



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

FRANCISCO EDVAR LINHARES JUNIOR

DESENVOLVIMENTO DE TIJOLOS ECOLÓGICOS COM CINZAS VOLANTES

FORTALEZA

2018

FRANCISCO EDVAR LINHARES JUNIOR

DESENVOLVIMENTO DE TIJOLOS ECOLÓGICOS COM CINZAS VOLANTES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química. Área de concentração: Processos Químicos e Bioquímicos.

Orientador: Prof. Dr. Sebastião Mardônio Pereira de Lucena.

Coorientador: Prof. Dr. Prof. Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira.

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

L728d Linhares Junior, Francisco Edvar.
Desenvolvimento de tijolos ecológicos com cinzas volantes / Francisco Edvar Linhares Junior. – 2018.
64 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Fortaleza, 2018.

Orientação: Prof. Dr. Sebastião Mardônio Pereira de Lucena.

Coorientação: Prof. Dr. Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira.

1. Cinzas volantes. 2. Tijolos ecológicos. 3. Resistência mecânica. 4. Difração de raios-x. I. Título.
CDD 660

FRANCISCO EDVAR LINHARES JUNIOR

DESENVOLVIMENTO DE TIJOLOS ECOLÓGICOS COM CINZAS VOLANTES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química. Área de Concentração: Processos Químicos e Bioquímicos.

Aprovada em: 17/05/2018

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Sebastião Mardônio Pereira de Lucena (Orientador)
Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. João José Hiluy Filho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Alexandre Araújo Bertini
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

Aos Professores Sebastião Mardônio, Ricardo Emílio, João Hiluy, Alexandre Bertini e Aldo Almeida, meus orientadores e amigos de todas as horas, que me acompanharam durante toda a pesquisa com muita atenção cedida, empatia, transparência e orientações valiosas.

Ao aluno de graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais Felipe Soares pela sua cordialidade, fraternidade e parceria no compartilhamento das atividades.

Ao Secretário Danilo da PGEQ pelo incansável apoio pedagógico e administrativo.

Ao meu amigo de turma e Pós-Doutor Diego Romão que me acompanha desde os primórdios da graduação.

À minha esposa Rayara Linhares por sua maturidade e compaixão, a meus pais sempre dispostos ajudar mesmo estando em Sobral, e ao meu filho Tácito Linhares pela eterna e agradável companhia e motivação, donos de minha felicidade.

À Universidade Federal do Ceará pelo seu acolhimento e dom da democracia desde a época de Pré-Universitário.

Aos Centros de Ciências e de Tecnologia e os seus respectivos departamentos que apoiaram com os seus laboratórios.

Ao carinho que tenho pelo Departamento e pelo Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, principalmente representado pelo Professor e Amigo Ricardo Emílio.

À CAPES pelo auxílio financeiro que permitiu a realização desta pesquisa e aos amigos e autores que contribuíram sobre o assunto abordado, somando teoria e prática.

Ao Grupo Votorantim Cimentos que me fez um profissional de garra, determinação e principalmente transpiração.

RESUMO

O carvão mineral tem sido utilizado como fonte de energia elétrica através das usinas termelétricas, gerando cinzas volantes. A intensificação do uso do carvão tende a aumentar o problema de armazenagem e gestão ambiental dessas cinzas volantes. Muitos estudos em todo o mundo têm sugerido diversas aplicações para esses resíduos por eles apresentarem uma composição química semelhante aos materiais pozolânicos, cerâmicos e ter capacidade cimentícia. Com isso a busca maior é de encontrar utilizações desses resíduos como materiais para construção civil. O encarecimento da produção de tijolos cerâmicos tradicionais com a sua alta poluição de fabricação, devido ao preço crescente dos combustíveis fósseis, tem incentivado a procura de materiais alternativos para a construção de alvenarias. O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de tijolos ecológicos feitos de misturas de cinzas volantes com aglomerantes e agregados minerais, buscando melhores resultados em relação a outros trabalhos, com propriedades mecânicas otimizadas, sendo a resistência a compressão axial a principal. Foram experimentadas configurações de misturas com traços de cinzas a partir de 50%, e o restante do traço divididos entre cal, areia e cimento em prol de garantir uma confecção padronizada dos tijolos, baixando custo produtivos através de prensa mecânica e principalmente reduzindo os impactos ambientais. Os ensaios de rompimentos foram processados com corpos de prova até o encontro de uma divisão percentual satisfatória de matérias-primas que otimizasse a capacidade de resistência mecânica. Após todas as tentativas de otimização, foi definido um traço na qual sua composição ficou fracionada no processo de mistura e cura em 70% de cinzas e 10% para cada um dos outros materiais de construção adicionados, traço esse que gerou um nível de resistência considerável e elevado em relação a comparação de resultados de outros trabalhos. Foram obtidos valores de pico e valores médios dos traços bem acima no comparativo com outras pesquisas, otimizando e homologando o traço para a confecção dos tijolos, na qual foram produzidos obtendo excelentes características visuais e estruturais. Seguidamente, essa composição foi caracterizada químico-mineralogicamente através de análises de difração e fluorescência de raio-x, ocorrendo a certificação da obtenção de um cenário positivo e promissor de uso geral na construção civil desses tijolos ditos ecológicos, trazendo uma relação custo/benefício e técnica/financeira viável para uma produção em maiores escalas, direcionando principalmente o desenvolvimento para pessoas de baixa renda.

Palavras Chave: Cinza volantes, tijolos ecológicos, resistência mecânica, difração de raios-x.

ABSTRACT

Mineral coal has been used as a source of electricity through thermoelectric plants, generating fly ash. The intensification of the use of coal tends to increase the problem of storage and environmental management of these fly ash. Many studies around the world have suggested several applications for these residues because they have a chemical composition similar to pozzolanic, ceramic and cementitious materials. With that the greater search is to find uses of these residues as materials for civil construction. The increase in the production of traditional ceramic bricks with their high manufacturing pollution due to the increasing price of fossil fuels has encouraged the search for alternative materials for the construction of masonry. The objective of this work is the development of ecological bricks made of mixtures of fly ash with agglomerates and mineral aggregates, seeking better results in relation to other works, with optimized mechanical properties, with axial compressive strength being the main. Mixture configurations with traces of ash from 50% and the remainder of the trace divided between lime, sand and cement were tried in order to guarantee a standardized construction of the bricks, lowering production costs through mechanical presses and mainly reducing environmental impacts. The rupture tests were processed with test specimens until a satisfactory percentage of raw materials were found to optimize mechanical strength. After all the optimization attempts, a trait was defined in which its composition was fractioned in the process of mixing and curing in 70% of ashes and 10% for each of the other added building materials, a trait that generated a considerable level of resistance and high compared to the results of other surveys. Peak values and mean values of the traces well above were obtained in comparison with other studies, optimizing and homologating the trace for the brick making, which were produced obtaining excellent visual and structural characteristics. Afterwards, this composition was characterized chemically-mineralogically through diffraction and x-ray fluorescence analyzes, which resulted in the certification of a positive and promising scenario of general use in the civil construction of these so-called ecological bricks, bringing a cost/benefit ratio and technical/financial feasibility for a production in larger scales, directing mainly the development for people of low income.

Keywords: Fly ash, green bricks, mechanical strength, x-ray diffraction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama ternário dos principais materiais cimentícios.....	22
Figura 2 – Linhas de pesquisas da UFC para reuso das cinzas da ENEVA.....	26
Figura 3 – Resistência dos tipos de cimentos nas idades mais utilizadas.....	28
Figura 4 – Difratoograma das cinzas volantes utilizadas.....	37
Figura 5 – Prensa manual utilizada.....	47
Figura 6 – Tijolo ecológico desenvolvido com o traço otimizado 8H.....	47
Figura 7 – Corpos de prova feito com traços da tabela 22.....	49
Figura 8 – Difratoograma geral para todas as idades do traço 8H.....	52
Figura 9 – Difratoograma de 0 dias do traço 8H.....	53
Figura 10 – Difratoograma de 7 dias do traço 8H.....	53
Figura 11 – Difratoograma de 14 dias do traço 8H.....	54
Figura 12 – Difratoograma de 21 dias do traço 8H.....	55
Figura 13 – Difratoograma de 28 dias do traço 8H.....	55

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Percentual reacional das idades de cura.....	24
Gráfico 2 – Análises de granulometria das cinzas.....	36
Gráfico 3 – Resultados dos traços 2B, 3C e 4D.....	42
Gráfico 4 – Resultados dos traços 5E, 6F e 7G.....	43
Gráfico 5 – Traço 8H, resultado médio de 14 e 28 dias de idade.....	46
Gráfico 6 – Análise de Fluorescência do tijolo com o traço 8H.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais compostos químicos do clínquer.....	19
Tabela 2 – Requisitos para materiais com atividade pozolânica.....	27
Tabela 3 – Composição química da cal utilizada em comparação com a normatização.....	28
Tabela 4 – Granulometria da areia utilizada.....	29
Tabela 5 – Exigências de formas e dimensões para tijolos ecológicos.....	32
Tabela 6 – Ensaio de lixiviação (mg/L)	33
Tabela 7 – Ensaio de solubilização (mg/L)	34
Tabela 8 – Concentração de Cl^- e SO_4^{2-} máxima admissível.....	34
Tabela 9 – Concentração de Cl^- e SO_4^{2-} presentes nas argamassas.....	34
Tabela 10 – Análises de massa específica das cinzas.....	35
Tabela 11 – Óxidos e requisitos físicos e químicos para cinzas na construção civil.....	36
Tabela 12 – Requisitos químicos e físicos para um material ser pozolânico.....	37
Tabela 13 – Categoria dos tijolos em relação a resistência.....	38
Tabela 14 – Rompimento em corpos de prova de solo-cimento.....	39
Tabela 15 – Rompimento de amostras de solo-cimento com e sem adição de resíduos.....	39
Tabela 16 – Rompimento de corpos de prova com variação de traços cinzas x cal.....	41
Tabela 17 – Traços iniciais da pesquisa.....	41
Tabela 18 – Traços da segunda etapa para rompimento para 7 e 14 dias.....	43
Tabela 19 – Traço de trabalho para desenvolvimento dos tijolos.....	45
Tabela 20 – Detalhe dos resultados do traço 8H.....	45
Tabela 21 – Resultado dos testes de absorção e perda de massa para o traço 8H.....	48
Tabela 22 – Traço 9I.....	49

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Considerações Iniciais	13
1.2	Justificativa da Pesquisa	14
1.3	Questões de Pesquisa	16
1.4	Objetivos	16
1.4.1	<i>Objetivo Geral</i>	16
1.4.2	<i>Objetivos Específicos</i>	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Cinzas de Carvão Mineral	18
2.2	Características das Cinzas Volantes	18
2.3	Materiais Pozolânicos	20
2.4	Os resíduos da combustão e suas diretrizes	22
2.5	As idades de cura e tempo de pega	23
2.6	Viabilidade dos tijolos ecológicos	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1	Introdução	26
3.1.1	<i>Cinzas Volantes</i>	27
3.1.2	<i>Cal Hidratada</i>	27
3.1.3	<i>Cimento</i>	28
3.1.4	<i>Água</i>	28
3.1.5	<i>Areia</i>	29
3.2	Métodos Utilizados	29
3.2.1	<i>Testes de resistência a compressão em corpos de provas</i>	29
3.2.2	<i>Teste de absorção e perda de massa</i>	30
3.2.3	<i>Confecção do Tijolo</i>	31
3.2.4	<i>Caracterização químico-mineralógica</i>	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1	Caracterização das Amostras de Cinzas	33
4.1.1	<i>Estudos sobre lixiviação das cinzas</i>	33
4.1.2	<i>Solubilização das cinzas</i>	34
4.1.3	<i>Presença de sulfatos e cloretos nas cinzas</i>	34
4.1.4	<i>Massa específica das cinzas</i>	35

4.1.5	<i>Granulometria das cinzas</i>	35
4.1.6	<i>Fluorescência das cinzas</i>	36
4.1.7	<i>Difração das cinzas</i>	37
4.2	Tijolo ecológico	38
4.2.1	<i>Influência da concentração de cinzas</i>	40
4.2.2	<i>Minimização de constituintes</i>	42
4.2.3	<i>Influência do Cimento</i>	44
4.2.4	<i>Testes de absorção e durabilidade em água</i>	47
4.2.5	<i>Análises de traço sem cinzas e com excesso de areia</i>	48
4.2.6	<i>Mecanismos reacionais pozolânicos e a influência da adição de cimento</i>	49
4.2.7	<i>Análises químico-mineralógicas do traço e tijolo desenvolvido</i>	51
4.2.8	<i>Discussão sobre as aplicações dos tijolos ecológicos na habitação social</i>	56
5	CONCLUSÕES	58
5.1	Sugestões e Recomendações para Estudos Futuros	58
	REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Cinzas volantes ou cinzas leves de combustível pulverizado, são as designações dada ao material obtido pela precipitação eletrostática ou captação mecânica em filtros de mangas das partículas contidas no processo de combustão produzidas pela queima de combustível nas centrais termelétricas a carvão mineral para a geração de energia. As cinzas volantes possuem propriedades químicas e mecânicas que fazem dela um insumo largamente utilizado em produtos de concreto, em camadas de revestimento de pavimentos, pontes, edifícios, blocos, dentre outros (ROHDE *et al.*, 2016).

O aumento da utilização de resíduos na construção civil cresceu devido à necessidade de eliminar esse passivo das termelétricas. Aliado a isso, houve um forte crescimento industrial nas últimas décadas e, conseqüentemente, uma maior preocupação com a preservação ambiental. O governo vem impondo medidas no sentido de compatibilizar o crescimento industrial com a preservação do meio ambiente (MENDONÇA, 2017).

Neste contexto além da criação de leis mais rigorosas, da realização de maior fiscalização e do surgimento de organizações em prol do meio ambiente, pode ser citado também, como uma alternativa economicamente viável e sustentável, o aproveitamento de rejeitos industriais como insumo para serviços diversos, como exemplo o reaproveitamento no desenvolvimento de tijolos ecológicos (VALADÃO, 2017).

A geração de subprodutos é uma das conseqüências de qualquer processo industrial. Devido ao crescimento deste setor, torna-se cada vez maior a quantidade dos diversos tipos de rejeitos gerados, o que faz surgir à preocupação com o descarte e conseqüente busca por soluções eficazes para a diminuição dos impactos ambientais e dos custos associados com seu acondicionamento e disposição final. Dessa forma, a utilização em projetos de alvenaria pode amenizar a necessidade de exploração de materiais naturais em jazidas, o que poderá reduzir os custos associados a esses processos (ZEN, 2016).

O desenvolvimento da mineralogia e adoção de técnicas analíticas, químicas e físico-químicas desenvolvidas em outros setores da ciência, muito tem contribuído para a elucidação dos processos e modificações mineralógicas como no caso das cinzas. Paralelamente desenvolveu-se o campo da mineralogia aplicada como contribuição a outras ciências, utilizando os mesmos conhecimentos e procedimentos da mineralogia clássica na compreensão dos fenômenos de formação, modificação e comportamentos das cinzas (LIN, 2016).

1.2 Justificativa da Pesquisa

Os grandes volumes de cinzas de carvão gerados estão ligados ao crescimento das usinas termelétricas e ao aumento do consumo anual de carvão mineral como combustível no mundo. No Brasil, a utilização do carvão para a produção de eletricidade cresceu devido ao baixo nível dos reservatórios das hidrelétricas e, conseqüentemente, a baixa produção de eletricidade por geração hidráulica. O uso do carvão para produção de eletricidade aumentou em 9,4% em 2015, se comparado ao ano anterior.

No Brasil, segundo a EPE - Empresa de Pesquisas Energéticas (2018), o consumo de carvão mineral somente na geração de energia por usinas termelétrica passou de 2,1Mtep em 2006 para 4,5Mtep em 2015, representando um aumento de 53,3% no consumo deste combustível no período avaliado. No estado do Ceará a capacidade instalada de geração elétrica por termelétricas passou de 1.046MW em 2005 para 1,949MW em 2015, acarretando um aumento de 86% nesse período de 10 anos.

As usinas termelétricas movidas a carvão em território cearense acumulam elevadas quantidades de cinza, sendo estas heterogêneas, pois são derivadas de carvões de origens diversas, além de serem produzidas por diferentes tecnologias de queima. Grande parte do material estocado não possui mercado consumidor definido devido à falta de informações que apontem a sua aplicação como insumo na construção/fabricação/produção de produto ou serviço.

A região do Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), no município de São Gonçalo do Amarante/Ce, conta com duas usinas termelétricas, sendo duas unidades: Energia Pecém, do Grupo EDP, e outra da Pecém II, que tem seu controle compartilhado entre a Eneva (50%) e a empresa alemã E. ON (50%). Ambas contribuem para o desenvolvimento regional e garantem a segurança energética do Ceará, uma vez que representam entre 70% e 80% de tudo aquilo que o Estado consome.

Apesar do estado do Ceará produzir 1,6 vezes aquilo que consome de energia elétrica, ou seja, é um respeitado exportador de eletricidade, ter as duas unidades produtoras garantem uma situação bastante confortável neste quesito de mercado, uma vez que a produção total das duas usinas chega a 1.085 megawatts (MW), o que representa 16% de toda a energia consumida na região Nordeste.

O Ceará, além de desempenharem papel importante no abastecimento de energia elétrica do País, uma vez que sua produção alimenta o Sistema Interligado Nacional (SIN), com três anos e meio de operação, as duas usinas nunca tiveram determinação de desligamento por

parte do Operador Nacional do Sistema (ONS). O grupo atua no mercado regulado e despacham a energia por um preço estipulado em contrato, que é competitivo, pois trabalham com carvão mineral, que é um dos combustíveis mais baratos do mundo, frente ao diesel ou ao gás natural. As unidades que compõem a Pecém I, como é conhecida a planta Energia Pecém, possuem capacidade total de 720 MW, enquanto que a usina Pecém II, produz 365 MW.

O complexo termelétrico cearense gera, atualmente, mais de mil empregos diretos e é resultado de investimentos da ordem de R\$ 5,3 bilhões, sendo R\$ 2,3 bilhões em Pecém II e outros R\$ 3 bilhões em Pecém I. Juntas, elas produzem 45% de toda a energia térmica produzida no Nordeste e, se forem consideradas todas as fontes de energia, este número corresponde a 13,2%. Todas as usinas operam em conformidade com as licenças emitidas pela Superintendência Estadual do Meio Ambiente do Ceará (Semace), monitorando continuamente a qualidade do ar da região e desenvolvendo programas socioambientais voltados à população.

