

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Sâmara França

BLOCOS ÁLCALI ATIVADOS DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS COMPACTADOS

BELO HORIZONTE
2018

SÂMARA FRANÇA

BLOCOS ÁLCALI ATIVADOS DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS COMPACTADOS

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria Cristina Ramos de Carvalho

Coorientador: Prof. Dr. Augusto Cesar da Silva Bezerra

BELO HORIZONTE

2018

F814b França, Sâmara
Blocos álcali ativados de resíduos industriais compactados. /
Sâmara França. – – Belo Horizonte, 2018.
xiii, 71 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil. 2018.

Orientador: Profa. Dra. Maria Cristina Ramos de Carvalho.

Bibliografia

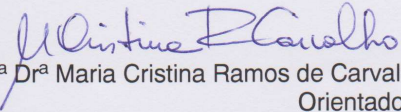
1. Materiais de Construção. 2. Resíduos Industriais. 3.
Reaproveitamento (Sobras, Refugos, etc.). I. Carvalho, Maria Cristina
Ramos de. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas
Gerais. III. Título

CDD 691

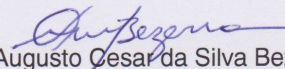
SÂMARA FRANÇA

**BLOCOS ÁLCALI ATIVADOS DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS
COMPACTADOS**

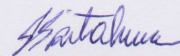
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do CEFET-MG como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil



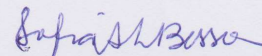
Prof^ª Dr^ª Maria Cristina Ramos de Carvalho
Orientadora
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG



Prof. Dr. Augusto Cesar da Silva Bezerra
Co-Orientador
Departamento de Engenharia de Transportes, CEFET-MG



Prof^ª Dr^ª Flávia Spitalle Jaques Poggiali
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG



Prof^ª Dr^ª Sofia Araújo Lima Bessa
Escola de Arquitetura, UFMG

Belo Horizonte, 06 de fevereiro de 2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e minha irmã por todo o apoio e amor que foram dedicados a mim através de muito esforço, conselhos, orações, ajudas e lições de vida;

Agradeço de forma especial aos meus orientadores, Maria Cristina e Augusto pela dedicação, empenho, disponibilidade, competência e amizade;

Aos meus amigos de curso que tornaram essa experiência mais leve, doce e divertida;

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do CEFET-MG pela dedicação e ensinamentos;

Ao CEFET-MG pela disponibilização da minha bolsa de mestrado e toda infraestrutura necessária para desenvolvimento desta pesquisa;

À equipe do laboratório de mecânica dos pavimentos e materiais, do Departamento de Engenharia de Transportes do CEFET-MG;

À empresa Nestlé, em especial à unidade na cidade Ibiá/MG, pelo fornecimento das amostras de cinzas e ao apoio para que fosse possível o desenvolvimento desta pesquisa;

À Vallourec Mineração pelo fornecimento do rejeito de minério de ferro.

RESUMO

Dentre as técnicas construtivas existentes, o uso do bloco de terra compactado se destaca por se tratar de um produto que dispensa a fase de queima, além dos benefícios como desempenho térmico e acústico em acordo com as normas vigentes. Os blocos possuem a capacidade de incorporar resíduos industriais e podem ser estabilizados quimicamente por meio da ativação alcalina. A ativação alcalina consiste na obtenção de um aglomerante a partir de materiais aluminossilicatos em soluções altamente alcalinas. Diante disso, dois resíduos gerados em grande volume por processos industriais, cinzas produzidas por termoelétricas a partir da biomassa de eucalipto e o rejeito de minério de ferro, foram utilizados para confecção de blocos compactados ativados alcalinamente. Como contribuição para a destinação destes materiais, o objetivo deste trabalho foi desenvolver blocos utilizando estes resíduos, respeitando-se as exigências normativas. A cinza e o rejeito foram caracterizados por microscopia eletrônica de varredura, espectrometria de fluorescência de raios X, difração de raios X, análise térmica diferencial e termogravimétrica, perda ao fogo e granulometria por difração a laser. Foram propostas três relações de composição no ativador ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 1,00, 1,55 \text{ e } 1,85$) e três proporções de cinza e rejeito diferentes (30-70, 50-50 e 70-30). Estes traços foram caracterizados por resistência à compressão e absorção de água aos 7 e aos 28 dias. O traço com a relação cinza/rejeito 70/30 e $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} 1,55$ apresentou o melhor desempenho e por isso foi selecionado para confecção dos blocos. Os blocos foram submetidos a ensaios de resistência à compressão, absorção de água, lixiviação e expansibilidade e apresentaram resultados superiores aos parâmetros das normas em todos os testes realizados.

