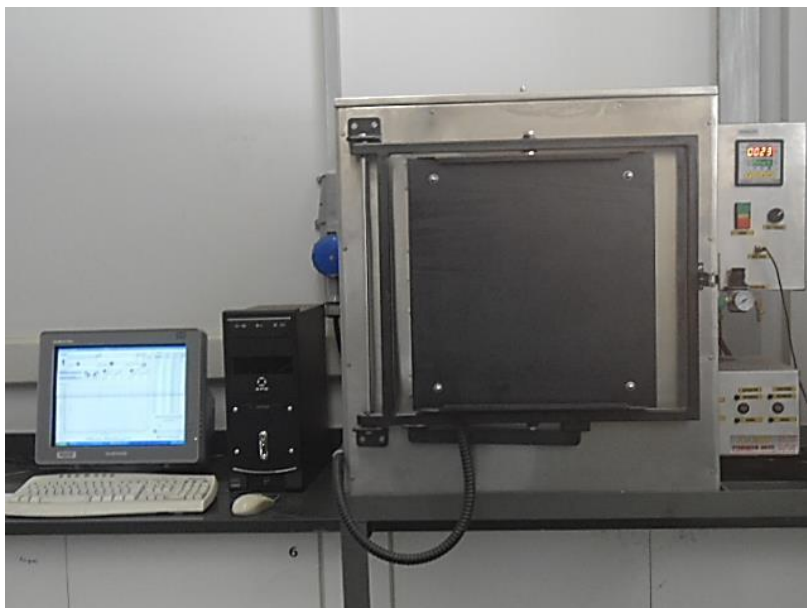


Figura 4.4 - Forno utilizado na requeima das cinzas.

O processo de requeima das cinzas se deu em duas etapas: em um primeiro estágio, uma massa de cinza foi aquecida a uma taxa de 10°C por minuto até o primeiro patamar de requeima com o objetivo de se eliminar sua umidade. Em seguida, novamente a uma taxa de 10°C por minuto a temperatura do forno foi elevada até um segundo patamar de requeima com o objetivo de se eliminar toda a matéria orgânica da amostra. Um modelo de programação de requeima é apresentado na Figura 4.5, para tal exemplificação é adotado como temperatura do segundo patamar 600°C e tempo de permanência de 3 horas. A taxa de 10°C/minuto e tempo de permanência foram escolhidas em função de dados da literatura. Cordeiro (2006) obteve melhores resultados para cinzas requeimadas a 600°C com taxa de aquecimento de 10°C/minuto. Soares (2010) e Pádua (2012) também optaram pela mesma taxa de aquecimento citada anteriormente.

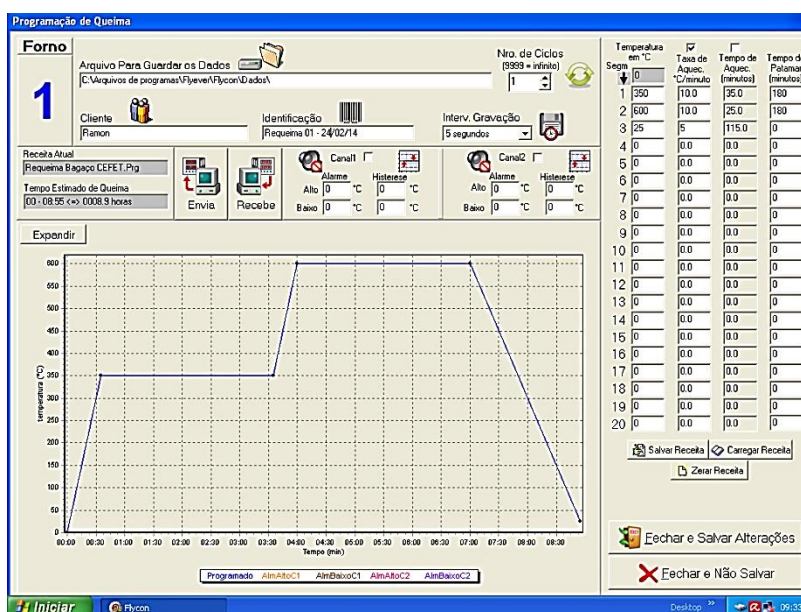


Figura 4.5 - Modelo de programação de requeima das cinzas.

4.2.3. Caracterização física e química

4.2.3.1 Composição química, perda ao fogo e massa específica

As cinzas *in natura* e requeimadas foram caracterizadas quanto à composição química por fluorescência de raios X. O teor de matéria orgânica das cinzas foi determinado pelo ensaio de perda ao fogo. Estes ensaios foram realizados pela empresa SGS-Geosol, que

é especializada em análises químicas, localizada na região metropolitana de Belo Horizonte. A massa específica foi obtida por meio do ensaio de picnometria com gás hélio. Este método consiste em determinar o volume de uma massa conhecida do material com a variação de pressão do gás em um volume conhecido.

4.2.3.2 Granulometria

Para a análise granulométrica das cinzas in natura e requeimadas foi utilizada a técnica de espalhamento do feixe de laser (light amplification by stimulated emission of radiation) em um granulômetro Cilas 920. Também utilizada a técnica de peneiramento em vibrador elétrico para determinar a fração de cinzas passante na peneira 45 μm .

4.2.3.3 Difração de raios X

A estrutura do arranjo atômico das cinzas e a identificação de fases presentes foi determinada pelo ensaio de difração de raios X. O equipamento utilizado foi um difratômetro de raios-X Philips-PANalytical PW 1710, equipado com câmara de textura, tubos de raios X cerâmicos, potência de 4 kV, goniômetro PW-3020/00, fonte Cu-K, constante de tempo de 0,6 s e com um cristal de grafite monocromático e velocidade de escaneamento de 2°/minuto.

4.2.4. Avaliação da atividade pozolânica

Foram utilizados diferentes métodos para avaliar a atividade pozolânica das cinzas in natura e tratadas termicamente. Tendo em vista as características específicas do material em estudo, a variabilidade de ensaios disponíveis e o tempo necessário para a realização dos mesmos optou-se por métodos diretos (Chapelle Modificado) e indiretos (IAP, Condutividade Elétrica, Módulo de Elasticidade, e Tração na Flexão), cuja realização seria possível na UFMG.

4.2.4.1 Condutividade elétrica

A capacidade de reação das cinzas com o hidróxido de cálcio em uma solução saturada de Ca(OH)_2 foi avaliada por meio da variação da condutividade elétrica no tempo, de acordo com o método de ensaio descrito por Luxan *et al.*(1989), no item 3.3.5. O aparato experimental utilizado foi um agitador/aquecedor magnético da marca Lucadema e um condutivímetro marca Digimed, modelo 13A1116 (Figura 4.6).



Figura 4.6 - Aparato experimental para o ensaio de condutividade elétrica.

4.2.4.2 Chapelle Modificado

A capacidade de fixar hidróxido de cálcio, também, foi avaliada por meio do ensaio Chapelle Modificado de acordo com a ABNT NBR 15895 (2010). Para a realização do ensaio foi utilizado um forno tipo mufla, marca GP Científica, modelo FHMP (Figura 4.7^a), para a calcinação do carbonato de cálcio (CaCO_3) e obtenção do óxido de cálcio necessário à primeira etapa do experimento. Na segunda etapa deste ensaio utilizou-se um banho-maria (Figura 4.7^b), para o controle da temperatura (90°C) e manutenção da agitação das soluções no tempo de ensaio (16 horas).

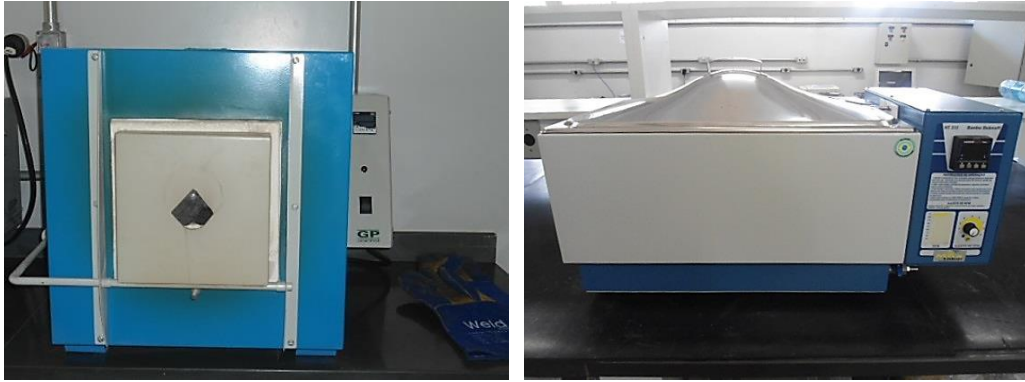


Figura 4.7 – Aparato experimental para Chapelle Modificado: ^a mufla e ^b banho-maria.