A usina Pecém II comercializa as cinzas originárias da queima do carvão com as indústrias cimenteiras instaladas no Ceará, especialmente com a Cimento Apodi e grupo Votorantim, que também estão localizadas na região do CIPP. Em apenas seis meses de implantação do projeto, destinando as cinzas volantes de seu processo produtivo, a termelétrica já contribuiu, diretamente, para a produção de quase 80 mil toneladas de cimento. Com isso, a térmica ENEVA oferece um subproduto nobre do processo de geração energética, que otimiza a produção de cimento e contribui para a preservação ambiental.

Em setembro de 2015, as controladoras das duas usinas assinaram um convênio com a Universidade Federal do Ceará (UFC), que tem como objetivo a realização de estudos para a aplicação industrial das cinzas provenientes da queima de carvão mineral. A parceria prevê investimentos da ordem de R\$ 2,5 milhões na realização das pesquisas e a expectativa inicial é que os primeiros resultados sejam obtidos no prazo de dois anos. Como as chuvas deste ano de 2018 têm sido irregulares, as termelétricas cearenses deverão continuar em operação, no mínimo, por mais cinco anos, podendo claro esses períodos serem postergados devido a necessidade de mercado.

O governo do estado sempre reforça que em uma crise hídrica, o custo fornecimento de água para as usinas é elevado temporariamente devido a estiagem, na qual em situação mais graves podem exigir a paralização da produção até a normalização dos reservatórios e abastecimentos, pois a prioridade sempre será o abastecimento doméstico, ou seja, atender as necessidades básicas da população cearense que está situada em uma região de chuvas inconstantes, períodos chuvosos duvidosos e enfrentam secas frequentemente como a atual que já se prologa desde de 2009, do qual foi o último ano que a quadra invernososa foi satisfatória.

1.3 Questões de Pesquisa

Existem diversas questões a serem analisadas, dentre elas é possível destacar:

- A busca em caracterizar e destinar as cinzas, mediante a sua capacidade pozolânica e cimentícia, para o seu uso como material de construção, conseguindo desenvolver tijolos ecológicos e proporcionando uma maior retirada dos resíduos dos pátios das termelétricas.
- Os testes para avaliar o impacto da mistura de outros materiais junto com as cinzas, para obtenção de melhores resultados em relação as outras pesquisas, realizando a caracterização do tijolo ecológico fisicamente, quimicamente e mineralogicamente para a definição de um traço padrão com a maior quantidade de cinzas possível que gere melhores resultados de absorção de água e resistência mecânica em relação a outros trabalhos.
- Apresentar a viabilidade da aplicação dessa tecnologia para as pessoas de baixa renda e deficientes físicas em prol de produzir para seu uso pessoal, detalhando que o uso dos tijolos ecológicos reduz o preço da obra da lajota em relação as alvenarias tradicionais.

1.4 Objetivos

1.4.1 *Objetivo Geral*

Desenvolver e otimizar um traço com alta concentração de cinzas e baixa quantidade de outras adições para aplicação na fabricação de tijolos ecológicos de alta durabilidade sendo produzidos em prensa manual.

1.4.2 *Objetivos Específicos*

A investigação preza em avaliar a possibilidade do uso das cinzas volantes como uma adição ou substituição do cimento para a fabricação de tijolos ecológicos em prol da construção de habitação social. Os ensaios focam em verificar a capacidade dessas cinzas de aglutinar nos aglomerantes e agregados minerais para reduzir a quantidade de cimento utilizado na produção desse tipo de tijolo, fornecendo as características mecânicas necessárias. A base científica é otimizar o processo e produto, compatibilizando com as normas brasileiras, comparando com outros trabalhos, melhorando os resultados e contribuindo para a utilização desses resíduos na qual reduz os impactos ambientais do procedimento de produção industrial cotidiana, como também potencializando a sua implementação social.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cinzas de Carvão Mineral

Vasconcelos (2016), explica que o poder calorífico é a quantidade de energia por unidade de massa liberada na oxidação de um combustível. O poder calorífico superior é dado pela soma da energia liberada na forma de calor mais a energia da vaporização da água que se forma numa reação de oxidação, já o poder calorífico inferior é dado apenas pelo primeiro termo, a energia liberada na forma de calor. O poder calorífico inferior do carvão é de 5.500 Kcal/Kg e o poder calorífico superior são 6.000 Kcal/Kg.

Devido a esse excelente desprendimento de energia que o carvão mineral fornece, as usinas termelétricas o utilizam como a sua principal matriz energética. Após a reação de combustão, os materiais inertes continuam no sistema, não se transformando em energia, mas sofrem um tratamento térmico que os potencializam para as reações químicas com outros elementos gerando novas ligações e outras propriedades (ROHDE *et al.*, 2016).

As cinzas são um dos resultados da combustão da maioria dos materiais inflamáveis e em química analítica são classificadas como resíduos não aquosos que permanecem após queima, que consiste em metais óxidos. São um dos componentes principais de materiais biológicos, que consiste de sais inorgânicos e resíduos de biomassa (VISA, 2016).

A combustão do carvão pulverizado em altas temperaturas é condição suficiente para a fusão total ou parcial da matéria mineral. Dois tipos de cinzas são formados: a cinza pesada e a volante, sendo uma matéria-prima sólida constituída por duas frações: a orgânica e a mineral. Pela ação do calor, a fração orgânica gera voláteis e coque, enquanto a fração mineral transforma-se em cinza com mineralogia modificada, essa tendo em vista a perda de água das argilas, a decomposição dos carbonatos e a oxidação dos sulfetos, dependendo da origem e combustão do carvão as cinzas podem possuir diferentes tonalidades (CARDOSO *et al.*, 2015).

De acordo com a SINGH (2015) quando o carvão mineral é queimado em uma termelétrica parte dos resíduos são cinzas, na qual são classificadas em dois tipos:

- Cinza leve ou volante (“fly ash”): é um material particulado finamente dividido, arrastado pelos gases de combustão das fornalhas da caldeira e capturado pelos equipamentos de controle de emissões (filtros) antes que este possa chegar à chaminé. Este material é constituído principalmente por compostos de sílica, alumina, ferro e cálcio.

- Cinza pesada ou de fundo (“bottom ash”): é um material granular mais pesado, com textura mais rugosa, que é coletado no “fundo” de caldeiras das fornalhas. Este material representa cerca de 15 a 20% das cinzas produzidas numa usina termoelétrica.

As propriedades físico-químicas das cinzas volantes oriundas da combustão do carvão mineral em usinas termelétricas são influenciadas por diversos fatores, dentre eles: composição do carvão; grau de beneficiamento e moagem do carvão; tipo, projeto e operação da caldeira; sistema de extração e manuseio das cinzas volantes. Devido a estes fatores, as cinzas volantes possuem variação na sua composição e nas suas propriedades físico-químicas, não só de uma usina para outra, mas também de uma caldeira para outra dentro de uma mesma usina e até mesmo em uma determinada caldeira em tempos diferentes (BEHIN *et al.*, 2016).

A forma granulométrica que as cinzas são geradas é de suma importância, pois essas características as diferenciam em relação ao potencial pozolânico, ou seja, quanto menor as partículas, mais reativas elas serão. Quanto maior a superfície específica, maior a cinética reacional. Reatividade essa ligada com o baixo teor de carbono remanescente da combustão. Em algumas outras pesquisas utilizam-se em menor escala as cinzas pesadas. As cinzas volantes dominam o âmbito de reuso na construção civil (BANDURA *et al.*, 2016).

2.2 Características das Cinzas Volantes

Haleem (2016), detalha que a designação de volantes (“que voam”) resulta da leveza das partículas, as quais na ausência de dispositivos de filtração, seriam arrastadas pelos gases para a atmosfera como fumaça. São resíduos considerados materiais pozolânicos devido à semelhança das cinzas vulcânicas ácidas, por apresentarem capacidade de reação com a cal em presença de água, originando compostos novos com propriedades aglomerantes.

Esses resíduos de combustão do carvão mineral absorvem após calcinação uma ativação reacional, que os designa como reagente para geração de produtos com capacidade cimentícia, quando esses resíduos misturados com cal em meio aquoso. Essa reação gera aluminatos e silicatos de cálcio hidratados. Essa união entre óxidos de cálcio (cal) com óxidos de silício/alumínio (cinzas) é analogamente a principal reação do processo de fabricação de cimento (YAO *et al.*, 2015).

Com exceção das escórias e dos cimentos que já possuem óxido de cálcio na sua composição, os outros materiais precisam de adição externa de cálcio para poderem produzir reações que geram resistência mecânica. Essa adição é realizada através do uso de cal hidratada. No cimento a cal já está incorporada e somente necessita da adição de água para o início das

reações de hidratação, no caso dos materiais pozolânicos a cal tem que ser incorporada, além claro da adição de água (LIVI, 2015).

Como nas cinzas o processo térmico já ativa reacionalmente os óxidos de alumínio e silício, elas não precisam ser queimadas novamente, o que precisa é misturar com cal hidratada para gerar os silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio. Logo, esses resíduos que seriam descartados podem substituir o cimento, acarretando assim menor custo de fabricação, manutenção, vendas e poluição gerados pelas fábricas de cimentos (BUKHARI, 2015).

Lima 2014, explana que as argilas aluminosas das cinzas volantes são calcinadas na combustão do carvão mineral e as argilas aluminosas do cimento são calcinadas durante o processo de fabricação do cimento. A cal destinada para a fabricação do cimento é gerada pelo pré-processo de calcinação do calcário e não é hidratada (reação de hidratação do cimento comercial ocorre na aplicação da água pelo pedreiro no preparo do produto), e a cal para a reação pozolânica com as cinzas volantes são compradas e tem que ser hidratadas na origem ou na moldagem.

A tabela 1 mostra, em ordem percentual decrescente de importância e influência na resistência final do cimento, dentro das estequiometrias do clínquer, a distribuição dos cristais formados pela fusão de argilas aluminosas com calcário calcinado. Essa descrição e distribuição percentual químico-mineralógica é a base das resistências mecânicas dos materiais cimentícios. Outros elementos aparecem em menor escala na descrição da composição.

TABELA 1 - Principais compostos químicos do clínquer

Óxidos	Nomenclatura	Abreviação	Fórmula Molecular	(%)
CaO	Silicato Tricálcico	C ₃ S	3(CaO) · SiO ₂	70
SiO ₂	Silicato Dicálcico	C ₂ S	2(CaO) · SiO ₂	15
Al ₂ O ₃	Aluminato Tricálcico	C ₃ A	3(CaO) · Al ₂ O ₃	5
Fe ₂ O ₃	Ferroaluminato Tetracálcico	C ₄ AF	4(CaO) · Al ₂ O ₃ · Fe ₂ O ₃	8
MgO		C ₄ A ₃ S	4(CaO) · Al ₂ O ₃ · SO ₃	1
SO ₃		C ₃ S ₂ H ₃	3(CaO) · SiO ₂ · 3H ₂ O	0,5
H ₂ O		CSH ₂	CaSO ₄ · 2H ₂ O	0,5

FONTE: O próprio autor.

Se a reação pozolânica das cinzas com cal, conforme a formação dos seus cristais, geram produtos próximo a estequiometria das substâncias do cimento, esses produtos obterão capacidades cimentícias. Somente as cinzas em presença de água não gera capacidade aglomerante. Logo o traço de cinzas e cal tem que atender o custo-benefício da aplicação, proporcionando propriedades mecânicas de qualidade e satisfazendo o consumidor. Além da

mistura de cinza e cal, outras adições possam ser necessárias para obtenção de maior resistência mecânica voltada a aplicação que se deseja (TAPKIN, 2014).

Segundo a norma americana C618 (ASTM, 2015), as cinzas leves da Classe C apresentam geralmente teor de CaO maior que 20%. As pertencentes a classe F apresentam propriedades pozolânicas, mas não têm propriedades aglomerantes e hidráulicas, já as pertencentes a classe C têm propriedades pozolânicas e aglomerantes. Fatores como o teor de óxido, granulometria, superfície específica e perda ao fogo influem também na pozolanicidade das cinzas dando uma primeira ideia sobre qualidade.

A solidificação em suspensão num fluxo gasoso leva a que as partículas sejam esféricas. Os óxidos de silício e alumínio intervêm no comportamento pozolânico por serem os constituintes da fase vítrea, que é a parte ativa na mistura. A granulometria é importante porque as menores partículas correspondem as superfícies específicas maiores, que conduzem a maiores pontos de contato entre os elementos reativos. O controle da granulometria pela superfície específica é significativo quando se analisam cinzas de uma mesma termelétrica, devido as diferenças em massa específica, distribuição, morfologia e conteúdo de carbono (HEYNS, 2016).

Em vista da dificuldade de correlacionar-se a atividade pozolânica com a superfície específica é recomendado o uso da granulometria obtida por peneiramento. A granulometria adequada está por volta de 5000 a 7000 cm^2/g . O índice de atividade pozolânica revela a capacidade da combinação de cinza com aglomerantes. A diferença entre as cinzas é o teor em cálcio, sílica, alumina e ferro existente na sua composição, o qual por sua vez determina as propriedades físicas e químicas do material para as utilizações tecnológicas (JOW, 2015).

2.3 Materiais Pozolânicos

As pozolanas são materiais naturais ou artificiais que tem a capacidade de fixar a cal. Esses materiais necessitam de tratamento prévio que variam de uma simples moagem até tratamentos térmicos. Nas composições mais conhecidas, naturais e artificiais, os teores de materiais sílicos-aluminosos são elevados e, nas cinzas volantes, esses teores são mais elevados. As relações estequiométricas são produzidas pelos mecanismos reacionais que se caracterizam por cristais que além dos elementos básicos, possuem outros minerais agregados em pequenas quantidades que diferenciam cada tipo de cristal (SCRIVENER, 2015).

A *NBR 12.653:2015* estabelece os requisitos para esses materiais na qual são desejadas ações aglomerantes, além também de outras propriedades atribuídas as adições

minerais finamente divididas, classificando materiais pozolânicos em siliciosos ou sílicos-aluminosos que possuem baixa atividade aglomerante, mas na presença de água e cal reagem formando compostos com capacidade adesiva. As pozolanas naturais são materiais de origem vulcânica, geralmente de caráter petrógrafo ácido ou de origem sedimentar com atividade pozolânica, as artificiais são resultantes de processos industriais de tratamento térmico.

A norma descreve argila calcinada como materiais da calcinação de argilas submetidas a temperaturas de 900 °C, de modo a garantir sua reatividade com a cal. As cinzas volantes são descritas como materiais finamente divididos que resultam das combustões de carvão pulverizado com atividade pozolânica.

Outros materiais são classificados como pozolânicos como as escórias. A pozolanicidade gerada em materiais inertes por laboratório não as classificam como pozolanas, as características têm que estar de acordo com os requisitos.

Os materiais pozolânicos são divididos em três classes segundo *NBR 12.653:2015* - *Materiais pozolânico - requisitos*:

- ✓ Classe N: Pozolanas naturais e artificiais.
- ✓ Classe C: Cinza volante, produzida da queima de carvão mineral.
- ✓ Classe F: Qualquer pozolana que difira das classes anteriores.

A aplicabilidade dos materiais pozolânicos como adições em tecnologia do concreto é determinada pela atividade pozolânica. Nas pastas de cimento, a sílica ativa se dissolve e precipita na forma de silicatos hidratados de cálcio e a quantidade de hidróxido de cálcio diminui devido ao consumo dos íons de cálcio pela sílica adicional. São todas as reações que ocorrem entre os constituintes ativos da pozolana: sílica aluminosa, hidróxido de cálcio e água. A avaliação do progresso da reação pozolânica é mensurado pela diminuição da concentração de hidróxidos de cálcio livre (SILER, 2015).

Os fatores que influenciam a atividade pozolânica dividem-se em duas categorias: a quantidade de hidróxido de cálcio combinado e a velocidade de combinação. A quantidade de hidróxido de cálcio combinado depende da natureza e quantidade das fases ativas, da quantidade de sílica e da relação hidróxido de cálcio/pozolana na mistura. A velocidade de combinação está relacionada com a área superficial específica e a temperatura de cura (JUENGER, 2015).

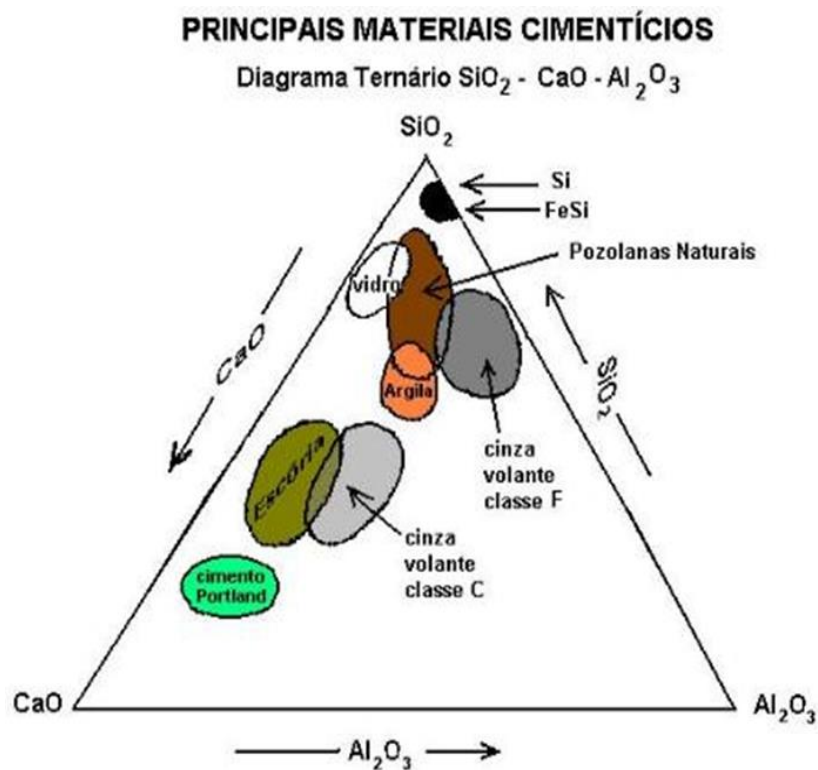
As atividades pozolânicas originam-se a partir das instabilidades termodinâmicas nos sistemas pozolanas - cales - água, tendo também as influências das composições químicas, estruturas e granulometrias. As pozolanas devem, portanto, preencher a condição de ter

tendência à reação com a cal em condições normais de ambiente e formar compostos com propriedades aglomerantes (SILVEIRA et al., 2014).