PALAVRAS-CHAVE: cinza de cavaco de eucalipto, rejeito de minério de ferro, ativação alcalina, blocos compactados.

ABSTRACT

Among the existing construction techniques, the use of the compacted earth block stands out because it is a product that dispenses the burning phase, besides the benefits as thermal and acoustic performance in accordance with the current norms. The blocks have the capacity to incorporate industrial waste and can be chemically stabilized by alkaline activation. Alkaline activation consists of obtaining a binder from aluminosilicate materials in highly alkaline solutions. Therefore, two residues generated in large volume by industrial processes, ashes produced by thermoelectric from eucalyptus biomass and iron ore tailings, were used to make alkaline activated compacted blocks. As a contribution to the destination of these materials, the objective of this work was to develop blocks using these residues, respecting the normative requirements. The ash and the tailings were characterized by scanning electron microscopy, X-ray fluorescence spectrometry, X-ray diffraction, differential and thermogravimetric analysis, fire loss and laser diffraction granulometry. Three composition ratios were proposed in the activator ($\text{SiO}_2 / \text{Na}_2\text{O} = 1.00, 1.55 \text{ and } 1.85$) and three different ash and tail ratio (30-70, 50-50 and 70-30). These compositions were characterized by compressive strength and water absorption at 7 and 28 days. The trace with the ash/reject ratio 70/30 and $\text{SiO}_2 / \text{Na}_2\text{O} 1.55$ presented the best performance and was therefore selected for confection of the blocks. The blocks were submitted to tests of resistance to compression, water absorption, leaching and expansibility and showed higher results than the norms parameters in all the tests performed.

KEYWORDS: eucalyptus chip ash, iron ore tailings, alkaline activation, compacted blocks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Prensa manual CINVA-RAM para BTC.....	7
Figura 2 – Microscopia eletrônica de varredura das cinzas de eucalipto	10
Figura 3 - Curva termogravimétrica (TG) e termodiferencial (DTA).....	11
Figura 4 – Microscopia eletrônica de varredura do geopolímero curado a temperatura ambiente.....	19
Figura 5 - Resultados para BTC.....	21
Figura 6 - Fluxograma das atividades	22
Figura 7 - Molde cilíndrico 25x50mm	28
Figura 8 - Molde de aço	29
Figura 9 - Bloco para ensaio resistência à compressão.....	30
Figura 10 - Ensaio de resistência à compressão bloco	32
Figura 11 - Blocos em tanque de imersão.....	33
Figura 12 - Marcações das retas de referência.....	34
Figura 13 – Microscopia eletrônica de varredura do rejeito de minério de ferro moído	35
Figura 14 – Microscopia eletrônica de varredura do rejeito de minério de ferro.....	36
Figura 15 – Microscopia eletrônica de varredura da cinza de cavaco de eucalipto moída	37
Figura 16 – Microscopia de eletrônica de varredura da cinza de cavaco de eucalipto moída	38
Figura 17 - (a) Difratograma RMF e (b)Difratograma CCE.....	39
Figura 18 - (a) TGA RMF (b) TGA CCE	40
Figura 19 - Granulometria das amostras de RMF e CCE.....	41
Figura 20 - Resistência à compressão estudo piloto.....	41
Figura 21 - Traço utilizando 80%,70%,50%,20% de cinza da esquerda para direita	42
Figura 22 - Resistência à compressão de todos os traços	43
Figura 23 - Difração de raio X - todos os traços	44
Figura 24 – Microscopia eletrônica de varredura do traço 30/70 (a) 1,00 (b)1,55 e (c) 1,85	45
Figura 25 – Microscopia eletrônica de varredura do traço 50/50 (a) 1,00 (b)1,55 e (c) 1,85	46
Figura 26 – Microscopia eletrônica de varredura do traço 70/30 (a) 1,55 e (b)1,85.	47