4.2.4.4 Índice de Atividade Pozolânica

O IAP foi determinado com base nas normas EN 4220, (2010) e ABNT NBR 7215 (1996). A norma portuguesa foi utilizada, pois ela permite o uso de menor quantidade de material pozolânico, o que possibilita a manutenção do mesmo fator água cimento para as amostras com e sem cinzas, sem prejuízo da trabalhabilidade.

Para uma avaliação mais abrangente optou-se por produzir dois traços diferentes para o mesmo ensaio: o primeiro utiliza relação água/cimento (A/C), considerando apenas como aglomerante o cimento e o segundo traço utiliza relação água/aglomerante (A/Ag), considerando-se as cinzas de bagaço de cana de açúcar também como aglomerante. Para a realização dos ensaios de módulo de elasticidade e IAP foram produzidos 3 corpos de prova para cada traço. As relações A/C e A/Ag foram mantidas em 0,48. A massa de cimento teve 10% de sua massa substituída pelo volume equivalente de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar. A mistura dos materiais ocorreu com o auxílio da argamassadeira (Figura 4.8^a). A moldagem foi realizada em moldes cilíndricos de 5 cm de diâmetro por 10 cm de comprimento, com o auxílio de formas metálicas apropriadas. (Figura 4.8^b).



Figura 4.8 – Equipamentos utilizados para produção dos compostos cimentícios: ^a argamassadeira e ^b moldes.

Decorrido 24 horas da produção dos compostos cimentícios, os mesmos foram desmoldados e submetidos à cura em câmara úmida apropriada, permanecendo na mesma por 28 dias até o início dos ensaios de compressão. O rompimento dos corpos de prova foi realizado em uma prensa hidráulica para ensaios de compressão e tração, marca Contenco - Pavitest (Figura 4.9), com capacidade para 20 toneladas e velocidade de aplicação de carga de até 50 kg/s.



Figura 4.9 - Equipamento de compressão utilizado no ensaio.

4.2.4.5 Resistência à Tração na Flexão

A resistência à tração de compostos cimentícios pode ser avaliada por meio do ensaio de flexão com aplicação de carga em três pontos, com base na ABNT NBR 12142 (2010).

Para o ensaio foram utilizados corpos de prova prismáticos nas dimensões 4x4x16 cm, confeccionados com a mesma composição utilizada para o ensaio IAP. Também foram produzidos 3 corpos de prova para cada traço realizado. Para o rompimento dos corpos de prova utilizou-se o mesmo equipamento para o ensaio de compressão, e o procedimento de execução difere apenas no ponto de aplicação da carga (Figura 4.10).



Figura 4.10 – Execução do ensaio de tração na flexão

4.2.4.6 Determinação do Módulo de Elasticidade

A determinação do módulo de elasticidade foi realizada por meio do ensaio de frequência ressonante forçada no modo longitudinal, com base na ASTM C 215, (2008). Uma vez que o ensaio é não destrutivo, o mesmo foi realizado em todas as amostras utilizadas para o ensaio de IAP. Foi utilizado o equipamento Erudite MK2 (Figura 4.11), que determina a frequência ressonante do material. Com esse dado determinou-se o módulo de elasticidade dos compostos cimentícios com a utilização da Equação 4.1, que leva em consideração as características físicas do corpo de prova:

$$E(MPa) = 4 * n^2 * L^2 * \rho * \frac{1}{10^{12}} \quad (4.1)$$

onde: N é a frequência ressonante, em Hertz, obtida no ensaio, L é o comprimento do corpo de prova em mm, e ρ é a densidade da amostra em kg/m^3 .

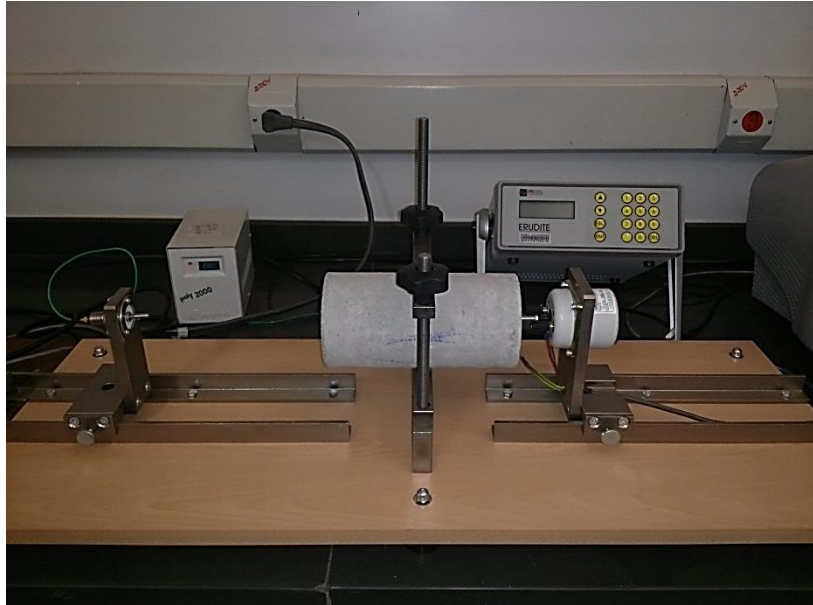


Figura 4.11 – Aparelho de frequência ressonante forçada para a determinação do módulo de elasticidade.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados são apresentados em três blocos: requeima das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, caracterização física e química das cinzas *in natura* e pós requeima, e avaliação da pozolanicidade das cinzas.

5.1. Requeima das Cinzas de Bagaço de Cana-de-Açúcar

Na Figura 5.1 são apresentados os resultados da termogravimetria (TG) e da análise termodiferencial (DTA) das Cinza 1, Cinza 1M e Cinza 2, todas na condição *in natura*. A partir da curva de variação de massa (TG) foi traçado o gráfico de sua derivada em função do tempo/temperatura (DTG) (Figura 5.2). Com esta nova curva e as acima citadas é possível se identificar com mais facilidade as regiões onde ocorrem as perdas de massa e variação de energia mais significativas, e assim melhor interpretar os dados.

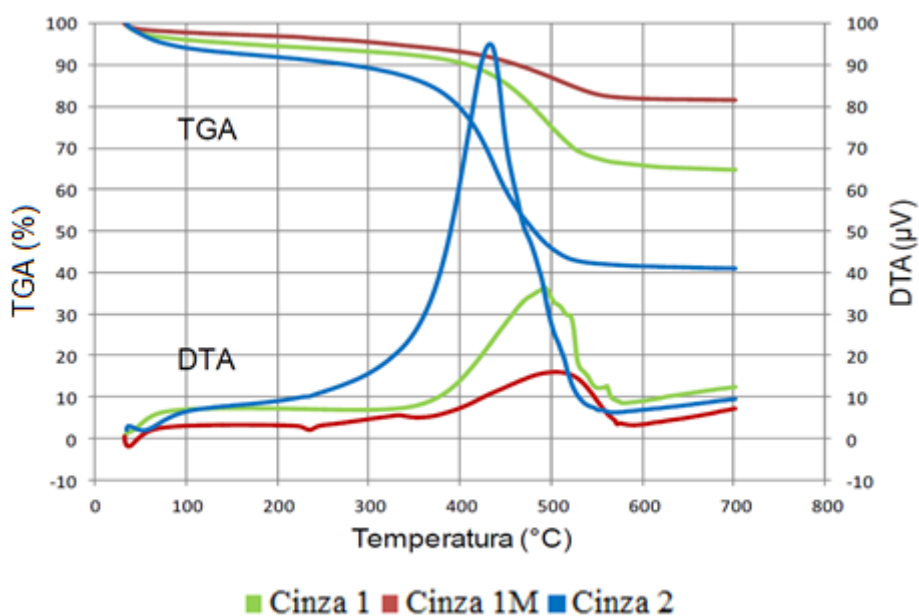


Figura 5.1 – Análise termogravimétrica e termodiferencial das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar *in natura*.