Os materiais pozolânicos apresentam teores elevados de sílica e alumina, sendo que o componente principal é a sílica ativa, sendo ela o fator principal na reatividade. A reação ocorre quando os materiais pozolânicos encontram-se em estruturas facilmente deslocáveis, como nas estruturas amorfas ou desordenadas atômica, o que explica a reatividade das cinzas volantes e argilas calcinadas. Portanto, a pozolanicidade de um material depende fundamentalmente das características químicas e estruturais das pozolanas (BELVISO, 2015).

A figura 1 mostra a distribuição da composição química das pozolanas, cinzas e cimento no diagrama ternário sílica-cálcio-alumínio em comparação com materiais cimentícios:

FIGURA 1 - Diagrama ternário dos principais materiais cimentícios



FONTE: Carvalho et al, 2014.

2.4 Os resíduos da combustão e suas diretrizes

Rohde et al. (2016), relata que as unidades termoelétricas não aplicam a correta concepção em um aterro sanitário, cuja premissa é possuir a contenção para não ocasionar danos à saúde e segurança. Estas unidades depositam o material no solo, sem impermeabilização do local, sem monitoramento ambiental e sem recobrimento diário com terra. Isto gera agressões

ao meio ambiente, logo é fundamental que as cinzas oriundas da queima de carvão sejam dispostas em aterros ou possuam um destino nobre: a reutilização em outros processos.

Conforme a *NBR 10.004:2004*, os processos industriais geram resíduos e estes podem ser classificados como:

- a) classe I – perigosos: apresentam características como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. Alteram vários parâmetros de potabilidade da água.
- b) classe II A – não perigosos e não inertes: não se enquadram em classe I e classe II B, por possuir características tênues de combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água. Em contato com água deionizada alteram pequena parte dos fatores de potabilidade.
- c) classe II B – não perigosos e inertes: em contato com água destilada ou deionizada, não possuem constituintes solubilizados a ponto de alterar parâmetros de potabilidade da água.

Os resíduos classe I são destinados a fornos que produzem clínquer, matéria prima para o cimento. Já os rejeitos classe II A e classe II B são comumente depositados em aterros. Além dos impactos ambientais gerados por esta deposição, os custos atrelados ao tratamento e posterior estocagem destes rejeitos oneram os processos industriais.

Este fato é reforçado pelo que é previsto na Lei n. 9.605 relativa aos crimes ambientais: a responsabilidade por qualquer ônus causado à natureza, gerando prejuízos à saúde humana, animais e flora é passível de pena de reclusão de um a cinco anos. Dentre estes resíduos industriais, podem-se destacar as cinzas de carvão das termelétricas (SIQUEIRA et al., 2012).

As cinzas brasileiras devem ser classificadas como resíduos classe II A - não inertes. Isto se deve ao fato das cinzas de carvão possuírem elementos químicos, características químicas e toxicológicas que podem causar danos à saúde humana e ao ambiente. Caso estas não sejam reaproveitadas, devem ser depositadas em aterros seguindo a *NBR 8419:1996*.

2.5 As idades de cura e tempo de pega

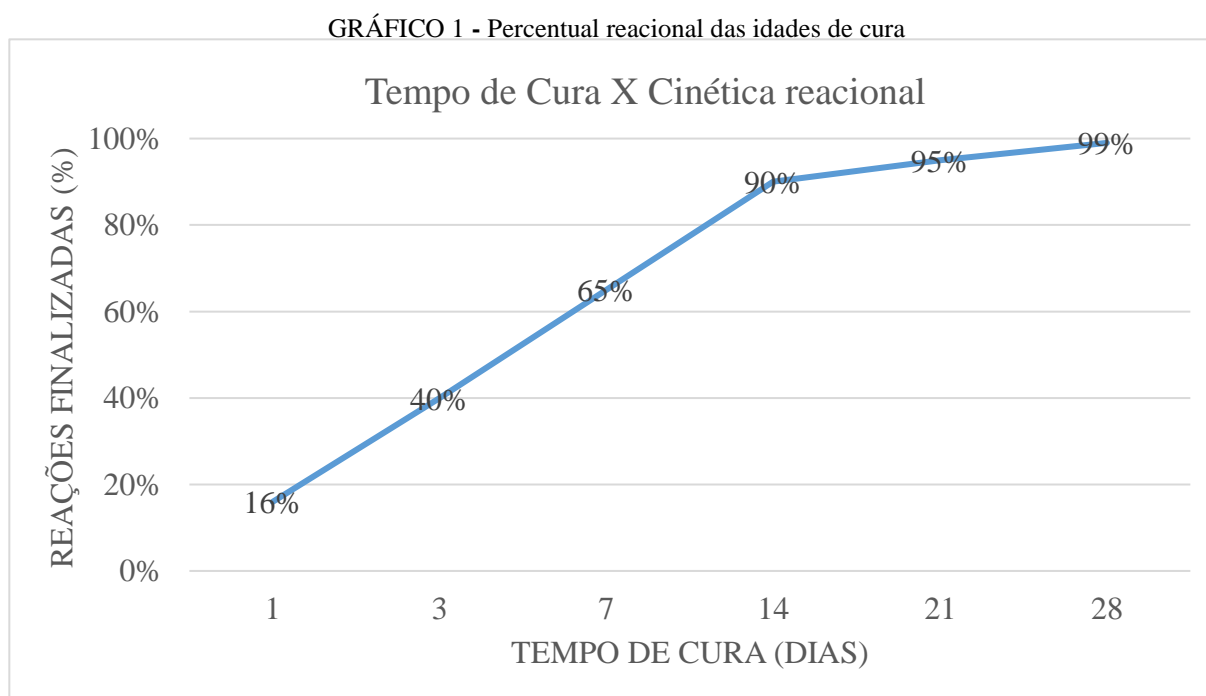
As reações de hidratação cimentícias e pozolânicas são exotérmicas e lentas, o calor de hidratação vai evaporando a água dos poros, e esses poros vão dando lugar aos silicatos e aluminatos de cálcio. Presume-se que o concreto pode ganhar a força final depois de 1 ano, e que todas suas reações, principalmente as pozolânicas, podem levar até 2 anos para concluírem (as reações pozolânicas são mais lentas, possuem um calor de hidratação mais baixo) (BARROS, 2015).

Foi normatizado pela ABNT algumas idades, que são medidas em dias, na qual a função delas são principalmente apresentar uma condição de resistência respectivamente

ligadas a quantidade de reações de hidratação já concluídas durante esses intervalos de tempo, ou seja, como as reações que geram resistência são originadas da mistura desses materiais de construção com água potável na variável tempo, as reações vão acontecendo e gerando compactação da pasta acarretando resistência mecânica e durabilidade (ZHAO et al., 2017).

O gráfico 1 representa as idades mais utilizadas para analisar a maturidade do material para uso. As idades são normatizadas também dependendo da aplicação aglomerante a ser estudada. Existem pesquisas que utilizam desde 01 a 03 dias de idade para avaliação, como também pesquisas utilizam 60, 90, 120 e as vezes até mais dias como idade de avaliação para identificar o quanto esses materiais resistem a compressão na linha do tempo.

As idades mais usualmente utilizadas são as detalhadas no gráfico 1, as que foram usadas nesta pesquisa foram as de 7, 14, 21 e 28 dias. Reforçando que para cada idade de tempo de cura existe um percentual reacional já finalizado.



FONTE: O próprio autor

O grau de moagem gera influência nas taxas cinéticas de hidratação. Ao misturar a água com cimento, a reação mais rápida é a hidratação do silicato tricálcico, isto ocorre tão rapidamente, é uma pega relâmpago, com grande liberação de calor. Quando os grãos do cimento são grandes, a hidratação demora e a pega relâmpago não ocorre, era o que ocorria com os cimentos antigos que tinham os grãos graúdos. A moagem não era intensa e os grãos eram pouco moídos. Como atualmente os grãos são finos, é necessário adicionar gesso para bloquear a pega relâmpago, retardando temporariamente o tempo de pega (WU et al., 2017).

2.6 Viabilidade dos tijolos ecológicos

O tijolo ecológico é uma inovação para o mercado da construção, contribuindo para uma construção mais sustentável, apresenta vantagens ambientais e econômicas superiores ao do produto mais utilizado hoje em dia. Como não vai ao forno, ele não tem a queima da madeira para a sua fabricação, eliminando parte do desmatamento e emissão de CO₂, o que proporciona economia de energia. O fator determinante para uma melhor qualidade depende do tipo de matéria-prima, a umidade de moldagem, tipo de prensa, proporção com outras adições e o processo de cura (SOUSA, 2016).

Existem muitos aspectos importantes a serem salientados, como a sua grande durabilidade e manutenção reduzida das edificações, pois por apresentar elevada resistência e boa impermeabilidade, as construções com ele executadas são muito duráveis, resistindo ao longo dos anos ao desgaste e à umidade. Permite um conforto térmico e acústico, pelo fato de possuir características isolantes. A economia de energia vem também da utilização de prensas manuais que dispensam o uso de energia elétrica (ALCÂNTARA, 2015).

O tijolo ecológico, além de contribuir para o meio ambiente por evitar a emissão de gases de efeito estufa, contribuirá maciçamente na economia do país, tendo em vista o reaproveitamento de matérias vegetais descartáveis, pois é um produto que é durável e resistente, além de baixo custo e alto potencial de aplicabilidade na construção civil no que se refere à construção de moradias populares (NEVES, 2017).

Os benefícios de se utilizar produtos reciclados são os retornos à aplicação, que podem ser economia de custos e a venda de materiais reciclados. A economia ocorre a queda dos gastos com os materiais que compõe a construção de uma obra, a partir do melhor aproveitamento dos materiais e da eliminação das perdas. A reutilização de materiais a se destacar são as cinzas, que pode configurar-se numa prática ambientalmente e socialmente ágil, pois contribui bastante em reduzir o volume de material descartado e a exploração dos recursos naturais preservando o meio ambiente (BRASILEIRO, 2015).

Outra característica que o tornam ecológico é a proporção de cimento incorporada à massa do tijolo, cerca de 10%, mais precisamente entre 5% a 10% de concentração. O traço com 10% de cimento possui o valor máximo usado que o identifica como tijolo ecológico. A descarga de energia fóssil consumida para a fabricação do cimento que entra em pequena porcentagem na fabricação do tijolo ecológico deve ser considerada, porém a mesma é menor que a consumida pelos tijolos convencionais utilizados na indústria da construção civil (MILANI, 2016).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Introdução

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados nesta pesquisa, bem como suas caracterizações, os métodos e os ensaios laboratoriais que foram necessários para a avaliação das misturas das cinzas e adições.

O estudo surgiu devido ao estabelecimento do Termo de Cooperação no qual a ENEVA se compromete a apoiar pesquisas realizadas na UFC, visando o reaproveitamento das cinzas devido ao acúmulo do processo de produção de eletricidade utilizando carvão das Usinas Pecém I e II. O trabalho faz parte da Linha de Pesquisa 1, na qual visa avaliar o uso na construção civil conforme ilustrado na figura 2.

FIGURA 2 – Linhas de pesquisas da UFC para reuso das cinzas da ENEVA



FONTE: Relatório semestral para Eneva, UFC.

A pesquisa realizada no presente trabalho se propõe a verificar, por meio de ensaios de laboratório, a possibilidade de reaproveitamento das cinzas para uso em tijolos ecológicos, buscando minimizar os impactos ambientais causados pelo descarte desses materiais, focando especificamente na incorporação das cinzas como matéria-prima principal para o desenvolvimento em questão.

3.1.1 Cinzas Volantes

As cinzas foram fornecidas pela ENEVA, para seu uso como material de construção no Brasil é necessário atender as classificações das:

- *NBR 12.653:2015*, na classificação dos materiais pozolânicos, a sua Classe atual é a C. A tabela 2 resume as principais exigências.
- *NBR 10.004:2004*, na classificação como resíduos industriais, a sua Classe atual é a II-A - não inertes, pois as cinzas volantes possuem elementos que causam danos à saúde humana e ao ambiente.

TABELA 2 – Requisitos para materiais com atividade pozolânica

Composto (%)	<i>NBR 12653:2015</i>
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\geq 70,0$
SO_3	$\leq 5,0$
Teor de umidade	$\leq 3,0$
Perda ao fogo	$\leq 10,0$
Álcalis disponíveis em Na_2O	$\leq 1,5$
Material retido na peneira 45 μm	$\leq 20\%$

Fonte: *NBR 12653:2015*

3.1.2 Cal Hidratada

Foi utilizada a cal hidratada calcítica da marca Hidrotintas. A preferência por uma cal calcítica deve-se ao fato dela ter maior oferta no mercado de materiais de construção a baixo custo.

A cal dolomítica é mais reativa, menos disponível no mercado e conseqüentemente possui alto custo.

A especificações técnica do fornecedor está de acordo com a norma *NBR 7175:2003 - Cal Hidratada Para Argamassas – Requisitos*, a tabela 3 especifica essas exigências.

TABELA 3 - Composição química da cal utilizada em comparação com a normatização

DETERMINAÇÕES	DADOS FORNECEDOR (%)	EXIGÊNCIAS NORMA (%)
Óxido de Cálcio	70	Soma \geq 88
Óxido de Magnésio	5	
Perda ao Fogo	20	x
Anidrido Carbônico	1,5	\leq 7
Resíduo Insolúvel	5	\leq 5

FONTE: O próprio autor.

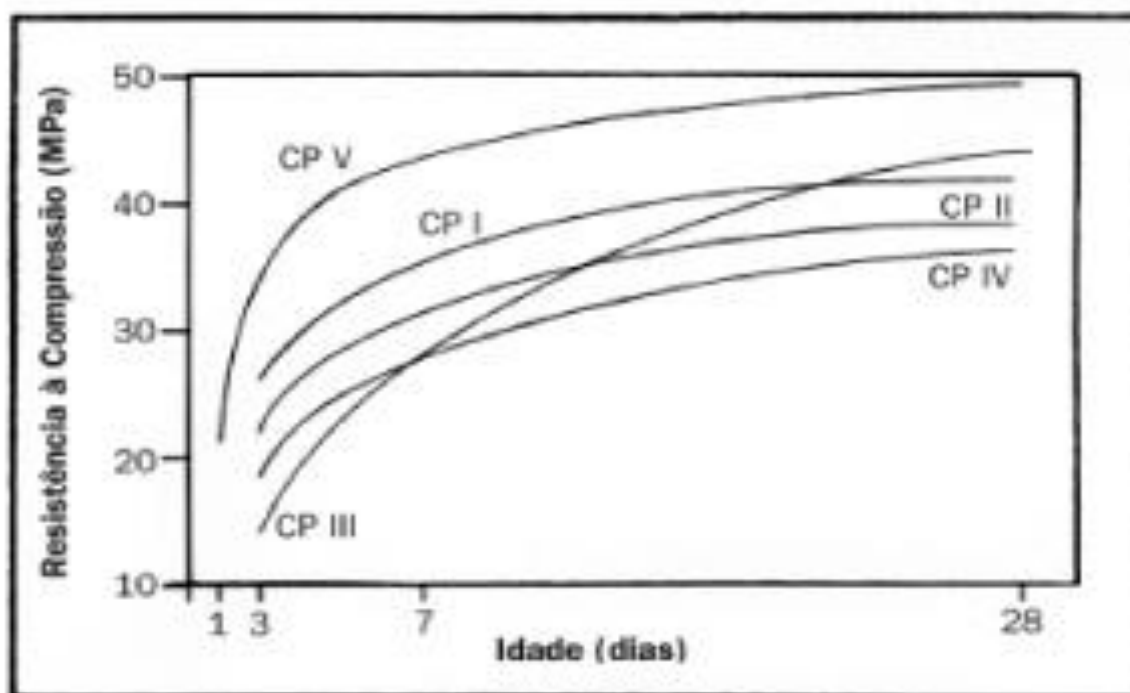
3.1.3 Cimentos

Utilizou-se dois tipos de cimento da marca Poty do grupo Votorantim, que foram:

- O CP-V não é do tipo composto, sem nenhuma adição, somente possui clínquer, gerando alta resistência inicial e final com elevado tempo de pega.
- O CPII-Z é do tipo composto, possui adições de pozolanas, possui resistência inicial e final mais baixa que o CP-V, mas é caracterizado positivamente por um tempo de pega mais baixo devido a adição de gesso e, também, é o tipo mais disponibilizado no mercado.

A figura 3, correlaciona a resistência mecânica a compressão axial com as idades em dias dos principais tipos de cimentos Portland produzidos no mundo, constando na figura os dois tipos utilizados nessa pesquisa.

FIGURA 3 – Resistência dos tipos de cimentos nas idades mais utilizadas



FONTE: O próprio autor

3.1.4 Água

Para o preparo da mistura foi utilizada água potável não filtrada comum de fornecimento público, ressaltando que os corpos de provas utilizados para os testes não foram molhados e nem submergidos. A quantidade de água necessária foi determinada pela experiência de pedreiros, 330 ml/Kg, buscando uma boa trabalhabilidade.

A importância e a relevância do fator água/cimento no traço de concreto foi descoberta há quase um século nos EUA. Na experiência final, após inúmeros ensaios em diversas composições de mistura, a relação água/cimento mostrou-se a medida mais importante. Sua influência foi notada na resistência, durabilidade e retração do concreto. Ao transformar os materiais em uma pasta, a água determina a estrutura interna (SANTIAGO et al, 2012).

O autor explica que a água é um dos principais materiais da engenharia, seja como componente ou como ferramenta. Conhecida como solvente universal, influencia diretamente na qualidade e segurança da obra, tendo tanta importância quanto o cimento no traço.

Desde 1940, quando iniciou o uso das normas ABNT, que o Brasil não tinha um texto que tratasse da qualidade da água, as empresas brasileiras seguiam determinações internacionais. O Comitê de Cimento, Concreto e Agregados tomou como base o Projeto de Norma Internacional e criou a *NBR 15900-7:2009 - Água para amassamento do concreto*.

3.1.5 Areia

No preparo dos traços foi utilizado o agregado mineral miúdo retirado de uma obra predial da construtora Jereissati de Fortaleza., respeitando a norma internacional *ASTM C144 – 17: “Standard Specification for Aggregate for Masonry Mortar”* para passante acumulado mediante análise apresentada na tabela 4.

TABELA 4 - Granulometria da areia utilizada

PENEIRAS (ABERTURA mm)	MATERIAL RETIDO (%)	TOTAL ACUMULADO (%)		
		RETIDO	PASSANTE	PASSANTE <i>ASTM C144</i>
4,75	0,10	0,10	99,90	100
2,36	4,34	4,44	95,56	95 a 100
1,18	9,71	14,15	85,85	70 a 100
0,60	23,3	37,45	62,55	40 a 75
0,30	43,3	80,75	19,25	10 a 35
0,15	18,2	98,95	1,05	2 a 15
≤ 0,15	1,05	100,00	0,00	0

FONTE: O próprio autor.