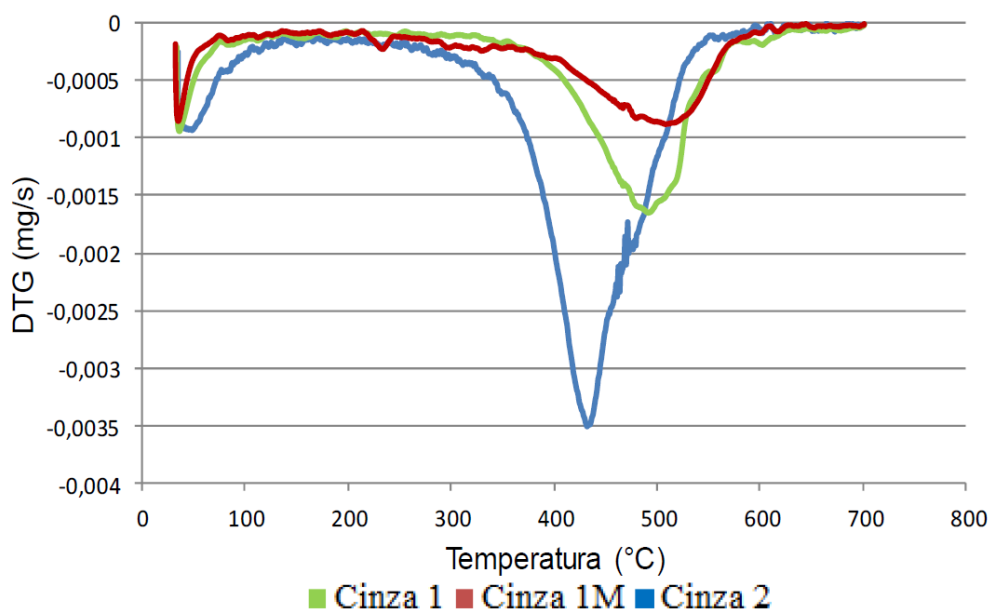


Figura 5.2 – Derivada da curva termogravimétrica das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar *in natura*.

Observa-se que até 350°C a variação de massa das três amostras ocorre monotonicamente com o aumento de temperatura. No entanto, para a Cinza 1 e Cinza 1M ocorre uma variação de massa significativa em torno de 50°C. Observa-se que entre 400 e 520°C ocorre a máxima liberação de energia, sendo que, para a Cinza 2, esta liberação é significativamente maior. Também se observa uma maior variação de massa neste intervalo para as três amostras sujeitas ao aquecimento. Observa-se que a moagem influencia de forma evidente no processo de requeima das cinzas: a cinza de menor superfície específica (Cinza 1M) apresenta menor perda de massa em temperaturas próximas a 500°C (19%) e apresentou menor liberação de energia em comparação à Cinza 1. Tal ocorrência, não usual, pode ser motivada pela aglomeração de partículas muito pequenas, que assim ficam menos reativas. As temperaturas de maior liberação de energia estão associadas à maior perda de massa. Indicando serem as temperaturas onde ocorrem as principais reações químicas. A Cinza 1 e Cinza 2 apresentaram perda de massa de 35% e 60%, respectivamente. A maior perda de massa seria devido a materiais voláteis, provavelmente matéria orgânica, presente na amostra. Observa-se que nas temperaturas próximas de 500°C estão ocorrendo ou já ocorreram as maiores perdas de massa para todas as amostras. Dessa forma, esta temperatura foi utilizada para o tratamento térmico das cinzas *in natura* para a realização dos ensaios propostos.

O processo de requeima de todas as cinzas se deu em duas etapas. Na primeira as cinzas de bagaço de cana-de-açúcar foram aquecidas até 300°C, com taxa de aquecimento de 10°C por minuto, permanecendo nessa temperatura por 3 horas, com o objetivo de se eliminar toda a umidade. De acordo com Soares (2010), na temperatura de 300°C praticamente toda a umidade é eliminada. Na segunda etapa, as cinzas foram aquecidas a 500°C, temperatura obtida a partir da termogravimetria, à taxa de aquecimento de 10°C por minuto, com o objetivo de se eliminar agora toda a matéria orgânica das amostras e se obter sílica no estado amorfo. O tempo de permanência nessa temperatura foi de 3 horas. De acordo com Soares *et al.* (2014), a formação de sílica amorfa se dá em temperaturas abaixo de 600°C e em temperaturas superiores ocorre a formação de cristobalita (uma das formas alotrópicas da sílica cristalina).

5.2. Caracterização Física e Química

As Tabelas 5.1 e 5.2 apresentam os resultados referentes à caracterização física e química das Cinza 1, Cinza 1M e Cinza 2, respectivamente, antes à requeima e pós requeima. Juntamente com estes dados, também, são apresentados os resultados da perda ao fogo e massa específica dos materiais analisados.

Tabela 5.1 - Resultado da análise química das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar *in natura*.

Constituintes	Teor (%)		
	Cinza 1	Cinza 1M	Cinza 2
SiO ₂	66,80	69,50	21,10
Al ₂ O ₃	7,70	5,87	13,00
Fe ₂ O ₃	10,20	5,93	7,65
SO ₃	0,20	0,22	0,89
CaO	0,94	0,84	2,01
MgO	0,49	0,51	1,24
Na ₂ O	<0,10	<0,10	0,21
K ₂ O	1,03	1,19	2,16
Perda ao Fogo	11,77	16,20	48,92
Massa Específica (g/cm³)	2,47	2,42	1,88

Tabela 5.2 - Resultado da análise química das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar após a requeima.

Constituintes	Teor (%)		
	Cinza 1	Cinza 1M	Cinza 2
SiO ₂	80,90	81,20	41,10
Al ₂ O ₃	7,52	6,94	24,10
Fe ₂ O ₃	5,95	7,40	15,70
SO ₃	0,22	0,25	0,78
CaO	0,95	1,01	4,00
MgO	0,57	0,69	2,45
Na ₂ O	<0,10	0,13	0,48
K ₂ O	1,23	1,42	4,54
Perda ao Fogo	0,81	0,69	2,11
Massa Específica (g/cm³)	2,65	2,66	2,57

Cinza 1 e Cinza 1M, *in natura*, apresentam constituintes, perda ao fogo e massa específica similares aos encontrados por Pádua (2012) e Cordeiro *et al.* (2006). A Cinza 2 *in natura* possui baixa porcentagem de SiO₂, alta perda ao fogo e massa específica muito inferior aos descritos por esses pesquisadores. A baixa densidade para essa amostra associada à alta perda ao fogo indicaria um alto teor de material orgânico presente na Cinza 2. Todas as cinzas requeimadas apresentaram significativas alterações em suas características químicas após o beneficiamento. Provavelmente devido à perda de material volátil. Cordeiro e Barroso (2011), obtiveram resultados similares para a composição química e perda ao fogo de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar requeimadas a 600°C. A Cinza 2 que no estado *in natura* não apresentava composição química semelhante às obtidas na literatura, após a requeima se encontra com características químicas similares às cinzas estudadas pelos autores citados acima. A perda ao fogo sofreu grande redução, média para todas as amostras de 99,95%, o que confirmaria o alto teor de material volátil, provavelmente matéria orgânica. A densidade das Cinzas 1 e 1M não sofreram grandes alterações, média de 9%, diferentemente da Cinza 2 que teve sua densidade alterada (aumento de 37%).

Quanto às exigências da ABNT NBR 12653 (2012), apresentadas na Tabela 3.4.1, as Cinzas 1 e 1M antes da requeima atendem a todas as exigências da norma, com exceção da condição de perda ao fogo máxima do material. A Cinza 2 *in natura* atende somente à exigência máxima de SO₃, não atendendo às demais recomendações. O não enquadramento destas cinzas nestas exigências possivelmente é devido à grande quantidade de matéria orgânica presente em suas composições. Todas as amostras requeimadas atendem às exigências da NBR 12653 (2012), quanto ao somatório SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ (mínimo de 70% para pozolanas reativas), perda ao fogo (máximo de 10% para pozolanas reativas e de 6% para as demais), e teor de SO₃ (máximo de 4% para pozolanas reativas e 5% para as demais). No entanto, apenas as Cinzas 1 e Cinzas 1M se enquadram no teor de álcalis equivalente prescrito na referida norma (máximo de 1,5%). Dessa forma identifica-se a efetividade do processo de requeima com o objetivo de se reduzir o teor de matéria orgânica presente e homogeneizar a massa específica das amostras. No entanto a requeima não foi efetiva quanto ao teor de álcalis presentes.

A Tabela 5.3 apresenta os resultados obtidos para a caracterização da granulometria das cinzas obtida por espalhamento do feixe de laser e peneiramento. São apresentados os diâmetros médios das partículas abaixo dos quais se encontram 10%, 50% e 90% (ϕ d10, ϕ d50, ϕ d90) da massa de cinza de bagaço de cana-de-açúcar. Deve-se ressaltar que d10 corresponde a 10% das partículas com diâmetro menor ou igual a X microns. Também são mostrados a porcentagem passante na peneira de 45 μ m.

Tabela 5.3 – Distribuição granulométrica das cinzas de cana-de-açúcar *in natura* e pós requeima.