3.2 Métodos Utilizados

3.2.1 Testes de resistência a compressão em corpos de provas

Seguindo as normas abaixo foram realizados testes de resistência a compressão em corpos de prova:

- *NBR 7215:1997 Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão*
- *NBR 12.024:2012 Solo-cimento - Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos - Procedimento.*
- *NBR 12.025:2012 Solo-cimento - Ensaio de compressão em corpos de prova cilíndricos.*
- *NBR 8491:2012 Tijolo de solo-cimento – Requisitos.*

Os traços foram preparados Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFC e as análises foram realizadas no Laboratório de Materiais de Construção e seus Anexos, como também em Laboratórios parceiros: NUTEC e IFCE. Para as pesagens foi utilizado uma balança eletrônica de precisão de 3kg X 0,01g certificada pelo INMETRO da marca Marte.

Após as pesagens, os traços foram inicialmente preparados e estocados a seco em sacos plásticos, para posteriormente mistura com água nas argamassadeira. Para todos os traços da pesquisa a massa total utilizada foi de três quilos para a confecção de seis corpos de prova para cada tipo de traço estudado.

As fôrmas utilizadas para a confecção dos corpos de provas foram a de modelo para argamassas 5 cm x 10 cm. Em média foi gasto 500,00 gramas de material para cada traço da confecção de cada respectivo corpo de prova.

Para a realização da mistura do traço com água é exigido por norma o uso de argamassadeira, sendo utilizado a de um modelo da marca Solotest.

A cura foi realizada em secagem natural, os moldes foram retirados(desmoldagem) sempre dois dias após a moldagem e expostos a um ambiente reservado sem a presença de luz, calor, vento e umidade buscando ao máximo obter um ambiente propício para as reações químicas de hidratação ocorrerem eficientemente sem influências negativas de fatores externos.

Os rompimentos dos corpos de prova foram realizados em máquinas de compressão axial seguindo norma *NBR 5739:2018 Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Todos os rompimentos foram realizados em equipamentos da marca EMIC e modelos automatizados e calibrados. Reforçando que cada valor fornecido nos resultados e discussão é uma média do rompimento de 03 corpos de prova cilíndricos para cada idade estudada.

3.2.2 Teste de absorção e perda de massa

Seguindo as normas abaixo foram realizados testes de absorção e perda de massa em corpos de provas:

- *NBR 8491:2012 Tijolo de solo-cimento - Requisitos*
- *NBR 8492:2012 Tijolo de solo-cimento - Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água*
- *NBR 10.834:2013 Bloco de solo-cimento sem função estrutural – Requisitos*
- *NBR 10.836:2013 Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural - Determinação da resistência à compressão e da absorção de água.*

A aparelhagem foi a seguinte: uma balança com sensibilidade de 0,4% da massa da amostra a ser ensaiada, uma estufa elétrica capaz de manter a temperatura entre 105°C e 110°C (a utilizada foi da marca Solotest) e um tanque de imersão.

Os corpos-de-prova foram colocados em estufa a uma temperatura entre 105°C e 110°C até constância de massa, obtendo a massa seca M_1 , em gramas.

Seguidamente, foi feita a imersão dos corpos-de-prova em um tanque com água à temperatura ambiente durante 24 h obtendo massa saturada M_2 , em gramas.

O valor da absorção para cada amostra de corpo de prova foi calculado pela seguinte equação:

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

Foi feita também a análise da perda de massa devido a imersão. O corpo de prova é pesado, M_4 (antes da imersão) e seguidamente imergido em água por 24 horas.

Logo após a retirada do banho ele é secado novamente por 24 horas na estufa e posteriormente pesado, M_3 (massa após a secagem depois da imersão).

O resultado do teste de perda de massa aponta eliminação material dos corpos de prova devido a ação da umidade, ou seja, o quanto o corpo de prova ficou mais leve devido a danificação e a desagregação de massa da sua estrutura:

$$B(\%) = \frac{M_4 - M_3}{M_4} \times 100 \quad (2)$$

3.2.3 Confeção do Tijolo

O processo de confecção dos tijolos ecológicos é normatizado pela *NBR 10833:2013 - Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual*. As características físicas para o tijolo ecológico são regradas pela *NBR 10834:2013 - Bloco de solo-cimento sem função estrutural – Requisitos*, e são descritas na tabela 5

Mediante norma foram produzidos os tijolos utilizando prensa manual emprestada pela UVA Universidade Estadual do Vale do Acaraú. O equipamento foi disponibilizado por alguns meses no Anexo do Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, departamento que integra, junto com outros departamentos, o curso de graduação em Engenharia Civil.

TABELA 5 – Exigências de formas e dimensões para tijolos ecológicos

Tolerâncias Dimensionais	Largura/Altura/Comprimento		± 1 mm	
Resistência à compressão	Valores médios		≥ 2,0 MPa	
	Valores individuais		Não inferior a 1,7 MPa	
Absorção de água	Bloco		≤ 20% para valores médios	
			≤ 22% para valores individuais	
	Tijolo		≤ 20% para valores médios	
			≤ 22% para valores individuais	
Material	Tipos	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
Tijolo	A	200	100	50
	B	240	120	70
Bloco	A	300	150	150

Fonte: *NBR 10834:2013*

3.2.4 Caracterização químico-mineralógica

A análises químico-mineralógicas foram realizadas através de difração e fluorescência de raios-x respeitando a *NBR 14.656:2001 - Cimento Portland e matérias-primas - Análise química por espectrometria de raios X - Método de ensaio para caracterização*. A caracterização informa as frações quantitativa e qualitativa dos elementos nos traços, apresentando picos e fases reacionais através do software do fabricante dos equipamentos. O foco na pesquisa foi voltado nos óxidos de maiores influências nos materiais pozolânicos e cimentícios: óxidos de silício (SiO₂), alumínio (Al₂O₃), ferro (Fe₂O₃) e cálcio (CaO).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização das Amostras de Cinzas

Com a finalidade de conhecer, avaliar a variabilidade e os potenciais de atuação e a composição química das cinzas de carvão mineral da ENEVA, é preciso considerar sete caracterizações de grande relevância para o desenvolvimento de tijolos ecológicos:

1. Lixiviação.
2. Solubilização.
3. Sulfatos e Cloretos.
4. Massa Específica.
5. Granulometria.
6. Fluorescência de raios-x.
7. Difração de raios-x.

4.1.1 Estudos sobre lixiviação das cinzas

A Tabela 6 apresenta os resultados do ensaio de lixiviação nas cinzas, referente ao exigido no Anexo F da *NBR 10.004:2004*. Comparando os resultados encontrados com os parâmetros exigidos em norma, pode-se afirmar que as amostras não apresentam toxicidade, em virtude de que todos os valores estão abaixo do limite normatizado.

TABELA 6 - Ensaio de lixiviação (mg/L)

<u>Cd²⁺ (<0,5)</u>	<u>Pb²⁺ (<1,0)</u>	<u>Cr²⁺ (<5,0)</u>	<u>Ag (<5,0)</u>
0,042	0,83	0,04	0,32
0,047	0,82	0,04	0,32
0,053	0,74	0,04	0,32
0,055	0,81	0,04	0,32

FONTE: Relatório semestral para Eneva, UFC.

A exigência da concentração máxima de determinados elementos é extensa, sendo inviável listar todos na tabela. Todas as concentrações do ensaio de lixiviação estão abaixo do máximo estabelecido pelo anexo F da norma, desta forma, os resíduos não se classificam como perigosos.

4.1.2 Solubilização das cinzas

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos no ensaio de solubilização das cinzas, alguns valores ultrapassaram o limite estabelecido pela norma, desta forma, o material classifica-se como resíduo não perigoso e não inerte, Classe II-A, de acordo com a NBR 10.004:2004.

TABELA 7 - Ensaio de solubilização (mg/L)

<u>Cd²⁺</u> (<u><0,005</u>)	<u>Pb²⁺</u> (<u><0,01</u>)	<u>Ag</u> (<u><0,05</u>)	<u>F⁻</u> (<u><1,5</u>)	<u>Cl⁻</u> (<u><250</u>)	<u>NO₃⁻</u> (<u><10,0</u>)	<u>SO₄²⁻</u> (<u><250</u>)
0,062	0,89	0,32	3,37	70,05	10,25	187,41

FONTE: Relatório semestral para Eneva, UFC.

4.1.3 Presença de sulfatos e cloretos nas cinzas

A tabelas 8 e 9 apresentam a concentração máxima admissível de sulfatos e cloretos na solução de poros e a concentração obtida nos ensaios realizados regidos pela norma NBR NM 137:1997.

TABELA 8 - Concentração de Cl⁻ e SO₄²⁻ máxima admissível

<u>Requisito</u>	<u>Limites (mg/L)</u>
Sulfatos (expresso em SO ₄ ²⁻)	2000
Cloretos (Cl ⁻) – Concreto simples	2000
Cloretos (Cl ⁻) – Concreto armado	700
Cloretos (Cl ⁻) – Concreto protendido	500

FONTE: Relatório semestral para Eneva, UFC.

TABELA 9 - Concentração de Cl⁻ e SO₄²⁻ presentes nas argamassas

Concentração de Cl ⁻ (mg/L)	Concentração de SO ₄ ²⁻ (mg/L)
700	1100
700	1300
600	900
600	1000

FONTE: Relatório semestral para Eneva, UFC.

Comparando os valores encontrados nas tabelas 8 e 9, é nítido considerar que as amostras de cinzas de carvão mineral são adequadas para o uso. As concentrações estão próximas dos limites estabelecidos, sendo necessário um controle para averiguar esses cloretos nas cinzas e manter a sua usabilidade.

4.1.4 *Massa específica das cinzas*

Três amostras foram coletadas em diferentes pontos do pátio de estoque de cinzas da ENEVA e nelas realizadas a análise de massa específica e também de granulometria. Os resultados das massas específicas estão exibidos na tabela 10 e granulometria no gráfico 2.

O ensaio foi realizado seguindo o método proposto pela *NBR 16605:2017 - Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica, utilizando o picnômetro de Le Chatelier*.

De acordo com os resultados, pode-se perceber que as amostras não diferem entre si mais do que $0,01 \text{ g/cm}^3$. Esses valores são, portanto, muito próximos entre si, mostrando que as cinzas são mais leves de que as partículas de cimento, que tem valor de massa específica em torno de $3,00 \text{ g/cm}^3$ conforme fabricante.

TABELA 10 - Análises de massa específica das cinzas

Amostras	Massa Específica (g/cm^3)
A	2,381
B	2,368
C	2,376

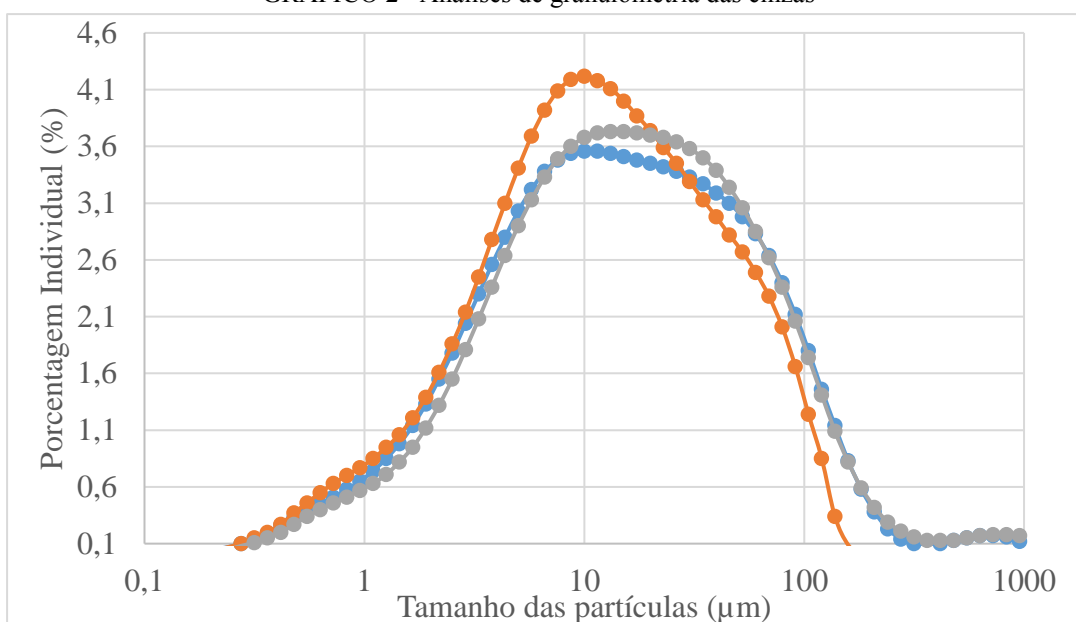
FONTE: Relatório semestral para Eneva, UFC.

4.1.5 *Granulometria das cinzas*

Em relação ao ensaio de perfil granulométrico, que foi realizado por equipamento de granulometria a laser, a percepção é que as curvas granulométricas das amostras foram bem similares possuindo boa diversidade e distribuição, tanto em relação ao tamanho das partículas, quanto em relação às suas porcentagens individuais.

É possível verificar que o tamanho das partículas de cinza varia entre $0,1 \mu\text{m}$ e $1000 \mu\text{m}$, mais precisamente a sua maioria estar entre 1 e 100 micras, como comprovado no gráfico 2, que é a faixa de trabalho mais comum para gerar eficiências nas reações, logo proporcionando uma superfície específica coerente acarretando uma considerável e relevante cinética reacional.

GRÁFICO 2 - Análises de granulometria das cinzas



FONTE: Relatório semestral para Eneva, UFC.

4.1.6 Fluorescência das cinzas

A Tabela 11 e 12 detalham que os resultados de fluorescência das cinzas atendem a *NBR 12653:2015*, que rege os requisitos para um material ser pozolânico e de classe C (classe de materiais que mais se aproximam dos materiais cimentícios de acordo com o diagrama ternário da figura 01).

TABELA 11 - Óxidos e requisitos físicos e químicos para cinzas na construção civil

DETERMINAÇÕES	FLUORESCÊNCIA (%)	<i>NBR 12653:2015</i> (%)
Óxido de Silício	41,46	Soma $\geq 70\%$
Óxido de Alumínio	19,51	
Óxido de Ferro	17,27	
Óxido de Magnésio	1,51	
Óxido de Cálcio	6,66	
Óxido de Sódio	0,23	$\leq 1,5$
Óxido de Enxofre	1,64	$\leq 3,0$
Carbono Livre	0,76	
Perda ao Fogo	1,50	$\leq 6,0$
pH a 25°C	8,88	
Retido Acumulado #30	0	$\leq 2,0$
Retido Acumulado #200	12	≤ 30
Retido Acumulado #325	26,7	≤ 34

Fonte: O próprio autor

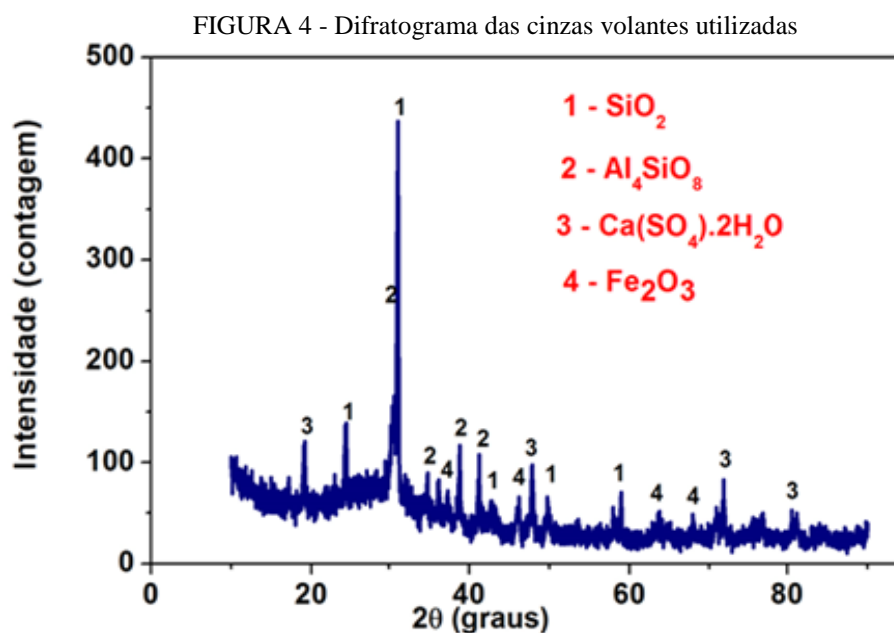
TABELA 12 - Requisitos químicos e físicos para um material ser pozolânico

PROPRIEDADES (ÓXIDOS)	CLASSE DE MATERIAL POZOLANICO (%)		
	N	C	E
SÍLICA + ALUMÍNIO + FERRO	≥ 70	≥ 70	≥ 50
ENXOFRE	≤ 4	≤ 5	≤ 5
UMIDADE	≤ 3	≤ 3	≤ 3
PERDA AO FOGO	≤ 10	≤ 6	≤ 6
ÁLCALIS	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$

Fonte: O próprio autor

4.1.7 Difração das cinzas

A figura 4 ilustra um difratograma de raios-X dos produtos da combustão do carvão mineral da termelétrica ENEVA. Analisando o difratograma observa-se o quartzo (SiO_2) como fase mineralógica principal, bem como se identifica a presença de outras fases como: mulita (Al_4SiO_8), sulfato de cálcio hidratado/gipsita ($\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e hematita (Fe_2O_3).



FONTE: Teixeira, et. al., 2015.

Algumas fases identificadas estão relacionadas à temperatura utilizada durante a combustão do carvão mineral, sendo que para processos em que as temperaturas são inferiores a $1000\text{ }^\circ\text{C}$ algumas fases cristalinas ou amorfas presentes originalmente no carvão mineral se mantêm durante todo o processo, uma vez que estas temperaturas não são suficientes para destruir essas estruturas, como por exemplo o quartzo e a hematita. Já a mulita e sulfato de

cálcio hidratado, por sua vez, são decorrentes das reações que ocorrem durante a combustão do carvão mineral.

As análises das cinzas possibilitaram a obtenção de dados das suas características químicas e mineralógicas. As análises permitiram concluir que as cinzas são constituídas basicamente por mulita, um composto cerâmico que possui propriedades físicas tais como resistência à altas temperaturas, estabilidade química, baixa constante dielétrica e baixo coeficiente de expansão, viabilizando a utilização como matéria-prima para a construção civil.

4.2 Tijolo ecológico

A resistência à compressão é normalmente tomada como a propriedade mais importante na determinação da qualidade dos materiais, sendo válida também para as alvenarias. O tijolo é o maior responsável pela resistência da alvenaria, contribuindo especialmente com a sua resistência individual e capacidade de absorção inicial. As análises de resistência podem ser realizadas utilizando ensaios em paredes, esta é a maneira mais precisa de avaliar a resistência, já que os corpos de prova são feitos em diferentes escalas e geometrias.

Os ensaios em paredes não foram realizados por apresentarem custo elevado, maior dificuldade de execução e fugirem ao escopo desta pesquisa, ou seja, o foco foi a mensuração dentro das moldagens dos corpos de prova. Foram realizados ensaios confeccionando corpos de prova e tijolos com diferentes proporções de misturas de cinzas com areias, cales e cimentos.

A ideia é que sempre se utilize o máximo possível de cinzas, dentro das condições de resistência mecânica. O mínimo de cinzas nos traços para a obtenção de uma viabilidade técnica, social, econômica e principalmente ecológica nos tijolos desenvolvidos deve ser pelo menos em 50%. Somente com o uso de cinzas na confecção dos tijolos não acarretara atividade pozolânica devido à ausência da cal.

O intuito da pesquisa é utilizar o máximo de cinzas dentro da proporcionalidade da reação com a cal e com outras adições que gerem melhor custo benefício. A tabela 13 mostra a normatização via *NBR 15270-1:2017 - Tijolo maciço cerâmico para alvenaria*, que rege a classificação dos tijolos referente a resistência mínima em relação à categoria:

TABELA 13 - Categoria dos tijolos em relação a resistência

CATEGORIA	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (MPa)
A	1,50
B	2,50
C	4,00

FONTE: *NBR 15270-1:2*

Na pesquisa de Presa (2011), foi somente utilizado para todo o trabalho desenvolvido um único traço estudado. Traço esse que foi de 8:1 na relação solo/cimento, ou seja, utilizando 90% de solo e 10% de cimento, caracterizando o tijolo solo-cimento como ecológico. O pesquisador fez os seus testes de resistências somente com corpos de prova. Os resultados alcançados da tabela 14, ficaram caracterizados em tijolos de classe A conforme tabela 13.

TABELA 14 - Rompimento em corpos de prova de solo-cimento

Resistência (Mpa)	
7 DIAS	28 DIAS
0,75	2,04
1,18	1,74
0,88	1,77
1,01	2,26
1,57	2,91
1,69	2,49
Média: 1,18	Média:2,20

FONTE: De Presa, 2011.

No trabalho de Ferraz, et. al., (2011), a sua inovação foi misturar pedregulhos de construção na fabricação de tijolos de solo-cimento em função da possibilidade de se melhorar as características mecânicas para o tornar ecológico. As características físicas dos resíduos de argamassa e concreto assemelham às dos pedregulhos de resíduos de construção. O autor realizou testes com idades avançadas que geraram boas resistências em relação aos estudos que em comum focam no máximo em 28 dias de tempo de cura, todos os resultados estão disponíveis na tabela 15.

TABELA 15 - Rompimento de amostras de solo-cimento com e sem adição de resíduos

Resistência à compressão (MPa)				
Traço	07 dias	28 dias	56 dias	120 dias
Solo + 6% cimento	2,84	3,52	4,15	4,80
Solo + 8% cimento	3,25	4,73	5,17	6,26
Solo + 10% cimento	3,45	5,42	6,00	7,27
Solo + 6% cimento + 20% resíduo	3,50	5,68	6,16	6,92
Solo + 8% cimento + 20% resíduo	3,60	6,70	7,14	7,69
Solo + 10% cimento + 20% resíduo	3,82	7,42	8,05	8,37
Solo + 6% cimento + 40% resíduo	3,67	6,45	7,05	7,55
Solo + 8% cimento + 40% resíduo	3,85	7,91	8,59	9,25
Solo + 10% cimento + 40% resíduo	4,36	8,53	9,18	9,75

FONTE: Ferraz, et. al., 2011.

Andrade (1991), apresenta uma base de dados de cruzamento entre cinzas e cal, apresentando comportamentos dependentes do tipo de traço utilizado. A autora conseguiu, dependendo do traço, excelentes valores em 28 e em até 60 dias de tempo de cura. Cabe a pesquisa passar ou não de 28 dias de idade, quanto mais velha a mistura, mais precisa será os valores de resistência.

TABELA 16 - Rompimento de corpos de prova com variação de traços cinzas x cal

<i>Resistência à compressão (MPa)</i>					
<i>Traços</i>	<i>CINZAS X CAL</i> (%)	<i>IDADES DE CURA</i>			
		<i>7</i>	<i>14</i>	<i>28</i>	<i>60</i>
T1	95 x 05	1,42	2,35	2,98	3,79
T2	90 x 10	1,67	2,95	6,30	7,11
T3	85 x 15	2,48	4,34	6,90	10,20
T4	80 x 20	2,93	4,77	7,54	11,13
T5	75 x 25	3,06	5,01	7,44	11,98
T6	65 x 35	3,41	6,05	8,31	11,37
T7	55 x 45	3,13	6,32	9,00	11,90

FONTE: De Andrade, 1991.

O trabalho científico apontou para um esforço de encontrar uma relação de otimização entre 50 a 100% de utilização de cinzas sendo completadas com cal. A tabela 16 apresenta que para um mesmo traço os valores não são lineares no envelhecimento das idades. Como exemplo o traço T5, que perde em 28 dias para outros traços, mas vence todos no resultado de resistência com 60 dias de cura.

4.2.1 Influência da concentração de cinzas

Os resultados dos ensaios de resistência a compressão axial foram obtidos a partir do rompimento de corpos de prova dos modelos para argamassas. É de suma importância salientar que o mesmo traço que confecciona o corpo de prova é o mesmo traço utilizado para o tijolo ecológico, mas a geometria do tijolo favorece uma queda de resistência pela medição dos equipamentos.

Após a definição do traço otimizado de trabalho e das suas características mecânicas, passa-se a aplicar a fabricação dos tijolos ecológicos em prensa manual. O tijolo ecológico é vazado, ou seja, possui geometria diferente do corpo de prova que é preenchido em todo seu volume. Teoricamente os dois modelos (corpo de prova e tijolo) deveriam possuir

mesmos valores de resistências, pois são materiais desenvolvidos com o mesmo traço, processamento e cura.

A ideia de otimização para um traço, é que esse alcance maior resistência mecânica do que os traços citados na literatura, principalmente em relação aos do item 4.2. Os traços foram divididos percentualmente entre as *cinzas volantes(leves) e: cimento, cal, areia e gesso*. Todas essas matérias-primas são classificadas como materiais de construção.

O cimento utilizado inicialmente foi o CP-V que não possui gesso na sua composição. O gesso tem a função somente de retardar o tempo de pega, ou seja, o tempo de endurecimento da pasta mediante a cinética reacional das reações de hidratação nos materiais cimentícios e pozolânicos. Além disso o gesso permite uma maior capacidade de absorção de pequenas deformações.

Os ensaios foram realizados variando em 50%, 60% e 70% a composição de cinzas volantes. A utilização de no mínimo a metade do traço com cinzas, e no máximo o que se conseguir de concentração de cinzas na relação quantidade de cinzas x resistência mecânica é uma das premissas principais da pesquisa. Quanto maior a concentração de cinzas no tijolo a se desenvolver, maior a retirada desse resíduo dos pátios das termelétricas.

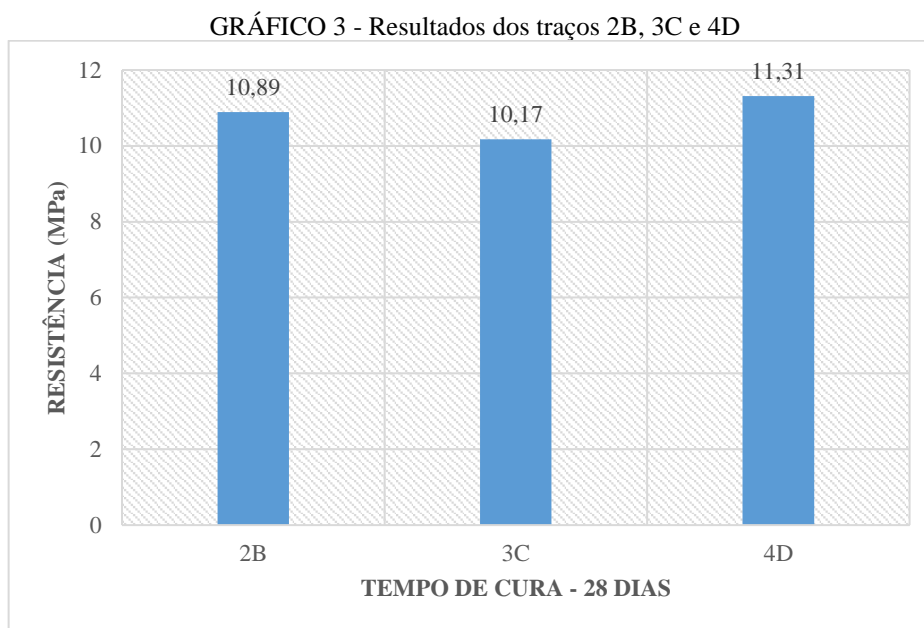
Iniciou-se o estudo com três traços para 28 dias, nomeados de 2B, 3C e 4D. Cada traço com respectivamente 50%, 60% e 70% de cinzas e 5% de cimento para todos. Para o tijolo ser ecológico o limite mínimo são 5% de cimento e no máximo 10% de cimento.

Abaixo de 5% de cimento considera-se somente um material tratado com cimento e acima de 10% se perde a viabilidade ecológica e financeira do tijolo. Em relação aos outros materiais de construção (gesso, areia e cal), a incorporação foi dosada referente a quantidade de sobra percentual disponível para a aplicação de cada um deles. A composição dos traços da na tabela 17, e os resultados respectivos no gráfico 3.

TABELA 17 - Traços iniciais da pesquisa

TEMPO DE CURA: 28 DIAS			
MATERIAIS	PERCENTUAL DOS TRAÇOS (%)		
	2B	3C	4D
CINZAS	50	60	70
AREIA de OBRA	25	20	15
CAL	15	10	8
CIMENTO	5	5	5
GESSO	5	5	2

FONTE: O próprio autor.



FONTE: O próprio autor.

Os resultados foram satisfatórios nas três incorporações. Em todos os traços os valores foram acima de 10 Mpa, resultado que supera os trabalhos do item 4.2. O estudo poderia ser finalizado nessas condições e se dar por vencido, mas a missão é a realização de tentativas para a obtenção de ápices de otimizações de resistências a baixo custo e praticidade para garantir a qualidade e durabilidade do tijolo que se quer desenvolver.

Os resultados apresentaram uma tendência que a melhor configuração em relação a resistência mecânica é o uso de traços com 70% de utilização de cinzas, através do traço 4D. Bom resultado devido ao enquadramento no objetivo de redução do custo mediante a um cenário que as cinzas volantes sempre serão fornecidas de forma gratuita, onerando o desenvolvimento somente nos custos de frete.

4.2.2 Minimização de constituintes

Foram testados na mesma sequência do item 4.2.1, traços com o uso de cinzas volantes entre 50 a 70%, eliminado o gesso e o cimento para facilitar a mistura e reduzir custos. Utilizando e variando nessa segunda etapa somente a quantidade de areia e cal junto com as cinzas.

Areia e cal são matérias-primas necessárias para a obtenção de um material de forte pega e possuem um custo menor em relação ao gesso e principalmente o cimento. A divisão dos novos traços, nomeados de 5E, 6F e 7G, encontram-se na tabela 18 e os resultados no gráfico 4.

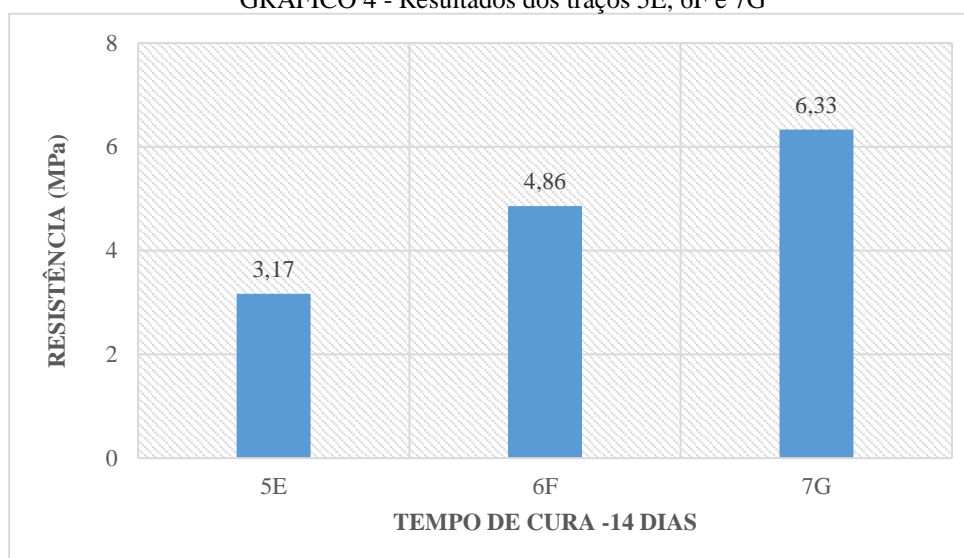
O foco da etapa corrente é solidificar a tendência observada no item 4.2.1, de poder trabalhar com 70% de cinzas e reduzir qualitativamente e quantitativamente as outras adições, por isso a idade analisada foi somente as de 14 dias, idade que 90% das reações de hidratação já ocorreram. A facilidade de trabalhar com uma definição do percentual de cinzas, e ir somente variando as outras adições, é de considerável importância para uma pesquisa mais concentrada e organizada.

TABELA 18 - Traços da segunda etapa para rompimento para 7 e 14 dias

<i>MATERIAL</i>	<i>TRAÇOS PARA 7 E 14 DIAS (%)</i>		
	<i>5E</i>	<i>6F</i>	<i>7G</i>
CINZAS VOLANTES	50	60	70
CAL HIDRATADA	25	20	15
AREIA de OBRA	25	20	15

FONTE: O próprio autor.

GRÁFICO 4 - Resultados dos traços 5E, 6F e 7G



FONTE: O próprio autor.

Apresentados no gráfico 04, os resultados dos traços 5E e 6F seguiram a tendência dos trabalhos já realizados com as Cinzas-Cal, tabela 16, não alcançando maiores resistências e inviabilizando a continuação dos testes para as idades de 21 e 28 dias.

A perspectiva dos resultados desse teste para 28 dias é que os traços 5E e 6F não ultrapassem a barreira dos 9 Mpa. Barreira essa provavelmente ultrapassada somente com 60 dias analogamente a tabela 16.

O traço 7G teve um comportamento diferente, apresentou como a melhor opção quando não tem no sistema na incorporação o gesso e o cimento. O 7G obteve resistência a 14 dias mais elevada que todos os resultados do trabalho de De Andrade (1991), tabela 16. Esta

etapa trouxe que a adição de 70% de cinzas como a melhor relação cinzas/resistência. Em 14 dias o 7G aponta que ultrapassará os 9 Mpa em 28 dias.

Como o traço 4D, da primeira bateria de testes do item 4.2.1, apresentou em 28 dias uma média acima de 11 Mpa, o melhor resultado até o momento, a pesquisa se voltou a um a encontrar um traço que vença o traço 4D e alcance valores acima de 12 Mpa.

Por lógica e pela definição de tijolo ecológico, o uso de cimento entre 5 a 10% é necessário para que novos traços tragam uma resistência além das até aqui alcançadas, na qual nesse teste da segunda etapa foi eliminado temporariamente, mas a retirada diminui a resistência. O cimento realiza a amarração global dos aglomerantes e agregados minerais, proporcionando mais resistência mecânica a compressão axial.

4.2.3 Influência do Cimento

Revedo os resultados dos itens anteriores, ocorre uma afirmação e confirmação pelos testes que o uso ideal de cinzas nesta pesquisa em quaisquer configurações de mistura é de 70%.

Adições maiores que 70% de cinza tendem a gerar uma queda de resistência, perda de absorção, retenção e trabalhabilidade. A faixa ideal de trabalho em geral para tijolos ecológicos é de 55 a 75%, isto é, depende de diversas variáveis envolvidas como origens, equipamentos e até a ação humana no processamento.

Para chegar a resistências maiores do que a do traço 4D (11,31 Mpa) em 28 dias, item 4.2.1, foi eliminado o percentual de gesso do traço e aplicado um novo tipo de cimento com uma concentração maior, limitado a 10%.

Troca essa de cimento devida ao raciocínio de colocar mais cimento no traço, que esse cimento tenha gesso na sua composição (CP-V não possui gesso) e que também esse cimento seja de fácil encontro no mercado, na qual o cimento CP II-Z atende esses requisitos.

A partir daí, em relação aos demais materiais, do traço 4D foi retirado 2% do gesso (reduzindo mão de obra e custo) e alterando o teor de cal hidratada para 10%.

Foi reduzido a quantidade de Areia de Obra para 10%, aplicando essa sobra percentual ao cimento que ficou em 10% (limite máximo para um tijolo dito ecológico). Traço esse definido quantitativamente na tabela 19. Partindo do 4D foi desenvolvido o traço 8H para novos testes.

TABELA 19 - Traço de trabalho para desenvolvimento dos tijolos

<i>TRAÇO 8H</i>	
<i>Materiais</i>	<i>Quantidade</i>
Cinzas	70%
Areia	10%
Cal Hidratada	10%
Cimento	10%

FONTE: O próprio autor.

Os resultados dos rompimentos do traço 8H foram os mais satisfatórios dentre todos os anteriores, inclusive em relação ao traço 4D conforme tabela 20 e gráfico 5. Resultados melhores principalmente em 28 dias de idade, da qual na primeira batelada, além de vencer a barreira dos 12 Mpa, ultrapassou 13 Mpa.