<i>In natura</i>					
Amostra	Diâmetro (μm)				Passante peneira 45 μm (%)
	10% (d10)	50% (d50)	90% (d90)	Médio	
Cinza 1	9,504	203,778	582,937	260,25	21,0
Cinza 1M	1,355	12,894	351,689	78,14	76,5
Cinza 2	2,12	9,58	32,29	13,53	100
Pós requeima					
Amostra	Diâmetro (μm)				Passante peneira 45 μm (%)
	10% (d10)	50% (d50)	90% (d90)	Médio	
Cinza 1	12,172	183,793	565,283	278,25	24,0
Cinza 1M	1,127	13,483	83,101	53,55	80,5
Cinza 2	1,39	8,47	28,62	11,88	100

Os resultados indicam que a requeima, como era de se esperar, não alterou consideravelmente, a distribuição granulométrica das cinzas. A moagem da Cinza 1 produziu uma redução da ordem de 70% do diâmetro médio das cinzas. A Cinza 2 se apresenta muito mais fina que a Cinza 1 e Cinza 1M. Em comparação à Cinza 1M a Cinza 2 apresentou maiores diferenças relacionadas ao diâmetro médio e ao d90, para d10 e d50 não existem grandes diferenças. Segundo a ABNT NBR 12653 (2012), para que um material seja considerado pozzolânico, o mesmo deve apresentar no mínimo 66% de material passante na peneira de 45 μm . Dessa forma apenas a Cinza 1M e a Cinza 2 atendem à exigência da norma. De acordo com Cordeiro e Barroso (2011), a atividade pozzolânica das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar sofre grande influência da finura em que o material se encontra, uma vez que quanto maior o módulo de finura do material, maior a reatividade do mesmo. Soares (2010), obteve resultados semelhantes para cinzas produzidas em laboratório em diversas temperaturas aos apresentados pela Cinza 1M e Cinza 2.

Os resultados das difrações de raios X da Cinza 1, Cinza 1M e Cinza 2 *in natura* e tratadas termicamente são apresentados, respectivamente, nas Figuras 5.3 e 5.4.

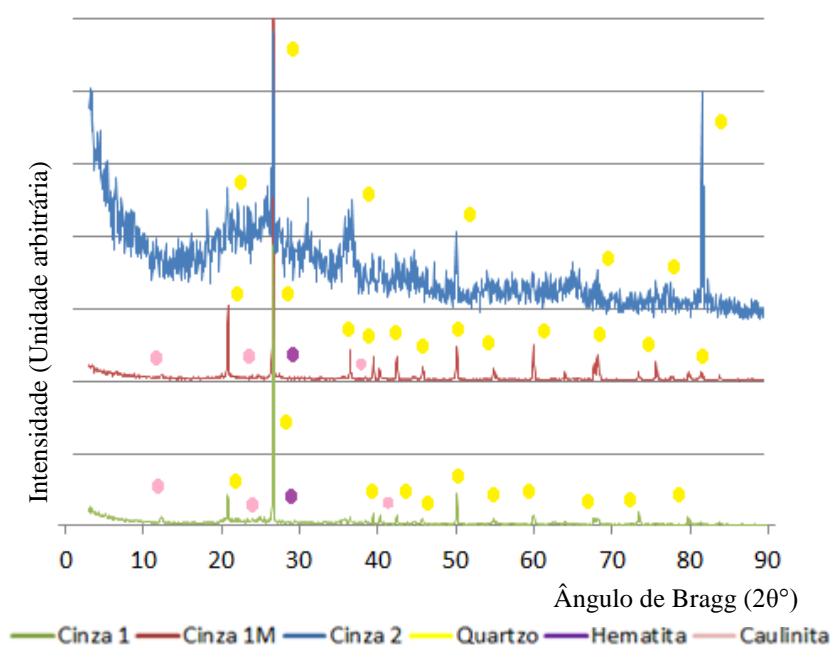


Figura 5.3 – Difratogramas de raios X das cinzas de cana-de-açúcar *in natura*.

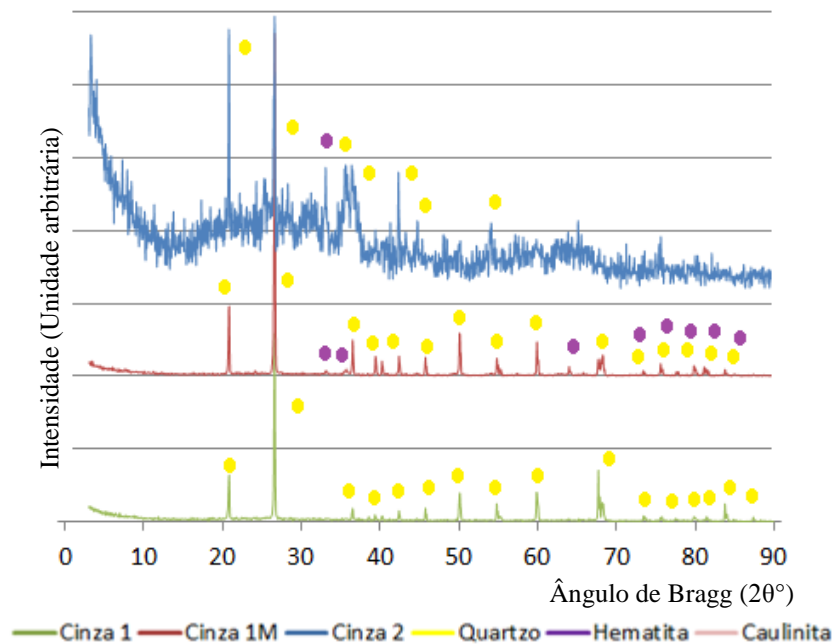


Figura 5.4 – Difratomogramas de raios X das cinzas de cana-de-açúcar requeimadas.

Os difratogramas da Cinza 1 e Cinza 1M *in natura* e pós requeima muito se assemelham entre si e aos espectros obtidos por Cordeiro e Barroso (2011), Pádua (2012) e Soares (2010). Os difratogramas apresentados pela Cinza 2, antes e após a requeima, são similares e se assemelham aos obtidos por Soares (2010) para cinzas produzidas sem circulação forçada de ar. O padrão de difração de raios X apresentado pela Cinza 1 e Cinza 1M indica alto nível de cristalinidade, sendo claramente identificadas a presença de hematita (Fe_2O_3) e quartzo (SiO_2). A Cinza 2 também apresenta quartzo e hematita, porém apresenta um espectro de difração mais difuso, indicando a presença de material não cristalino. Segundo Villar-Cociña *et al.*. (2003), o halo entre $2\theta = 06$ e 18 caracteriza a fase amorfa.

Deve-se ressaltar que a difração de raios X é um método mais apropriado para amostras cristalinas, e o quartzo tem a capacidade de inibir a identificação de outros elementos neste ensaio (Albers *et al*, 2002). É de esperar que materiais não cristalinos apresentem maior reatividade e, conseqüentemente, no caso de cimentícios suplementares, maior reatividade. No entanto, Scrivener e Nonat (2011), ressaltam que, apesar de ser amplamente aceito o fato de que fases amorfas tendem a ser mais reativas que as cristalinas, existem muitas exceções.

5.3. Avaliação da Atividade Pozolânica

Os resultados da avaliação da atividade pozolânica via ensaio Chapelle Modificado é apresentado na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Avaliação da atividade pozolânica das cinzas de cana-de-açúcar por meio do ensaio Chapelle Modificado.

Amostra de Cinza	Hidróxido de Cálcio fixado (mg/g)
Cinza 1 <i>in natura</i>	83,7
Cinza 1M <i>in natura</i>	171
Cinza 2 <i>in natura</i>	105,8
Cinza 1 requeima	153
Cinza 1M requeima	247,4
Cinza 2 requeima	261

Os resultados mostram que a moagem afeta significativamente (antes e após a requeima) a capacidade de reação das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar com o hidróxido de cálcio. Isto ocorreria, pois a cinética de reação é afetada pela maior superfície específica do material (ISAIA, 2007). Apesar da Cinza 2 apresentar menor teor de sílica ela apresentou maior reatividade do que a Cinza 1 (antes e após requeima) e que a Cinza 1M (pós requeima). A influência da finura nesses resultados é clara ao se comparar os resultados da Cinza 1 e da cinza 1M. No entanto, a amorficidade observada nas Cinzas 2, também, poderia contribuir para uma maior reatividade. Comparando-se a quantidade de hidróxido de cálcio fixado pelas amostras *in natura* e requeimadas, pode-se constatar a eficiência do processo de beneficiamento das amostras, provavelmente devido ao maior teor de sílica presente nas 3 cinzas após a requeima. A Cinza 1, Cinza 1M e Cinza 2 sofreram aumento de sua atividade pozolânica de 84%, 45% e 148% respectivamente. No entanto esses valores ainda não atingem o limite mínimo de 330 mg hidróxido de cálcio fixado por grama de material analisado, estabelecido por Raverdy et al. (1980). Cordeiro e Barroso (2011), avaliaram cinzas de bagaço de cana-de-açúcar requeimadas em laboratório a 600°C e obtiveram resultados de fixação de hidróxido de cálcio da ordem de 451 mg/g (mg de CaOH por g de cinza).

Os valores de variação de condutividade elétrica de uma solução saturada de hidróxido de cálcio contendo cinzas de bagaço de cana-de-açúcar após dois minutos da adição do material supostamente pozolânico são apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Avaliação da atividade pozolânica das cinzas de cana-de-açúcar por meio do ensaio de condutividade elétrica segundo o método proposto por Luxan *et al.*(1989).

Amostra de Cinza	Varição de Condutividade Elétrica (mS/cm)
Cinza 1 <i>in natura</i>	0,86
Cinza 1M <i>in natura</i>	0,81
Cinza 2 <i>in natura</i>	1,15
Cinza 1 requeima	0,52
Cinza 1M requeima	0,5
Cinza 2 requeima	0,78

Observa-se que a moagem não afeta os resultados do ensaio de condutividade elétrica e que a requeima promove uma menor variação da condutividade da solução. Segundo Luxan *et al.* (1989), quando a variação de condutividade elétrica for menor que 0,4 mS/cm o material é considerado não pozolânico, entre 0,4 e 1,2 mS/cm pozolânico moderado e para valores maiores que 1,2 mS/cm com boa atividade pozolânica. Dessa forma as cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, mesmo antes da requeima, apresentaram atividade moderada. Situação que não se alterou com a requeima. Os dados indicam que para todas as amostras ocorreu uma variação de condutividade. Para as cinzas *in natura* e requeimadas essa variação é maior para a Cinza 2. Isto poderia estar ao maior teor de matéria orgânica presente nesta amostra. Observa-se que a requeima diminui a variação de condutividade, o que não era de se esperar, pois uma maior quantidade de sílica estaria disponível para a reação, o que levaria a uma maior variação da condutividade. Considerando que o padrão de cristalinidade das cinzas não varia com a requeima, poderia ter ocorrido uma aglomeração de partículas que afetaria os resultados obtidos. Soares (2010), Cordeiro e Barroso (2011) e Pádua (2012), também avaliaram a variação de condutividade elétrica de cinzas de bagaço cana-de-açúcar obtidas em laboratório, os valores são superiores aos encontrados neste trabalho.

A Tabela 5.6 apresenta as quantidades dos materiais utilizados para fabricação dos corpos-de-prova para determinação das resistências mecânicas e o módulo de

elasticidade dos compostos cimentícios produzidos com e sem cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, com relação A/C e A/Ag constantes. As massas de cinza de bagaço de cana-de-açúcar utilizadas foram determinadas, considerando a substituição de 10% da massa de cimento pelo volume equivalente de cinzas, o que justifica as proporções diferentes para cada traço, pois as massas específicas das cinzas são diferentes. A relação A/C utiliza uma menor quantidade de água, uma vez que a relação A/Ag é sempre maior em massa de material.

Tabela 5.6 – Materiais utilizados para fabricação dos corpos-de-prova para determinação das resistências mecânicas e o módulo de elasticidade dos compostos cimentícios com cinzas (CCinza 1, CCinza 1M e CCinza 2) e sem cinzas de cana-de-açúcar, antes e pós requeima para relações água/cimento (A/C) e água/aglomerante (A/Ag) constantes, antes(AR) e pós requeima(PR).

Índice de Atividade Pozolânica - A/C					Índice de Atividade Pozolânica - A/Ag				
Antes da Requeima					Antes da Requeima				
Amostra	Cinza (g)	Cimento (g)	Areia (g)	Água (g)	Amostra	Cinza (g)	Cimento (g)	Areia (g)	Água (g)
CCinza 1	24,7	280,8	936	134,8	CCinza 1	24,7	280,8	936	146,6
CCinza 1M	24,2	280,8	936	134,8	CCinza 1M	24,2	280,8	936	146
CCinza 2	18,8	280,8	936	134,8	CCinza 2	18,8	280,8	936	143,8
Referência	0	312	936	149,8	Referência	0	312	936	149,8
Pós Requeima					Pós Requeima				
Amostra	Cinzas (g)	Cimento (g)	Areia (g)	Água (g)	Amostra	Cinzas (g)	Cimento (g)	Areia (g)	Água (g)
CCinza 1	26,5	280,8	936	134,8	CCinza 1	26,5	280,8	936	147,5
CCinza 1M	26,6	280,8	936	134,8	CCinza 1M	26,6	280,8	936	147,6
CCinza 2	25,7	280,8	936	134,8	CCinza 2	25,7	280,8	936	147,1
Referência	0	312	936	149,8	Referência	0	312	936	149,8

Os resultados obtidos no ensaio de compressão para os compostos com e sem cinzas antes da requeima (AR) e pós requeima (PR) são apresentados na Figura 5.5 e na Tabela 5.7 os resultados do índice de atividade pozolânica dos corpos-de-prova.

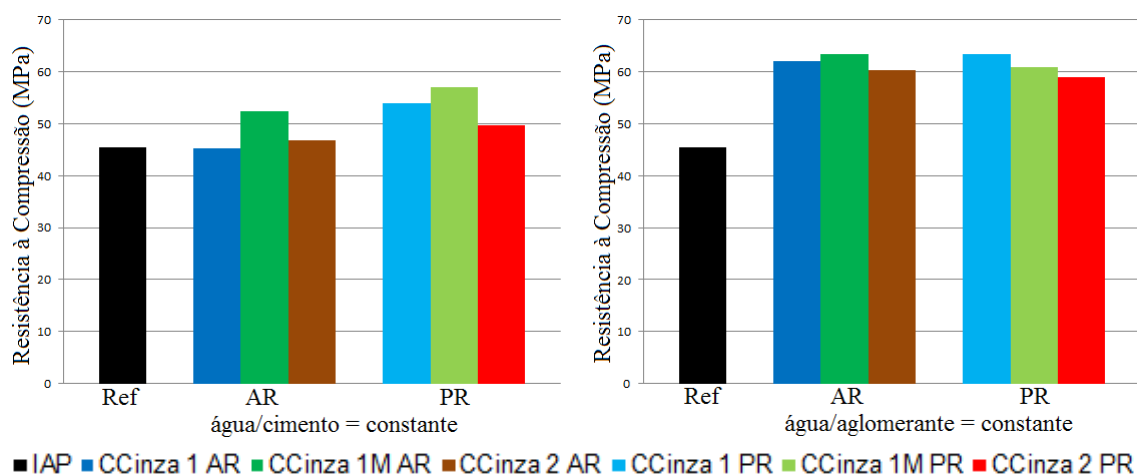


Figura 5.5 – Resistência à compressão dos compostos cimentícios com e sem substituição de 10% da massa de cimento pelo volume equivalente de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, para relações água/cimento (A/C) e água/aglomerante (A/Ag) constantes, antes (AR) e pós requeima (PR).

Tabela 5.7 – Índice de Atividade Pozolânica dos compostos cimentícios com e sem cinzas de cana-de-açúcar, antes e pós requeima para relações água/cimento (A/C) e água/aglomerante (A/Ag) constantes, antes (AR) e pós requeima (PR).

Relação	Amostra	IAP (%)
A/C	CCinza 1 AR	99,66
	CCinza 1M AR	115,02
	CCinza 2 Ar	103,07
	CCinza 1 PR	118,77
	CCinza 1M PR	125,26
	CCinza 2 PR	109,22
A/Ag	CCinza 1 AR	136,52
	CCinza 1M AR	139,25
	CCinza 2 Ar	132,76
	CCinza 1 PR	139,59
	CCinza 1M PR	133,79
	CCinza 2 PR	129,69

Os resultados mostram que ao se fixar a relação A/C se obtém resistências inferiores às obtidas quando se fixa a relação A/Ag. Isto se deve provavelmente à água disponível que proporciona maior trabalhabilidade e melhor adensamento das amostras. Deve-se ressaltar que neste trabalho não foi avaliado possíveis patologias que podem ocorrer pela presença de matéria orgânica nas amostras produzidas. No entanto, para ambos os casos, constata-se que o uso de 10% de cinzas em substituição ao cimento contribuiu consideravelmente para o aumento da resistência à compressão. Porém, essa contribuição é mais significativa para o traço com relação A/Ag constante. No caso da relação A/C constante a requeima contribuiu para um aumento da resistência, no entanto

para a relação A/Ag não é possível se identificar o beneficiamento pela requeima, não ocorre um aumento percentual da resistência à compressão. Isto indicaria que o mecanismo de ação das cinzas seria de preenchimento de vazios (efeito fíler).

De acordo com a norma EN 4220 (2010), ao se utilizar um percentual de 10% de substituição, deve-se obter um IAP de 90%, ou seja, os corpos de prova com cinza de bagaço de cana-de-açúcar deveriam alcançar uma resistência à compressão de no mínimo 35,91 MPa. Para todas as amostras antes e pós requeima os resultados obtidos foram superiores a tal exigência.