TABELA 20 - Detalhe dos resultados do traço 8H

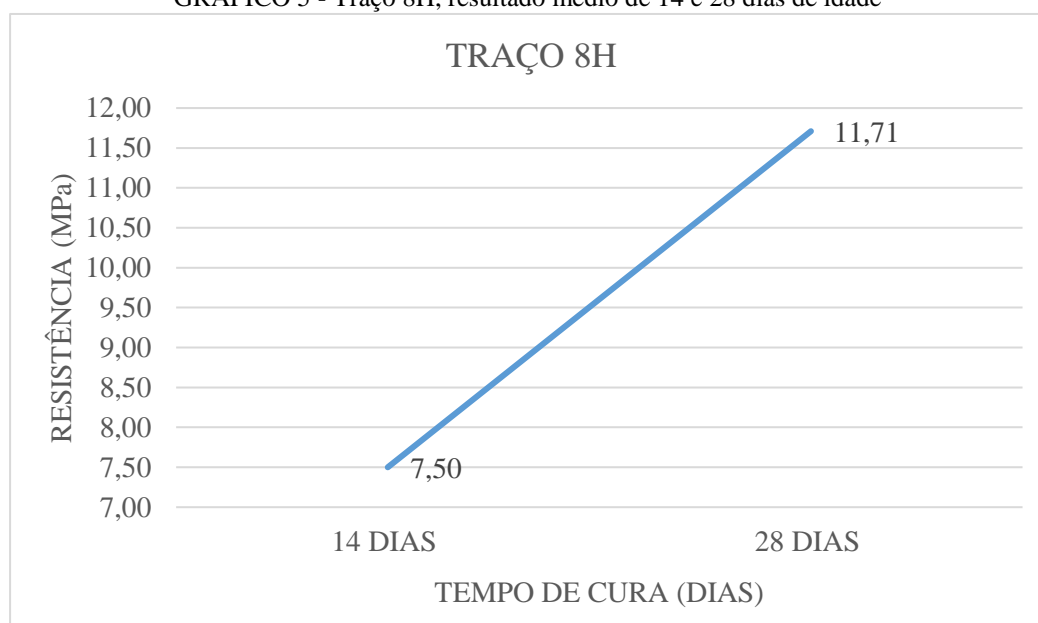
<i>TRAÇO 8H</i>			
<i>RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL (MPa)</i>			
IDADES	BATELADA 1	BATELADA 2	BATELADA 3
7 DIAS	4,59	Não realizado	Não realizado
14 DIAS	7,97	7,00	7,50
21 DIAS	10,14	Não realizado	Não realizado
28 DIAS	13,13	10,50	11,50

FONTE: O próprio autor.

O aumento de resistência mecânica foi obtido pela experiência adquirida com o desenvolvimento e estudo dos traços 4D e 7G e com a criação do traço 8H, devido a redistribuição dos percentuais de concentração das adições, e principalmente com o aumento da concentração de cimento.

Mediante os resultados do traço 8H e a necessidade de definição de um traço padrão otimizado para um trabalho de pesquisa mais focado, a composição do traço para o desenvolvimento do tijolo foi homologada através dos resultados. Para as três bateladas da tabela 20, os valores médios foram excelentes e bem acima dos trabalhos citados no item 4.2, como exposto no gráfico 5.

GRÁFICO 5 - Traço 8H, resultado médio de 14 e 28 dias de idade



FONTE: O próprio autor.

O traço 8H apontou uma resistência média acima da maior antes encontrada, que foi a do traço 4D. Traço esse teve 5% de cimento na composição. No caso do traço 8H foi incorporado 10% de cimento.

O gráfico 5 divulga uma tendência média linear entre as idades estudadas. O rompimento em idades mais avançada seria bem melhor com valores mais altos, mas 28 dias é a idade mais usual e tem boa representatividade devido a 99% das reações de hidratação já terem ocorrido.

A adição de cimento na quantidade certa em relação custo/benefício traz viabilidade na confecção e uso dos tijolos.

O ganho principal é a obtenção de resistências bem acima das tradicionais a baixo custo, e também um tempo maior de vida útil com o encontro de uma composição firme, enrijecida, endurecida, adesiva, aglomerante e principalmente resistente.

O traço 8H mostra suas resistências bem acima das divulgadas nos testes anteriores, obtendo mais resistências em menos tempo de cura.

Com a configuração definida e validada os tijolos foram confeccionados através de prensa manual ilustrada na figura 5. A figura 6 retrata uma unidade do tijolo desenvolvido com o traço 8H, exibindo um excelente aspecto visual e estrutural.

FIGURA 5 - Prensa manual utilizada



FONTE: O próprio autor.

FIGURA 6 - Tijolo ecológico desenvolvido com o traço otimizado 8H



FONTE: O próprio autor.

4.2.4 Testes de absorção e durabilidade em água.

Foram realizados os testes de absorção de água e de perda de massa com o traço 8H, conforme metodologia informada no Capítulo 3 para as idades de 14 e 28 dias. Os resultados são descritos na tabela 21.

TABELA 21 - Resultado dos testes de absorção e perda de massa para o traço 8H

<i>IDADE: 14 DIAS</i>					
AMOSTRA	ANTES DA IMERSÃO	APÓS IMERSÃO	APÓS SECAGEM	ABSORÇÃO (%)	PERDA DE MASSA (%)
A.14	0,160	0,166	0,125	3,75	21,88
B.14	0,166	0,173	0,135	4,22	18,67
C.14	0,156	0,163	0,128	4,49	17,95
<i>IDADE: 28 DIAS</i>					
AMOSTRA	ANTES DA IMERSÃO	APÓS A IMERSÃO	APÓS SECAGEM	ABSORÇÃO (%)	PERDA DE MASSA (%)
A.28	0,294	0,342	0,271	16,33	7,82
B.28	0,285	0,335	0,268	17,54	5,96
C.28	0,289	0,338	0,270	16,96	6,57

FONTE: O próprio autor.

Os resultados de 28 dias idade, que é padrão de comparação entre trabalhos, atendem o limite de 20% de para absorção de água, conforme tabela 5. Nos trabalhos De Presa (2011) e De Ferraz (2011) descritos no item 4.2, os resultados foram por volta de 17% de absorção atendendo também a normatização imposta da tabela 5.

Em relação ao teste de perda de massa, não existe uma base científica comparativa pois foi desenvolvido in loco para saber o quanto a durabilidade é afetada no material imergido em 100% de umidade por 24 horas.

4.2.5 Análises de traço sem cinzas e com excesso de areia

Uma composição inversa foi analisada com baixos índices de materiais cimentantes e alto percentual de agregado miúdo inerte, a areia de obra. O objetivo foi a verificação da ocorrência de alguma reação química ou atração física que gerasse alguma resistência, a tabela 22 detalha o rateio do respectivo traço, nomeado de 9H. Não ocorreu nenhuma influência de nenhum material em relação a resistência ao rompimento, os corpos de prova não resistiram a desmoldagem como ilustrado na figura 7.

TABELA 22 - Traço 9I

<i>TRAÇO 9I</i>	
<i>Materiais</i>	<i>Quantidade</i>
Areia	80%
Cal Hidratada	10%
Cimento	10%

FONTE: O próprio autor.

FIGURA 7 - Corpos de prova feito com traços da tabela 22



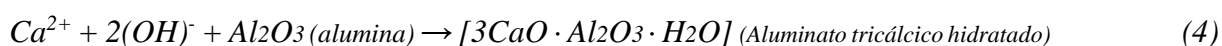
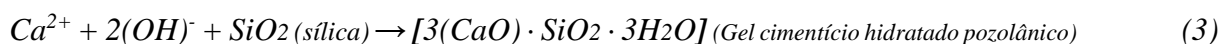
FONTE: O próprio autor.

4.2.6 Mecanismos reacionais pozolânicos e a influência da adição de cimento

A adição de cimento e a sua respectiva reação de hidratação geram cal hidratada na pasta. Para uma mistura de cinzas com cimento, que além da ação principal da adição do cimento, ocorre a formação de cal hidratada pela hidrólise do cimento, cal essa que reagirá com os argilominerais das cinzas. Com mais a adição cal hidratada comercial nessa pasta, conseqüentemente a mistura acarreta um maior potencial de energia para a reação pozolânica entre os hidróxidos de cálcio e argilominerais das cinzas, proporcionando um tijolo mais resistente (HOLANDA, 2015)

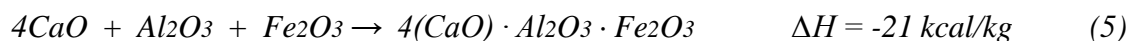
A adição de cimento aumenta a rigidez do traço a partir da interação elétrica entre as partículas das cinzas com o cimento. O aumento das resistências é explicada pela textura gerada do intercrescimento cristalinos dos hidratados de cimento ao redor das partículas das cinzas. Nas primeiras idades, as menores resistências da mistura cimentos-cinza são atribuídas a presença de poros anelares, com uma fina película de água, uniformemente distribuída na superfície dos grãos. As maiores resistências, nas idades mais tardias, são relacionadas a intensidade de corrosão da fase vítrea e ao crescimento cristalino nas superfícies das partículas envolvidas no traço (SENA, 2015).

- Reação entre a cal hidratada e os argilominerais das cinzas (Reação Pozolânica):



A Reação Pozolânica acontece na seguinte ordem:

1º) Todo Fe_2O_3 presente no meio e parte do Al_2O_3 reagem com CaO , segundo a reação:



2º) Todo o Al_2O_3 restante da primeira etapa reage com o CaO , segundo a reação:



3º) Todo o SiO_2 do meio reage com o CaO , segundo a reação:



4º) A reação na terceira etapa continua, segundo a reação:



As reações que ocorrem entre a cal e as cinzas são complexas. A reação crítica é entre o hidróxido de cálcio e os minerais de alumínio/sílica presentes nas cinzas, produzindo silicatos/aluminatos. São reações que possuem as mesmas características das reações de hidratação de um tijolo feito somente de cimento. É uma forma de obter um produto similar a baixo custo com as características de resistência e principalmente de durabilidade (RAFIEIZONOOZ, 2016).

As quatro etapas da reação resultam em um específico composto base do clínquer. Todas as reações geram produtos mineralogicamente resistentes a compressão, cada um em sua quantidade e influência conforme tabela 1. Estudos realizados indicam que o material cimentante principal formado na reação é o silicato de cálcio hidratado, seguido do aluminato tricálcico hidratado (PAULA, 2016).

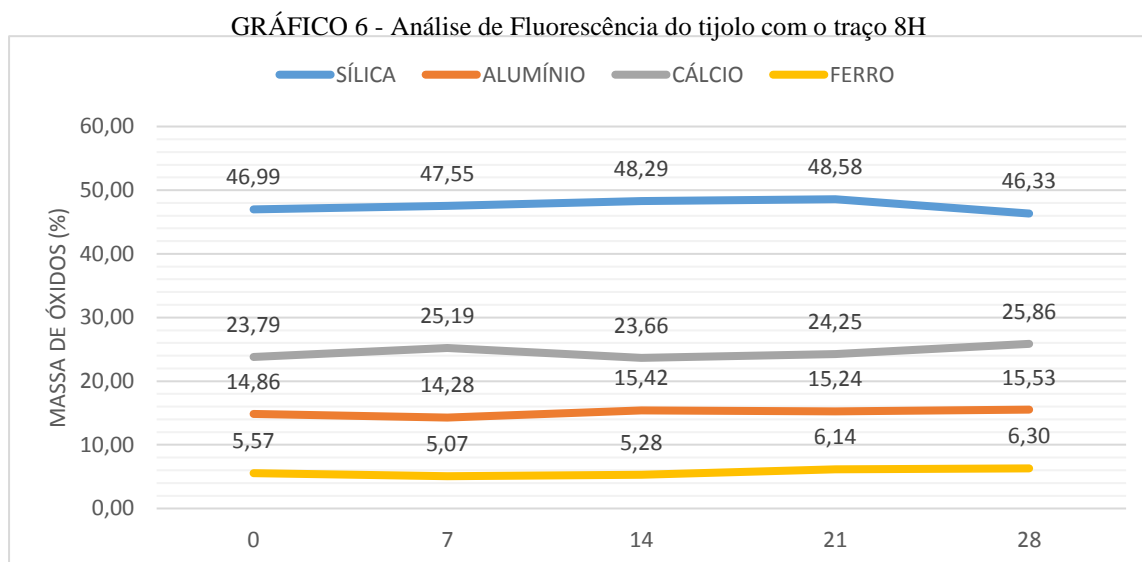
As pozolanas contém quantidades variáveis de sílica nas suas diversas ligações com outros elementos argilominerais. Outros compostos envolvendo ferro, alumina, magnésio, enxofre e álcalis são também formados na reação de hidratação e acarretam influência na capacidade aglomerante (SHEARER, 2015)

A adição de cimento em uma mistura argilosa ou pozolânica proporcionará mais silicatos e aluminatos de cálcio no sistema. Em relação a areia, essa tem a função de atuar como material inerte na mistura de preparação dos tijolos, aumentando o volume da mistura e reduzindo seu custo de uso nos traços de confecção (YU, 2017)

4.2.7 Análises químico-mineralógicas do traço e tijolo desenvolvido

Com o traço de trabalho definido, o 8H, ocorreu a fabricação dos tijolos e coube analisar as características químicas e minerais que influenciaram a obtenção desta resistência mecânica a compressão otimizada no traço 8H. As análises foram a fluorescência e difração de raios-x.

A análise de fluorescência foi realizada nas principais idades de quando se estuda o desenvolvimento de materiais cimentícios. Além das idades tradicionais, a idade de zero dia foi analisada (material do ato de desmolde). O gráfico 6 explana o percurso reacional quantitativo dos elementos mais representativos na reação de hidratação e produção de resistência nas idades estudadas.



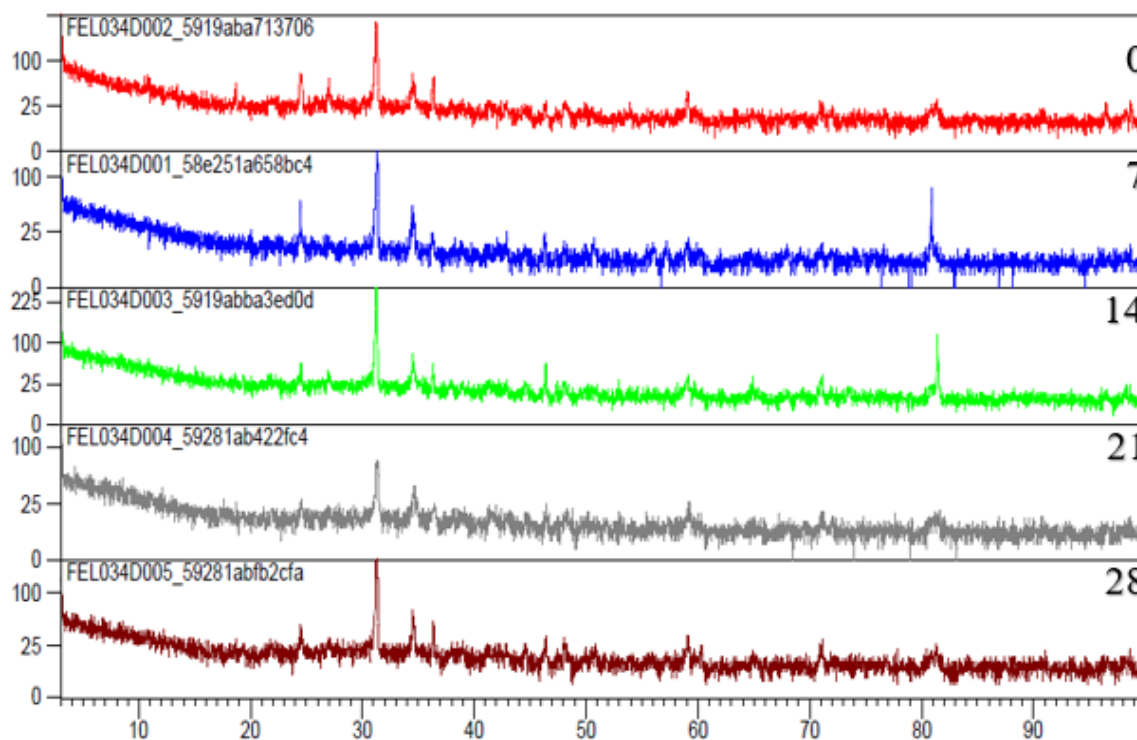
FONTE: O próprio autor.

Os resultados do gráfico 6 mostram que a partir da mesma matéria prima os percentuais se alteram, os cristais formados são os responsáveis diretos pela resistência dos materiais, estando em uma constante dinâmica que tendem durar até 2 anos de cura, claro que com as energias potencialmente baixas.

As reações pozolânicas e cimentícias estão ocorrendo na linha do tempo, decaindo cineticamente e originando resistência mecânica. Como a fluorescência não enxerga os cristais, e sim os elementos, a variação durante o tempo dos percentuais não são tão significativas, pois não a ganho nem perda de massa, e sim transformações e realocações dos elementos químicos, forças intermoleculares e alterações nos arranjos cristalinos.

As análises de difração de raio-x abrangem um contexto maior e mais qualitativo da dinâmica de formação e estabilização dos cristais. Essa cristalização quanto mais próxima da distribuição da tabela 1, mais gerará resistência e durabilidade os traços implementados. Na figura 8 estão os resultados de difração que exhibe os difratogramas para cada idade de rompimento do traço 8H.

FIGURA 8 - Difratograma geral para todas as idades do traço 8H



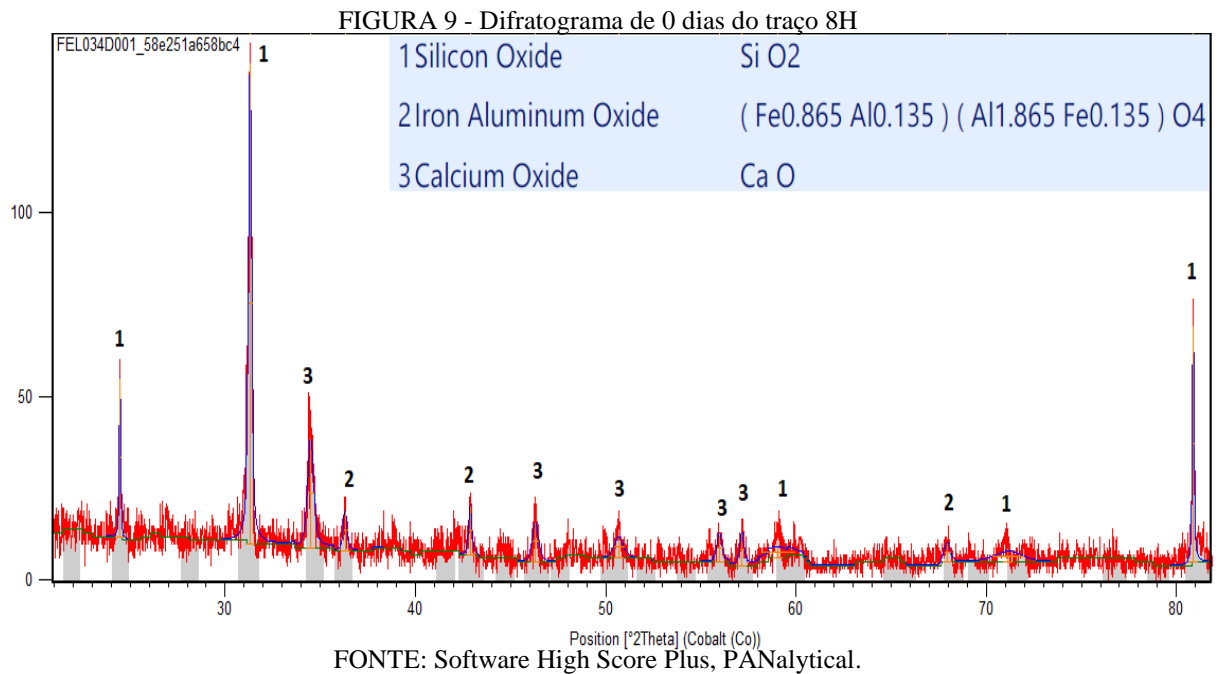
FONTE: Software High Score Plus, PANalytical.