Silva Sá *et al.* (2011), por meio deste ensaio estudou a substituição parcial do cimento em três proporções 10, 20 e 35%: todos os resultados atenderam às exigências normativas. No entanto, a substituição de 10% de cimento obteve os melhores resultados. Cordeiro e Barroso (2011), obtiveram resultado (percentual de resistência em relação à amostra de referência) para o IAP de 72% para compostos cimentícios produzidos com cinzas de bagaço de cana de açúcar *in natura* e de 95% para os produzidos com cinzas requeimadas a 600°C, o percentual de substituição do cimento utilizado foi de 35%.

Os resultados do módulo de elasticidade obtidos por frequência ressonante forçada nos corpos de prova antes do ensaio IAP, também para as relações A/C e A/Ag são apresentados na Figura 5.6.

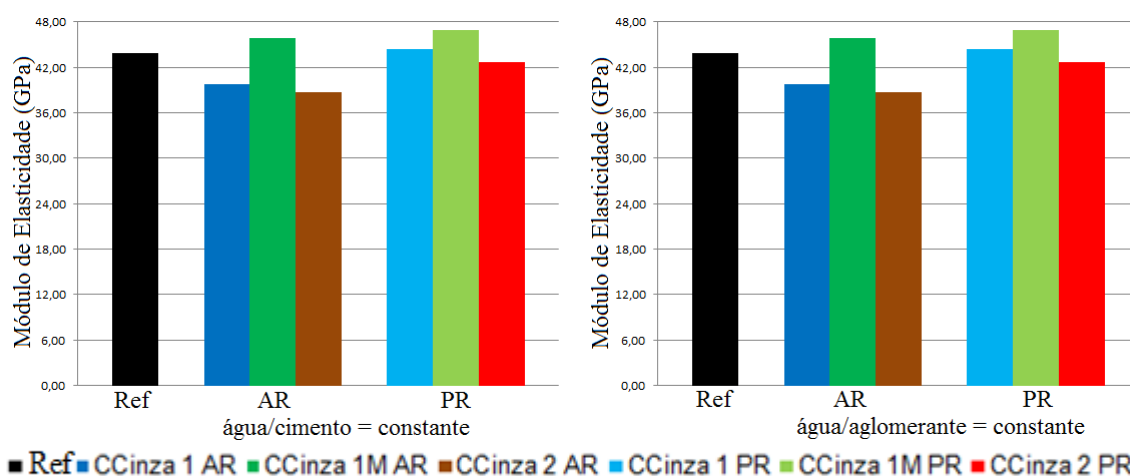


Figura 5.6 – Módulo de elasticidade dos compostos cimentícios com e sem substituição de 10% da massa de cimento pelo volume equivalente de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, para relações água/cimento (A/C) e água/aglomerante (A/Ag) constantes, antes (AR) e pós requeima (PR).

Dos valores de módulo de elasticidade obtidos para as amostras com cinzas *in natura* produzidas com relação A/C constante, apenas a CCinza 1M atingiu um valor similar à da amostra de referência (38 GPa). Para a CCinza 1 e CCinza 2 os valores foram inferiores (média de 11%). Para as cinzas requeimadas e relação A/C constante os resultados se apresentaram superiores aos das cinzas *in natura*. Com a requeima o módulo de elasticidade das amostras com Cinza 1 e Cinza 1M foi superior ao da amostra referência. Estes resultados confirmam os obtidos no ensaio de IAP para a relação A/C, uma vez que com o processo de requeima a resistência à compressão também foi elevada. Para a relação A/Ag constante os resultados obtidos tanto para as cinzas *in natura* quanto para as requeimadas são em média superiores aos obtidos para a amostra de referência. Também não é possível se identificar o beneficiamento das cinzas pelo tratamento térmico, pois não ocorreu aumento significativo do módulo de elasticidade após tal procedimento.

Em comparação ao ensaio IAP os resultados são harmônicos para os traços produzidos com relação A/C constante, antes e pós requeima. Os valores mais elevados para as amostras com relação A/Ag constante e a não ocorrência de aumento nos resultados com a requeima, sugerem que tal ocorrência seria devido à maior disponibilidade de água, conferindo maior trabalhabilidade e adensamento dos compostos cimentícios. Pádua (2012), obteve resultados satisfatórios e similares no mesmo ensaio para percentuais de substituição de 10, 15, 20 e 30%, tanto para relação A/C quanto para a relação A/Ag.

Os resultados do ensaio de resistência à tração pela flexão são apresentados na Figura 5.7. Este ensaio também seguiu a linha de trabalho do Índice de Atividade Pozolânica e Módulo de Elasticidade, onde são adotadas as relações A/C e A/Ag constantes antes e pós requeima.

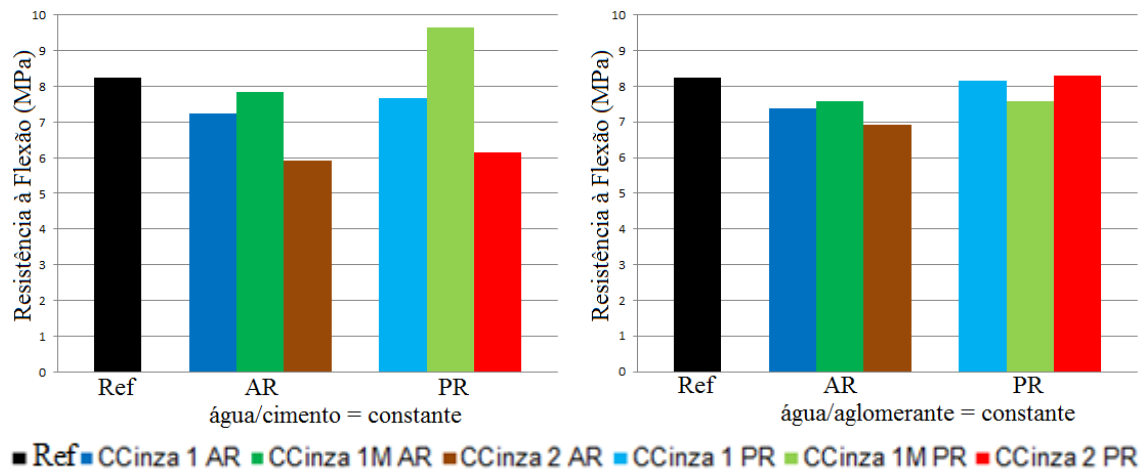


Figura 5.7 – Resistência à tração pela flexão dos compostos cimentícios com e sem substituição de 10% da massa de cimento pelo volume equivalente de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, para relações água/cimento (A/C) e água/aglomerante (A/Ag) constantes, antes (AR) e pós requeima (PR).

A resistência à tração na flexão dos corpos de prova produzidos com relação A/C em sua maioria são inferiores à amostra de referência. Somente obteve resultado superior ao traço produzido com a Cinza 1M pós requeima. Em alusão ao ensaio IAP, os compostos cimentícios produzidos com a Cinza 1M AR, Cinza 1 PR, Cinza 1M PR atingiram 90% da resistência à tração da amostra de referência. Quanto ao processo de requeima, não foi possível identificar a efetividade do beneficiamento para todas as mostras com relação A/C constante. Para a relação A/Ag constante apenas a amostra produzida com a Cinza 2 PR atingiu resistência superior à referência, porém, a maioria dos compostos produzidos com as cinzas de bagaço de cana-de-açúcar obtiveram resistência superior aos 90% da resistência da amostra de referência. A ineficiência do processo de beneficiamento para a relação A/Ag é mais evidente, uma vez que a variação da resistência com o tratamento térmico é muito pequena.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a resistência à tração de argamassas e concretos com zona de transição de baixa porosidade será sempre reduzida quando estiverem presentes um grande número de cristais de hidróxido de cálcio. A concentração destes cristais pode ser reduzida com a presença de adições pozolânicas que tendem a formar carbonato de cálcio recristalizado na zona de transição, conferindo maior resistência. Dessa forma, a análise conjunta dos resultados do Índice de Atividade Pozolânica, Módulo de Elasticidade e Resistência à Tração permitem concluir a não ocorrência da atividade pozolânica e sim presença do efeito *filler*.

6. CONCLUSÕES

A grande diferença existente na perda ao fogo entre as amostras Cinza 1, Cinza 1M e Cinza 2 denota a heterogeneidade das cinzas obtidas no mercado.

Do ponto de vista da granulometria apenas a Cinza 1M e a Cinza 2 seriam pozolânicas segundo a ABNT NBR 12653 (2012).

O tratamento de requeima promoveu significativas alterações nas características químicas das cinzas, tornando-as mais homogêneas quanto ao teor de sílica, perda ao fogo e massa específica. O processo de requeima foi eficaz quanto à eliminação de matéria orgânica presente nas cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, assim como para homogeneizar a massa específica.