Em uma visão superficial, o perfil de cada tempo de cura está próximo qualitativamente um dos outros. Nas identificações dos picos de cada idade de rompimento nas figuras seguintes, além das diferenças quantitativa no percurso reacional, existem diferenças no mecanismo e formação dos cristais.

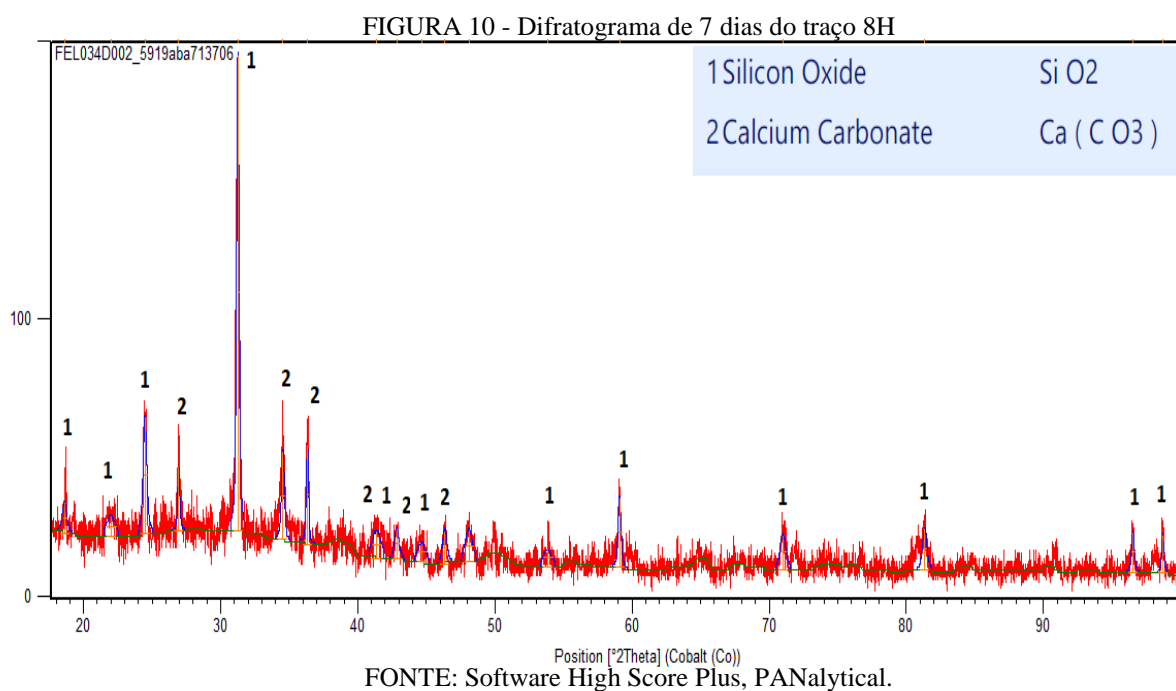
A importância de analisar os picos se dá em saber quais as formações intermediárias e finais que fazem parte das fases da cinética reacional, formações essas que proporcionam as matérias-primas em um produto de alta durabilidade.

No caso dos picos do difratograma de 0 dias, figura 9, os reagentes estão ainda puros, mesmo que já estejam em meio aquoso. Observa-se a presença das fases 1 e 3, fases essas de componente ainda não reagidos. A fase 2 mostra um início reacional que expõe as reações de hidratação pelo consumo do alumínio e ferro para a formação dos aluminatos e ferro

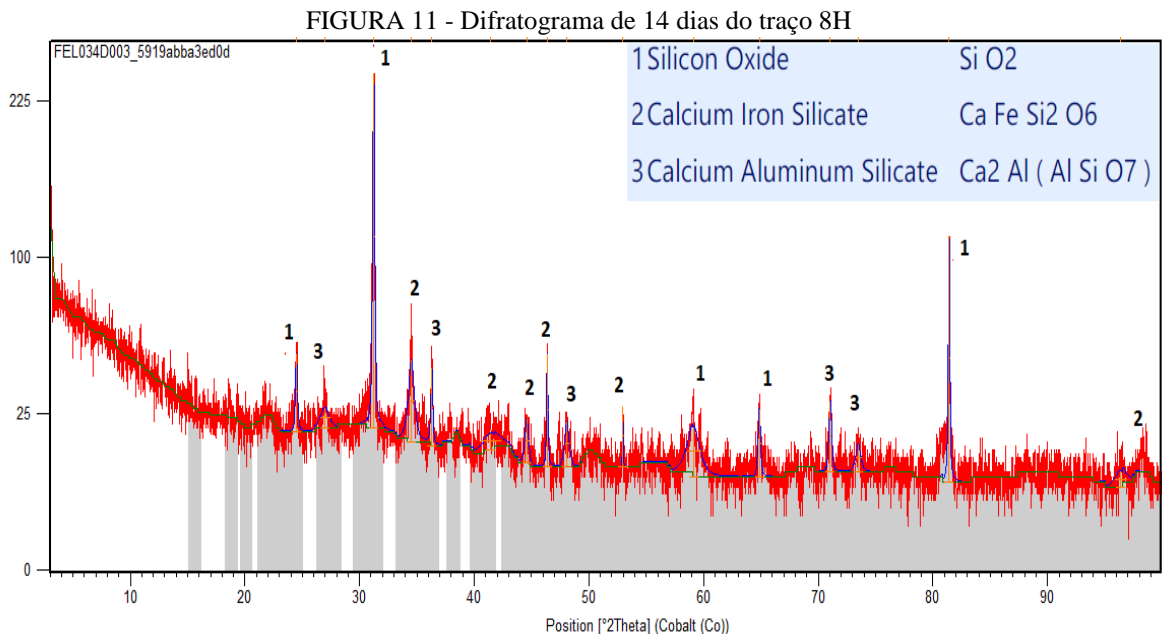
aluminatos de cálcio. Como a sílica é o elemento mais presente nas cinzas, os maiores picos são da fase 1.



Para o difratograma de 7 dias, figura 10, após o consumo de boa parte dos ferros e alumínio, o perfil aponta para a formação dos silicatos de cálcio, pois ainda somente 65% das reações foram ocorridas. O perfil possui 18 picos, sendo mais da metade de cristais de sílica e o restante de cálcio, isso comprova o que a teoria excita sobre as reações pozolánicas.



A partir de 14 dias com as informações do difratograma da figura 11, que na qual 90 % das reações já aconteceram, a fase de excesso de sílica se mantém a mais presente e de maiores picos. Além de ter muito nas cinzas, a sílica também faz parte da composição do cimento. A análise aponta três tipos de picos distribuídos dentro dos dezesseis identificados.



FONTE: Software High Score Plus, PANalytical.

Os resultados das fases de 21 e 28 dias, figuras 12 e 13, são bem próximos da idade de 14 dias, devido principalmente a maioria das reações de hidratação, mais 95 %, já terem sido finalizadas para 21 dias e 99% para 28 dias. Os cristais são praticamente os mesmos, alterando pouca coisa em relação a arranjo e outros elementos presentes. Comprovando que o mecanismo reacional se direciona principalmente para as formações e estabilização dos silicatos.

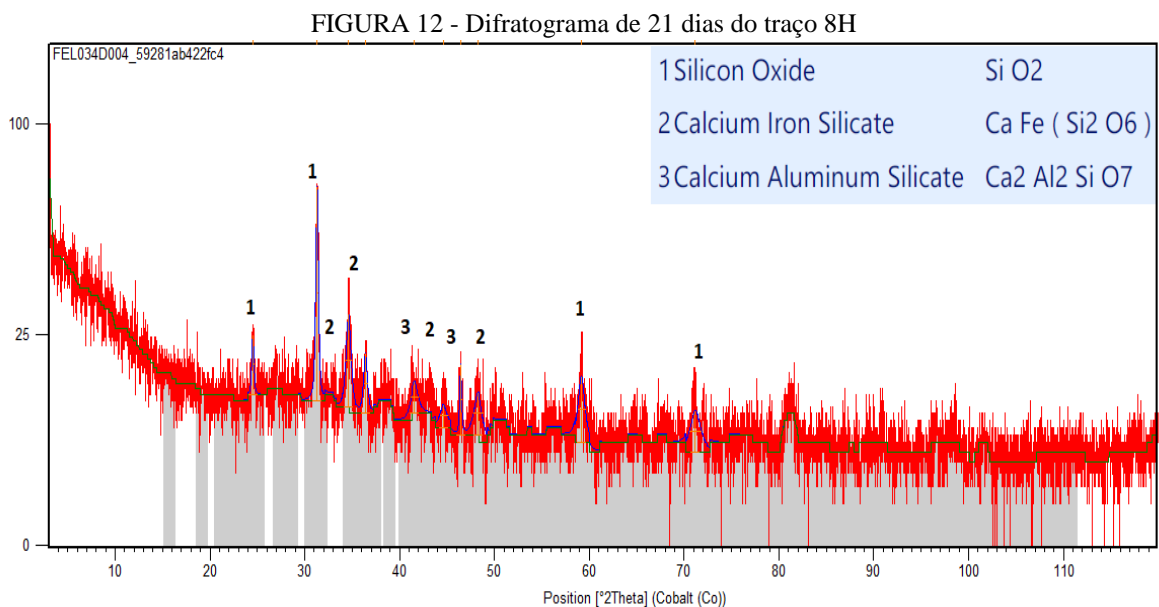
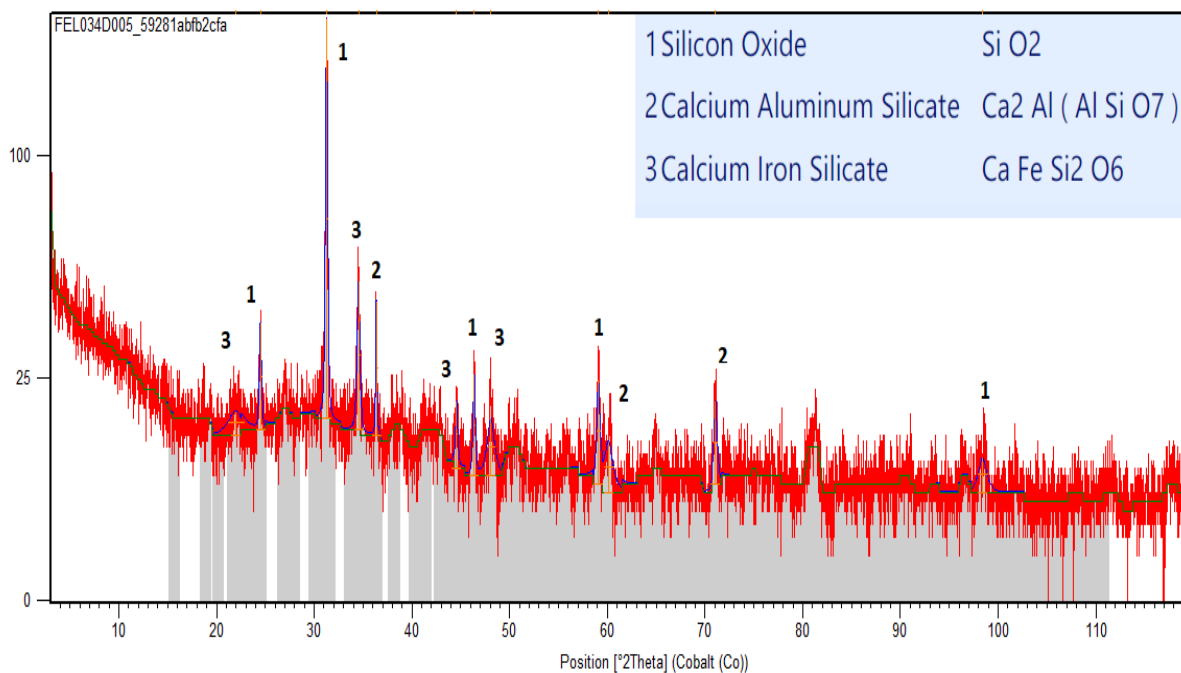


FIGURA 13 - Difratoograma de 28 dias do traço 8H



FONTE: Software High Score Plus, PANalytical.

Todos os elementos dos óxidos principais das cinzas: sílica, cálcio, ferro, alumínio, em todas as cinco idades estudadas, variam referente a sua concentração e formação dos cristais. Todos os elementos químicos cimentícios estão presentes, cada um com a sua função dentro das reações referente a hidratação, cura, secagem, aglomeração e estequiometria. Vários são os fatores que influenciam os resultados das reações pozolânicas, em primeiro lugar vem a qualidade dos materiais.

As pesquisas são realizadas para determinar as características das cinzas de forma a encontrar graus de pozolanicidade. A curto prazo a atividade pozolânica está relacionada à superfície específica, e a longo prazo ao conteúdo de sílica e alumina reativas. O grau de cristalização influencia cineticamente, pois o desarranjo estrutural implica na presença de átomos que não atingiram posições de mínima energia livre, tornando os materiais instáveis em meio agressivo. As cinzas queimadas em temperaturas elevadas atingem alta cristalização, o que impede seu ataque pelo íon cálcio (TEIXEIRA et al., 2015)

Para a cal hidratada existem várias marcas no mercado e o teor de óxidos varia de uma para outra mediante pureza. Logicamente, as cales com o menor teor de impurezas apresentarão maiores reatividade. Com uso de cal hidratada cálcica e dolomítica, o comportamento do mecanismo reacional muda de acordo com o tipo de cinza volante utilizada. Na maioria dos casos a cal dolomítica apresenta maiores resistências mecânica ao rompimento e durabilidade em temperaturas normais (MODARRES, 2015).

As reações são mais efetivas nas misturas de cinzas volantes com cal dolomítica porque o óxido de magnésio do dolomito tem peso molecular menor que o hidróxido de cálcio. Para a mesma quantidade das cales, as reações das cinzas ocorrem mais rapidamente com a cal dolomítica, levando a uma maior cimentação da pasta, comprovando que a pozolanicidade da cal dolomítica é mais alta do que a calcítica (YADAV, 2017).

A qualidade das cinzas volantes, no entanto, exerce maior influência nas reações pozolânicas de que o tipo da cal hidratada utilizada. Na reação de hidratação, além das características dos próprios materiais, a maneira como se procede o equilíbrio reacional deve ser observada. Os materiais devem ser bem misturados para que se atinja uma maior homogeneização, permitindo um melhor contato entre as substâncias reagentes (SURABHI, 2017).

A temperatura também interfere no tempo de ocorrência das reações de hidratação. Quando elevadas, as temperaturas aceleram o processo reacional e, quando baixam o retardam. Abaixo de 7°C as reações de hidratação, por serem exotérmicas, deixam de ocorrer. As reações pozolânicas são de longos prazos, estendendo-se em um tempo que pode se prolongar em até 2 anos (MELIANDE, 2014)

4.2.8 Discussão sobre as aplicações dos tijolos ecológicos na habitação social

A viabilidade para desenvolvimento e implementação do tijolo ecológico na sociedade está sendo estudada a vários anos pela comunidade científica. A iniciativa é útil por visar o bem social e a preservação do meio ambiente, tendo um horizonte a se percorrer e não uma linha de chegada para atravessar e se estagnar. São muitas as possibilidades de uso para as cinzas volantes, uma das utilizações mais extensivas e difundidas é em cimento, sendo a aplicação mais desejável (NEVES, 2017).

Estima-se que as despesas da obra com a aplicação de tijolos ecológicos ficariam em torno de 30% do valor de uma mesma casa construída nos moldes tradicionais. Uma casa popular com o tijolo ecológico, feito das cinzas, com 25 metros quadrados mais o banheiro, teria um custo aproximado de R\$ 18 mil, enquanto o mesmo imóvel construído convencionalmente custa o dobro (MORAIS, 2017).

A casa construída com esse formato de tijolo necessita de apenas 25% do ferro usados em obras convencionais, a mão-de-obra se reduz a 50% e a quantidade de concreto usado não passa dos 10% pelo sistema de encaixe. A fiação e encanamento são facilitados em

virtude de os tijolos ecológicos terem apenas dois furos grandes reduzindo o uso de cimento e argamassa para a amarração (PISANI, 2017).

O emprego de tijolos ecológicos está em conformidade com o grande desafio da diminuição de impactos ambientais causados pelas atividades da indústria da construção civil. Pesquisadores e empresários do ramo afirmam que é impossível atingir o desenvolvimento sustentável sem que o setor da construção civil passe por consideráveis transformações tecnológicas e sociais (CLAVERIE, 2017).

O conceito de desenvolvimento sustentável implica uma reformulação da visão de impacto ambiental das atividades humanas que são prejudiciais. Apesar das difundidas vantagens destacadas a respeito da utilização do tijolo ecológicos, no Brasil o interesse por esse material na construção civil de habitações, como componente de alvenaria, foi diminuindo à medida que outros materiais, na maioria dos casos mais industrializados, surgiram no mercado (ÂNGULO, 2017).

Segundo o SEBRAE (2018), o Brasil ainda está muito atrasado no sentido de implantação de métodos sustentáveis como a proliferação social de ação para fabricação dos tijolos. O mercado interno torna-se desfavorável à inserção de produtos ecológicos. Com o fácil processo de construção e diminuição do processo construtivo, o tijolo ecológico favoreceria a redução do déficit habitacional do Brasil.