Todas as amostras requeimadas atendem às exigências da ABNT NBR 12653 (2012) quanto ao somatório $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ e perda ao fogo. No entanto, apenas as Cinzas 1 e Cinzas 1M se enquadram no teor de álcalis equivalente prescrito na referida norma (máximo de 1,5%).

A requeima parece não alterar a estrutura do arranjo atômico das diferentes cinzas analisadas, que apresentam graus de amorficidade diferentes em função da origem.

A avaliação da atividade pozolânica via ensaios Chapelle Modificado e de condutividade elétrica segundo o método proposto por Luxan *et al.* (1989) divergem quanto aos seus resultados.

Os resultados do ensaio Chapelle Modificado mostram que a requeima favorece a reatividade das cinzas com o hidróxido de cálcio, provavelmente devido ao maior teor de sílica presente nas cinzas tratadas termicamente.

Os resultados do ensaio de condutividade elétrica mostram que as cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, mesmo antes da requeima, apresentaram atividade pozolânica moderada, não sendo possível identificar a influência da requeima.

O resultados do ensaio de Índice de atividade Pozolânica devem levar em conta que, independentemente de serem as cinzas pozolânicas ou não, a água a ser adicionada aos compostos cimentícios deve levar em conta presença das mesmas.

Os resultados, também, mostram que a granulometria afeta significativamente (antes e após a requeima) a capacidade de reação das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar com o hidróxido de cálcio, mesmo para cinzas com baixo teor de sílica, não sendo possível identificar a influência da amorficidade.

Constata-se que a substituição de 10% da massa de cimento pelo volume equivalente de cinzas de bagaço do cimento contribui consideravelmente para o aumento da resistência à compressão do composto cimentício, e que se atingiu o índice de atividade pozolânica prescrito pela norma portuguesa EN 4220 (2010), para todas as situações estudadas. A requeima parece não afetar os resultados obtidos quando se analisa os resultados com fator água/aglomerante constantes.

As cinzas analisadas quando em substituição parcial ao cimento (10%), independentemente da origem, granulometria e beneficiamento, mantêm o módulo de elasticidade e a resistência à tração na flexão.

A análise dos resultados obtidos indica que as propriedades mecânicas dos compostos cimentícios fabricados com substituição de 10% da massa de cimento pelo volume equivalente de cinzas de bagaço do cimento justificam seu uso e sugerem que o mecanismo de ação dessas cinzas é de preenchimento de vazios, sendo uma granulometria média de 650 μm suficiente para se ter tais benefícios. O tratamento de requeima não apresenta benefícios quanto a essas propriedades, o que reforça o efeito fíler devido ao uso das cinzas.

Faz-se necessário estudos quanto mitigar o teor de álcalis das cinzas cujo equivalente alcalino ultrapassa os valores recomendados pela normalização vigente.

7. REFERÊNCIAS

AÏTCIN, P-C. Concreto de alto desempenho. São Paulo: Pini, 2000.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 234R-96 - Guide for use of sílica fume in concrete. Manual of Concreto Praticce, part I. Farmington Hills, (2001).

ALARCON-RUIZ, L., PLATRETB, G., MASSIEUB, E., EHRLACHER, A. The use of Thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste. Cement and Concrete Research, 35, 609-613. 2005.

ALBERS, A. P. F.; MELCHIADES ,F. G.; MACHADO, R.; J. BALDO, B.; BOSCHI, A. O. A simple method for the characterization of clay minerals by X-ray diffraction. Cerâmica 48 (305). Jan/Fev/Mar 2002, 37.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). Relatório anual. Disponível http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_24/2012/09/03/189/20121122172811763174i.pdf . Acesso em 28 de dezembro de 2012.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11578 - Cimento Portland composto – Especificação. Rio de Janeiro, 1997.

_____. NBR 1214 - Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010

_____. NBR 12142 - Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

_____. NBR 12653 - Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR 15895 - Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010.

____. NBR 5733 - Cimento Portland de alta resistência inicial — Especificação. Rio de Janeiro, 1991.

____. NBR 5751: Materiais pozolânicos-Determinação da atividade pozolânica com cimento Portland- Índice de atividade pozolânica com cal. Rio de Janeiro, 1992.

____. NBR 5752: Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 1992.

____. NBR 7214: Areia normal para ensaio de cimento. Rio de Janeiro, 1982.

____. NBR 7215: Cimento Portland- Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. Métakaolin, addition pouzzolanique pour bétons: Définitions, spécifications, critères de conformité. La Plaine Saint-Denis. NF P18-513, 2010.

ASTM. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. C 215. Standart Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens, 2008.

____. ASTM C 618. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete. ASTM, Philadelphia, 2005.

BARBOZA FILHO, M.P.; PRABHU, A.S. Aplicação de silicato de cálcio na cultura do arroz – Circular Técnica 51, Santo Antônio de Goiás: EMBRAPA, 4p. 2002.

CARVALHO, M. L. Difração de raios-X – Notas de Aula, 2013. Disponível em: www.ciul.ul.pt/luisa/QuimFisMat/A5FluorTEORa2.pdf. Acesso em 10/01/2014.

CAVALCANTI, L. M.A.; RIBEIRO, D. V. Análises físicas e mecânicas de argamassas de Cimento Portland com areia contendo cinzas da queima do bagaço de cana-de-açúcar como agregado miúdo. Fórum Ambiental da Alta Paulista, 2013. Vol.: 09, Num.: 01.

CHAGAS, D. de J.; Cordeiro, G. C.; Avaliação da atividade pozolânica de diferentes cinzas agroindustriais por técnicas experimentais distintas. IV Congresso Fluminense de Iniciação Científica e Tecnológica, 2012.

CIMENTO.ORG – O MUNDO DO CIMENTO. Cimento no mundo. Disponível em: <http://cimento.org/cimento-no-mundo/>. Acesso em 14 de dezembro de 2014.

COOK, D.J. Calcined clay, shale and other soils. In: SWAMY, R.N. Cement replacement materials, London: Blackie and Son LTDA, 1986.

CORDEIRO, G.C.; BARROSO, T. R. Avaliação da atividade pozolânica e aplicação em concreto de cinza do bagaço de cana-de-açúcar produzida com queima controlada. Anais do 53º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON, 2011.

CORDEIRO, G.C.; TOLEDO FILHO, R.D.; ALMEIDA, R.S. de. Influence of ultrafine wet grinding on pozzolanic activity of submicrometre sugar cane bagasse ash. *Advances in Applied Ceramics* 08, 453 – 456, 2011.

CORDEIRO, G.C.; TOLEDO FILHO, R.D.; FAIRBAIRN, E.M.R. Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash. *Construction and Building Materials* 23, 3301-3303, 2009^a.

CORDEIRO, G.C.; TOLEDO FILHO, R.D.; FAIRBAIRN, E.M.R. Characterization of sugar cane bagasse ash for use as pozzolan in cementitious materials. *Química Nova*. 2009^b, vol.32, n.1, pp. 82-86. ISSN 0100-4042^b.

CORDEIRO, G.C.; TOLEDO FILHO, R.D.; TAVARES, L.M.; FAIRBAIRN, E.M.R. Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. *Cement & Concrete Composites* 30, 410–418, 2008.

CORDEIRO, G.C.; TOLEDO FILHO, R.D.; FAIRBAIN, E.M.R. Produção de cinza ultrafina da casca de arroz com elevado teor de carbono para emprego em concreto de alto desempenho. Anais das XXXII Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural. Campinas. 2006.

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

COCIÑA, E. V.; RUIZ, J. H.; FRÍAS, M.; SAVASTANO JR, H. Pozzolanic behaviour of a bagasse ash from the boiler of a Cuban sugar factory. *Advances in Cement Research*, 2013, 25(3), 136–142.

COCIÑA, E. V.; VALENCIA-MORALES, E.; SANCHES ROJAS M. I. An Evaluation of different kinetics models for determining the kinetic coefficients in sugar cane-straw – ash/lime system. *Advances in Cement Research*, v.18, p. 17-26, 2006.

COUTINHO, A.de S. *Fabrico e Propriedades do Betão. Volume I. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, 1997.*

CTC (Centro de Tecnologia Canavieira). *Revista Variedades CTC*. Disponível http://www.ctcanavieira.com.br/downloads/variedades2012_FINAL.pdf Acesso em 28 de dezembro de 2012.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais para concreto estrutural. In: ISAIA, G. C. (Ed.). *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto. v.1, capítulo 12, p. 345-380, 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. *Sumario Mineral 2013 – Produção de Cimento Mundial*. Brasília, 2013.

DONATELLO, S; TYRER, M; CHEESEMAN, C.R. Comparison of test methods to assess pozzolanic activity. *Cement & Concrete Composites* 32. 121-127, 2010.

IPQ. INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE. NP EN 4220: Pozolanas para betão, argamassa e caldas - definições, requisitos e verificação da conformidade. Lisboa, IPQ, 2010.

FERREIRA, R. T. L. Cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, produção, caracterização e avaliação de seu potencial pozolânico. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG. Brasil, 2012.

FERREIRA, R. T. L.; NUNES, F. M. M. P.; BEZERRA, A. C. S.; FIGUEIREDO R. B.; CETLIN, P. R.; AGUILAR, M. T. P. Estudo da influência da requeima na pozolanicidade de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar de diferentes características. 21º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais. 1501 – 1508, 2014.

FIESP/CIESP. Ampliação da oferta de energia através da biomassa (bagaço da cana-de-açúcar), São Paulo: FIESP/CIESP, 90 p, 2001.

FREIRE, W.J.; BERALDO, A.L. Tecnologia e Materiais Alternativos de Construção. V1. Ed. UNICAMP, 2004.

GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. Cement and Concrete Composites, Barking, v. 29, p. 515-524, 2007.

GHAVAMI, K. Non-conventional material and technologies: applications and future tendencies. Proceeding of the 11th International Conference on Non-conventional materials technologies (NOCMAT 2009), Bath, UK. 2009.

GONÇALVES, M.C.; MARGARIDO, F. Ciência e Engenharia de Materiais de Construção. V1. Ed. IST Press, 2012.

HAACK, M.S. Análise de materiais por espectroscopia no infravermelho dentro do sistema de gestão da qualidade conforme ABNT NBR ISO/IEC 17025. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2010.

HOJO, L. Y. C. P.; GUELSSI E.; MARTINS, C. H. Caracterização da cinza leve do bagaço da cana de açúcar e o índice de atividade pozolânica. IX Encontro Tecnológico da Engenharia Civil e Arquitetura, 2013.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. Diagnóstico dos Resíduos Orgânicos do Setor Agrossilvopastoril e Agroindústrias Associadas. Relatório de Pesquisa. Brasília, 2012.

ISAIA, GERALDO C. Concreto – Ensino, Pesquisa e Realizações. 1ª Edição. Volume 1. São Paulo: IBRACON, 2005.

ISAIA, GERALDO C. Materiais de Construção Civil e princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. 1ª Edição. Volume 1 e 2. São Paulo: IBRACON, 2007.

KAEFER, L.F. A evolução do concreto: história do concreto armado. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, USP. Disponível em: <http://www.cimento.org/concreto.htm>. Acessado em 12/12/2013.

KAWABATA, C. Y. Aproveitamento de cinzas da queima de resíduos agroindustriais na produção de compósitos fibrosos e concreto leve para a construção rural. 2008. 181f. Tese (Doutorado em Zootecnia)-Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2008.

LAMONICA, H.M. Produção de vapor e eletricidade- A evolução do setor sucroalcooleiro. 2007.

LUXAN, M.P.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. Cement and Concrete Research, Volume 19, Issue 1, January 1989, Pages 63-68.

MASSAZZA, F. In: Lea's Chemistry of Cement and Concrete, Hewlett, P.C. (ed), 4th ed, New York: J.Wiley. pp.471-63, 1988.

MCCARTER, W.J.; TRAN, D. Monitoring pozzolanic activity by direct activation with calcium hydroxide. Construction and Building Materials 10. 179 – 184, 1996.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: Ibracon (Instituto Brasileiro do Concreto), 2008.

NEVES JÚNIOR, A., TOLEDO, R.D., DWECK, J. Estudo da hidratação de cimento ARI-RS por análise termogravimétrica e termogravimétrica derivativa. Anais do II Seminário sobre Resíduos Sólidos na Construção Civil – ENARC 2011, Maceió, AL, 1-12. 2011.

NEVILLE, A.M.; BROOKS, J.J. Tecnologia do Concreto. 2ª Edição. São Paulo: Bookman, 2010.

NEVILLE, A.M. Cements of different types. In: Properties of concrete. 3ed. England, Longman Scientific & Technical, p. 63-117, 1982.

PÁDUA, P. G. L. Desempenho de compósitos cimentícios fabricados com cimentos aditivados com cinzas de bagaço de cana-de-açúcar in natura e beneficiadas. Tese (doutorado), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2012.

PAULA, M. O. de; TINOCO, I. de F.F.; RODRIGUES, C. de S.; SILVA, E. N. da; Souza, C. de F. Potential of sugarcane bagasse ash as a partial replacement material for Portland Cement. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. 13.3 (May/June 2009): p353.

PEREZ, R.; JÚNIOR, A.G.S.; VIANA, K.R.O. Desenvolvimento da Cadeia de Insumos do APL Etanol no Triângulo Mineiro. 1ª edição. Viçosa, 2011.

POGGIALI, F. S. J. Desempenho de microconcretos fabricados com cimento Portland com adições de cinza de bagaço de cana-de-açúcar. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2010.

RAVERDY, M., BRIVOT, F., PAILLÈRE, A. M., DRON, R. Appréciation de l'activité pouzzolanique des constituants secondaires. 7e. Congrès International de la Chimie des Ciments Volume III, 36. Paris.1980.

RÊGO, J.H.S.; NEPOMUCENO, A.A; FIGUEIREDO, E.P.; VIEIRA, F.L. Análise da microestrutura e da estrutura porosa de pastas de cimentos compostos com cinzas de casca de arroz (CCAs) amorfa e cristalina. 48º IBRACON (Congresso Brasileiro de Concreto). 2006.

RODRIGUES, M. S.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V.; BERALDO, A.L.; SAVASTANO JUNIOR, H. Characterization and pozzolanic evaluation of sugar cane bagasse ashes. IC-NOCMAT 2010 (International Conference on Non-Conventional materials and technologies: ecological materials and technologies for sustainable building). Cairo-Egito. 2010

RUIZ-SANTAQUITERIA, C.; FERNANDEZ-JIMENEZ, A.; PALOMO, A. Cementos de bajo impacto ambiental: activación alcalina de aluminosilicatos. X Congreso Latinoamericano de Patología y XII Congreso de Calidad en la Construcción.CONPAT 2009. Valparaíso-Chile. 2009.

SÁ, J. DA S.; JÚNIOR, E. DE C.; OLIVEIRA, S. L. DE; BARBOSA, A. H. Cinza do bagaço de cana-de-açúcar para utilização em concretos: caracterização físico-química. Anais do 53º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON, 2011.

SALES, F.A. Estudo da atividade pozolânica de micropartículas de vidro soda-cal, incolor e âmbar, e sua influência no desempenho de compostos de cimento Portland. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2014.

SCANDIUZZI, L.; ANDRIOLO, F.R. Concreto e seus Materiais – Propriedades e Ensaaios. 1ª Edição. São Paulo: PINI, 1986.

SCRIVENER, K.L.; NONAT, A. Hydration of cementitious materials, presente and future. Cement and Concrete Research 41. 651 – 665, 2011.

SILVA, M.G. Cimentos Portland com adições minerais. In: ISAIA, G.C. (Ed). Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. São Paulo: IBRACON, 2007.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. Relatórios de Produção. Disponível em: http://www.snico.org.br/numeros_dinamico.asp, acessado em 21/01/2014.

SOARES, M. M. N. de S. Influência das condições de queima nas características físico-químicas das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar. Dissertação de (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2010.

SOARES, M. M. N.; POGGIALI, F. S. J.; BEZERRA, A. C. S.; FIGUEIREDO, R. B.; AGUILAR, M. T. P.; CETLIN, P. R. The effect of calcination conditions on the physical and chemical characteristics of sugar cane bagasse ash. *Revista Escola de Minas*, 2014, 67 (Enero-Marzo). Data de consulta: 12 / diciembre / 2014] Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56430643005>> ISSN 0370-4467

SOUTO, J.M.F.; VANDERLEI, R.D.; NUNES, I.H.S. Avaliação da cinza do bagaço de cana-de-açúcar em substituição parcial de cimento Portland na produção de concretos. 51º IBRACON (Congresso Brasileiro de Concreto). Curitiba-PR. 2009

SOUZA, G.N.; FORMAGINI, S.; CUSTÓDIO, F.O.; SILVEIRA, M.M. Desenvolvimento de argamassas com substituição parcial do cimento Portland por cinzas residuais do bagaço de cana-de-açúcar. 49º IBRACON (Congresso Brasileiro de Concreto). Bento Gonçalves-RS. 2007.

TASHIMA, M.M. Cinza de casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira. 2006.

TOLEDO FILHO, R. D., GONÇALVES J. P., AMERICANO B. B., FAIRBAIRN E. M. R. Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil. *Cement and Concrete Research*, v.37, n.9, 2007, pp. 1357-1365.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. Histórico de Produção. Disponível em: <http://www.unicadata.com.br/historico-de-producao-e-moagem.php?idMn=32&tipoHistorico=4>, acessado em 21/01/2014.

VASCONCELOS, Y. Concreto feito de cinzas. Revista Pesquisa FAPESP. Ed. 171, pg 68 – 71. Maio, 2010.