Desta forma, o uso do tijolo ecológico apoiado pelo governo federal, estadual e municipal, potencializaria o mercado para esse tipo de produto, aproveitando também o regime de mutirão na construção, ampliando o mercado e a procura pelo produto que pode ser, sem discriminação, a qualquer setor e classe social. Existe uma forte barreira a ser vencida que é a resistência de consumidores a novos produtos, o que requer grandes investimentos em divulgações e campanhas publicitárias (JOHN, 2017).

A utilização dessa tecnologia para desenvolvimento tijolos ecológicos vêm gerando o menor impacto ambiental e maior auxílio social, pois não passa pelo processo de queima, que consome grandes quantidades de madeira e combustíveis, como é o caso dos tijolos convencionais produzidos que lançam na atmosfera uma grande quantidade de dióxido de carbono, o CO₂ (BERTÉ, 2017).

O tijolo ecológico não é cozido em forno, processo que resulta na emissão de diversos gases poluentes. É notório que para a obtenção de tijolos ecológicos de qualidade e com o menor consumo de cimento, é necessário a utilização de materiais alternativos de capacidade cimentícias satisfatórias as normas nacionais e internacionais que atuam na construção civil (MACHADO, 2017).

5 CONCLUSÕES

A pesquisa verificou a possibilidade de uma relação ganha-ganha entre empresa, escola e sociedade. Foram estudados, caracterizados e validados um traço, desenvolvido e nomeado de 8H, que está apto ao uso em prol de uma possível implementação social devido a sua otimização alcançada e a ser de baixo custo e fácil confecção. O tijolo foi desenvolvido em pequena escala e as análises químicas e mineralógicas solidificaram a capacidade reacional do traço em garantir qualidade do produto na construção civil.

Quanto mais cinzas forem utilizadas no traço, melhor para as termelétricas. Foi encontrado uma faixa ideal com 70% de concentração de cinzas, concretizando um número bastante satisfatório para a eliminação desse passivo ambiental através da produção de tijolos ecológicos. É necessário utilizar as outras adições para a obtenção da otimização, adições essas que não foram de grande escala e não impactam financeiramente como o custo de produção de um tijolo cerâmico ou bloco de concreto. O que oneram o processo ecológico com mais impacto é o frete das cinzas devido a frequente alta dos combustíveis, e a compra da prensa manual que custa aproximadamente R\$ 4.000.

A pretensão é ampliar a pesquisa científica e montar uma olaria ecológica onde seriam empregadas pessoas de baixa renda, além da participação da comunidade e também de envolver pessoas encaminhadas pela Justiça para trabalhar no manuseio da máquina que faz o tijolo ecológico, as prensas manuais. Essas pessoas fabricarão os tijolos para aqueles que não têm condições de operar os materiais e maquinários necessários, como mulheres abandonadas pelos maridos, deficientes físicos e mentais ou idosos

5.1 Sugestões e Recomendações para Estudos Futuros

A pesquisa apontou para um campo que cada vez mais se retire cimento de um traço para diminuir os custos e a poluição. Mas esse traço para o tijolo ecológico desenvolvido, mesmo que já otimizado, pode ser melhorado através da continuação das pesquisas e desenvolvimento, principalmente seguindo as sugestões de trabalhos futuros para o uso das cinzas de carvão mineral que seriam:

- a) testar o uso da cal dolomítica, como também outros tipos de cimento;
- b) realizar ensaios sem areia de obra e avaliar o impacto financeiro;
- c) avaliar novos traços com os materiais utilizados e com novas adições;
- d) efetuar teste a compressão diretamente em tijolos e em paredes.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR, NM 137:** Argamassa e concreto - Água para amassamento e cura de argamassa e concreto de cimento Portland, Rio de Janeiro, 1997.
- ABNT. **NBR, 5739:** Compressão de corpos-de-prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 2018.
- ABNT. **NBR, 7175:** Cal hidratada para argamassas - Requisitos, Rio de Janeiro, 2003.
- ABNT. **NBR, 8491:** Tijolo de solo-cimento - Requisitos, Rio de Janeiro, 2012.
- ABNT. **NBR, 8492:** Tijolo maciço de solo-cimento - Determinação da resistência à compressão e da absorção d'água - Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2012.
- ABNT. **NBR, 10.004:** Resíduos sólidos - Classificação, Rio de Janeiro, 2004.
- ABNT. **NBR, 10.833:** Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual - Procedimento, Rio de Janeiro, 2013.
- ABNT. **NBR, 10.836:** Bloco de solo-cimento sem função estrutural - Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água, Rio de Janeiro, 2013.
- ABNT. **NBR, 12.024:** Solo-cimento - Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos - Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2012.
- ABNT. **NBR, 12.025:** Solo-cimento - Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos - Procedimento, Rio de Janeiro, 2012.
- ABNT. **NBR, 12.653:** Materiais pozzolânicos - Requisitos, Rio de Janeiro, 2015.
- ABNT. **NBR, 14.656:** Cimento Portland e matérias-primas - Análise química por espectrometria de raios X - Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2001.
- ABNT. **NBR, 15.270-1:** Componentes cerâmicos - Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação - Terminologia e requisitos, Rio de Janeiro, 2017.
- ABNT. **NBR, 15.900-7:** Água para amassamento do concreto, Rio de Janeiro, 2009.
- ABNT. **NBR, 16.605:** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica, Rio de Janeiro, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **standard specification for aggregate for masonry mortar.** ASTM-C-144-17, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Specifications for fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement.** ASTM-C-618-17a, 2017.
- ALCANTARA, M. A. M; MATSUURA, F. L. Estudo de variação das propriedades do solo-cimento auto adensável no estudo endurecido em função das condições de exposição após a

cura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 57., 2015, Bonito. **Anais...** Bonito: Ibracon, 2015. p. 1-14.

ÂNGULO, S. C. et al. **Aperfeiçoamento da reciclagem da fração mineral dos resíduos de construção e demolição: uso em concretos.** São Paulo: USP, 2016. Disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/APRRCD_Angulo%20et%20al.pdf>. Acesso em: 26 de jul. 2016.

BANDURA, L. et al. Synthetic zeolites from fly ash for an effective trapping of BTX in gas stream. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 223, p. 1–9, 2016.

BARROS, K. S. **Estudo sobre a possibilidade do uso de cinzas volantes advindas de uma termelétrica a carvão mineral da região metropolitana de Fortaleza-CE para aplicação de camadas granulares de pavimentos.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

BEHIN, J. et al. Developing a zero liquid discharge process for zeolitization of coal fly ash to synthetic NaP zeolite. **Fuel**, v. 171, p. 195–202, 2016.

BELVISO, C. et al. Synthesis of zeolites at low temperatures in fly ash-kaolinite mixtures. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 212, p. 35–47, 2015.

BERTÉ, S. D. D; ALCANTARA, M. A. M. Estudo do comportamento do solo cimento auto adensável. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Goiânia, v. 7, n. 2, p. 37-52, 2013. Disponível em: <revistas.ufg.br/index.php/reec/index>. Acesso em: 04 jan. 2017.

BRASILEIRO, L, L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção civil. **Revista Cerâmica**, v. 61, n. 358, São Paulo – SP, p. 178-189. 2015.

BUKHARI, S. S.; BEHIN, J.; KAZEMIAN, H.; ROHANI, S. Conversion of coal fly ash to zeolite utilizing microwave and ultrasound energies: A review. **Fuel**, v.140, p. 250– 266, 2015.

CARDOSO, A. M. et al. Integrated synthesis of zeolites 4A and Na-P1 using coal fly ash for application in the formulation of detergents and swine wastewater treatment. **Journal of Hazardous Materials**, v. 287, p. 69–77, 2015b.

CLAVERIE, J. **Estudo da influência da cinza de casca de arroz e da cal nas propriedades do solo-cimento auto adensável.** 2015. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2015.

ENERGIA PECÉM. **Projeto de pesquisa sobre a utilização da cinza de carvão mineral na construção civil, pavimentação, e aplicações geotécnicas e ambientais.** Primeiro Relatório Semestral, Fortaleza, 2016

HALEEM, A.; LUTHRA, S.; KHURANA, S.; AHMAD, S. Critical factors for the successful usage of fly ash in roads & bridges and embankments: Analyzing indian perspective. **Resources Policy**, v. 49, p. 334–348, 2016.

HEYNS, M.; ADEDEJI, J. A.; MOSTAFA, M. Utilization of Fly Ash in Road Construction in South Africa: Environmental Assessment. **Proceedings of The Joint International Conference: 21st Century Human Habitat: Issues, sustainability and Development**, Nigeria, p. 426-432, 2016.

HOLANDA, J. N. F.; RODRIGUES, L. P. Recycling of water treatment plant waste for production soil-cement bricks. **Procedia Materials Science**, Amsterdam, v. 8, n. 4, p. 197-202, 2015.

JOHN, M. V. **Reciclagem de resíduos na construção civil**: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. 2000. 102 f. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000. Disponível em: http://www.ietsp.com.br/static/media/mediafiles/2015/01/23/LV_Vanderley_John_-_Reciclagem_Residuos_Construcao_Civil.pdf>. Acesso em: 06 abr. 2017.

JOW, J.; DONG, Y.; ZHAO, Y.; DING, S.; LI, Q.; WANG, X.; LAI, S. **Fly ash-based technologies and value-added products based on materials science**, Nashville, Tennessee, 2015.

JUENGER, M. C. G.; SIDDIQUE, R. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. **Cement and Concrete Research**. 2015.

LIMA, M. T. S. L.; SOUZA, M. C. Discorrendo Sobre o Uso das Termelétricas no Brasil. **In: Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 37, 2014.

LIN, L. et al. Synthesis of zeolite/hydrous metal oxide composites from coal fly ash as efficient adsorbents for removal of methylene blue from water. **International Journal of Mineral Processing**, v. 148, p. 32–40, 2016.

LIVI, C. N.; REPETTE, W. L. Ligante geopolimérico produzido com cinza volante e hidróxido de sódio. **Ambiente construído**, Porto Alegre, v. 15, n. 3, p. 7-18, 2015.

MACHADO, A. F.; MIRANDA, D. E. O.; BOMFIM, M. I.; SEGANTINI, A. A. S. Estudo das características de resistência e deformabilidade ao longo do tempo do solo-cimento plástico obtido através de resíduos sólidos de construção, visando a sua aplicação em fundações de obras de pequeno porte. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 13., 2006, Curitiba. **Anais...** Curitiba: [S.n.], 2006. v. 1. p. 573- 577. Disponível em: <<http://www.fec.unicamp.br/~pjra/Arquivo15.pdf>>. Acesso em: 06 abr. 2017.

MELIANDE, A. M. C. **Análise do Comportamento de Misturas de Solos com Cinza Volante de Carvão Mineral e Cal**. 2014. Dissertação (Mestrado em Programa de PósGraduação em Engenharia Civil da PUC/RJ) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MENDONÇA, G. C.; FERREIRA, C. C. Análise da adição da cinza gaseificada de carvão mineral pulverizado na cerâmica vermelha a partir do teste de absorção de água. XII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA. ISSN Impresso: 2446-8711. São Paulo. **Anais...** São Paulo: Blucher, 2017.

MILANI, A. P.; BARBOZA, C. S. Contribuição ao estudo de propriedades do solo-cimento auto adensável para a fabricação de parede monolíticas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 4, p. 143-153, 2016.

MODARRES, A.; RAHMANZADEH, M.; AYAR, P. Effect of coal waste powder in hot mix asphalt compared to conventional fillers: mix mechanical properties and environmental impacts. **Journal of Cleaner Production**, v. 91, p. 262-268. 2015.

MORAIS, M. B.; CHAVES, A. M.; JONES, K. Análise de viabilidade de aplicação do tijolo ecológico na construção civil contemporânea. **Revista Pensar Engenharia**, Belo Horizonte, v. 2, n. 2, 2014. Disponível em: <<http://revistapensar.com.br/engenharia/artigo/no=a138.pdf>>. Acesso em: 06 abr. 2017.

NEVES, C. M. M. Resgate e atualização do construir com terra: o projeto pro terra. In: CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL, 1, 2004, ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10., 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo: [S.n.], 2004. Disponível em: <ftp://ip20017719.eng.ufjf.br/Public/AnaisEventosCientificos/ENTAC_2004/trabalhos/PAP0247d.pdf>. Acesso em: 06 abr. 2017.

PAULA, Thaís Martins de. **Misturas de cinza volante e cal de carbureto: comportamento da resistência à compressão simples frente à moagem da cinza volante**. 2016. 192f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

PISANI, M. A. J. Um material de construção de baixo impacto ambiental: o tijolo de solo-cimento. **Sinergia**, São Paulo, v. 6. n. 1. p. 53-59, 2005. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/271829933_Um_material_de_construcao_de_baixo_impacto_ambiental_o_tijolo_de_solo-cimento>. Acesso em: 06 abr. 2017.

RAFIEIZONOOZ, Mahdi; MIRZA, Jahangir; SALIM, Mohd Razman; HUSSIN, Mohd Warid; KHANKHAJE, Elnaz. Investigation of coal bottom ash and fly ash in concrete as replacement for sand and cement. **Construction and Building Materials**, v. 116, p. 15-24, 2016.

ROHDE, G. M.; MACHADO, C. DE S. **Quantificação das cinzas de carvão fóssil produzidas no Brasil**. Porto Alegre: Fundação de Ciência e Tecnologia, 2016. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/conteudo/wp-content/uploads/2014/06/BT111.pdf>>. Acesso em: 09 dez. 2016.

SANTIAGO, O. N.; OLIVEIRA, F. D.; SOUZA, A. A. **Estudo do fator água/cimento para a confecção de Tijolos Ecológicos de Solo-cimento incorporados com resíduos gerados no beneficiamento de rochas ornamentais**. Paraíba: Encontro nacional de educação, ciência e tecnologia/UEPB, 2012.

SCRIVENER, K, et al. Advances in understanding hydration of Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 78, 2015.

SENNA, R. S.; SEGANTINI, A. A. S.; ALCÂNTARA, M. A. M. Estudo da utilização de resíduos de concreto oriundos de uma central de reciclagem na composição do solo cimento

plástico. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 57., 2015, Bonito. **Anais...** Bonito: Ibracon, 2015.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS – Sebrae. **Ideias de negócios: fabrica de tijolos ecológicos.** SEBRAE. 26 p. Disponível em: https://mailattachment.googleusercontent.com/attachment/u/0/?ui=2&ik=a2fb927061&view=att&th=13e5b4089373585f&attid=0.1&disp=inline&safe=1&zw&saduie=AG9B_P9IRLpg1-o8omBa7ypQQsSL&sadet=1367422748242&sads=tbb hm1dOHPYLr3KLqF36llqyXEA . Acesso em: 23 jan. 2018.

SHEARER, Christopher R.; KURTIS, Kimberly. Use of biomass and co-fired fly ash in concrete, **ACI Materials Journal**, v. 112, n. 2, p. 209-218, 2015.

SILER, P. Effects of high-temperature fly ash and fluidized bed combustion ash on the hydration of Portland cement. **Construction and Building Materials**. v.78, 2015.

SINGH, M. **Effect of coal bottom ash on strength and durability properties of concrete.** Punjab, 2015. Thesis (Ph. D. Civil Engineering) - Thapar University, India, 2015.

SIQUEIRA, J. S.; SOUZA, C. A. G.; SOUZA, J. A. S. **Reaproveitamento de cinzas de carvão mineral na formulação de argamassas.** [s.l.: s.n.], 2012.

SOUZA, M. I. B.; PEREIRA, J. A.; SEGANTINI, A. A. S. Tijolos de solo-cimento com resíduos de construção. **Techne**, São Paulo, v. 113, 2006. Disponível em: Acesso em: 25 jul. 2016.

SURABHI. Fly ash in India: Generation vis-à-vis Utilization and Perspectiva global. **International Journal of Applied Chemistry**, v. 13, n. 1, p. 29-52, 2017.

TAPKIN, S. **Estimation of Fatigue Lives of Fly Ash Modified Dense Bituminous Mixtures Based on Artificial Neural Networks.** v. 17, n. 2, p. 316-325, 2014.

TEIXEIRA, J. M. C.; VIEIRA, D. F.; SILVA, S. A.; COSTA FILHO, P. S. L.; FERREIRA FILHO, J. W. M. **Estudo dos produtos da combustão do carvão mineral visando seu aproveitamento como material cerâmico.** Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC' 2015 - 15 a 18 de setembro de 2015 - Fortaleza-CE, Brasil.

VALADÃO, I. C. R. P.; VILELA, F. O; FARIA J. **Produção de tijolos ecológicos no UGB.** v. 8, n. 1, p. 43, 2015. Disponível em: <http://www.ugb.edu.br/revistaepisteme-transversalis/edicao8/ARTIGO4.pdf> Acesso em: 09 agosto 2017.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. Biblioteca Universitária. **Guia de normalização de trabalhos acadêmicos da Universidade Federal do Ceará.** Fortaleza, 2017.

VASCONCELOS, S. D. **Avaliação da Heterogeneidade de Cinzas de Carvão Mineral Advindas da Termelétrica Energia Pecém e sua Aplicação em Camadas Granulares de Pavimentos.** 2016. Projeto de Graduação. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

VISA, M. Synthesis and characterization of new zeolite materials obtained from fly ash for heavy metals removal in advanced wastewater treatment. **Powder Technology**, v. 294, p. 338–347, 2016.

WU, L., FARZADNIA, N., SHI, C., ZHANG, Z., WANG, H., 2017, Autogenous shrinkage of high performance concrete, **Construction and Building Materials**, v. 149, pp. 62-75.

YADAV, A.; YADAV, N. K. Study of Fly Ash Cement Concrete Pavement. **International Journal of Civil Engineering**, v. 4, p. 1-6, 2017.

YAO, Z. T.; Ji, X. S.; SARKER, P. K.; TANG, J. H.; GE L, Q.; XI, A. M. S.; XI, Y. Q. A comprehensive review on the applications of coal fly ash. **Earth-Science Reviews**, v. 141, p. 105-121, 2015.

YU, Jing; LU, Cong; LEUNG, Christopher K. Y.; LI, Gengying. Mechanical properties of green structural concrete with ultrahigh-volume fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 147, p. 510-518, 2017.

ZEN, B. P. **Síntese de zeólitas a partir de cinzas de carvão e aplicação como adsorventes**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

ZHAO, Y., GONG, J., ZHAO S., Experimental study on shrinkage of HPC containing fly ash and ground granulated blast-furnace slag, **Construction and Building Materials**, v155, pp. 145-153, 2017.