Figura 27 – Microscopia eletrônica de varredura do traço 70/30 (a) 1,00 (b)1,55 e (c) 1,85	48
Figura 28 - Absorção de água de todos os traços.....	49
Figura 29 - Resistência à compressão dos blocos	50
Figura 30 - Modo de ruptura bloco	51
Figura 31 - Bloco rompido	51
Figura 32 - Absorção de água dos blocos	52
Figura 33 - Índice de vazios dos blocos	53
Figura 34 - Condutividade lixiviado dos blocos	54
Figura 35 - pH lixiviado dos blocos.....	56
Figura 36 - Leitura da distância entre as retas de referências dos blocos	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Energia de compactação e produtividade	8
Tabela 2 - Composição química rejeito de minério de ferro (%).....	14
Tabela 3 - Propriedades físicas e químicas hidróxido de sódio.....	24
Tabela 4 - Propriedades físicas e químicas silicato de sódio	24
Tabela 5 - Propriedades físicas e químicas superplastificante Silicon ns high.....	25
Tabela 6 - Proporções estudo piloto.....	27
Tabela 7 - Proporções de materiais para os traços	28
Tabela 8 - Composição química do RMF e da CCE em porcentagem.....	38
Tabela 9 - Determinação final da lixiviação	55
Tabela 10 - ANOVA SiO ₂ /Na ₂ O igual a 1,55 e 1,85 e cinza rejeito igual a 70/30.....	69
Tabela 11 - ANOVA SiO ₂ /Na ₂ O igual a 1,55 e 1,85 e cinza rejeito igual a 50/50.....	69
Tabela 12 - ANOVA SiO ₂ /Na ₂ O igual a 1,55 e 1,85 e cinza rejeito igual a 30/70.....	69
Tabela 13 - ANOVA SiO ₂ /Na ₂ O igual a 1,55 e 1,85 e cinza rejeito igual a 70/30.....	70
Tabela 14 - ANOVA SiO ₂ /Na ₂ O igual a 1,55 e 1,85 e cinza rejeito igual a 50/50	70
Tabela 15 - ANOVA SiO ₂ /Na ₂ O igual a 1,55 e 1,85 e cinza rejeito igual a 30/70	70

LISTA DE SÍMBOLOS

Å	Angstrom
%	Por cento
°	Grau
°/min	Grau por minuto
°C	Graus Celsius
kV	Quilovolt
mA	Miliampère
mm	Milímetros
cm	Centímetro
MPa	Megapascal
MPa/s	Megapascal por segundo
pH	Potencial hidrogeniônico
θ	Ângulo teta
μm	Micrômetro
mS/cm	Milisiemens por centímetro
$\mu\text{S/cm}$	Microsiemens por centímetro

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CCE	Cinza de cavaco de eucalipto
RMF	Rejeito de minério de ferro
CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
DET	Departamento de Engenharia de Transportes
DRX	Difração de raios X
TGA	Análise termogravimétrica
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
NBR	Norma Brasileira
SiO ₂	Dióxido de silício
ZrO ₂	Óxido de Zircônio
Fe ₂ O ₃	Hematita
FeOOH	Goethita
Al(OH) ₃	Gibbissita
CaCO ₃	Calcita
KCl	Silvita
MgO	Periclásio
Ca(OH) ₂	Portlandita
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
CaO	Óxido de cálcio

NaOH	Hidróxido de sódio
SiO ₂ Na ₂ O	Silicato de sódio
C-A-S-H	Aluminossilicato de cálcio hidratado
N-A-S-H	Aluminossilicato álcalis
Cu	Cobre
Na ₉₆ Al ₉₆ SiO ₃₈₄ 27H ₂ O ₂	Zeólita
Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	Caulinita

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivos.....	3
1.1.1. Objetivo Geral.....	3
1.1.2. Objetivos Específicos.....	3
1.2. Justificativa e Relevância.....	3
1.3. Restrições e Limitações da Pesquisa	4
1.4. Estrutura do trabalho.....	4
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	6
2.1. Blocos de terra comprimidos.....	6
2.2. Cinzas de eucalipto.....	8
2.3. Rejeito de mineração	11
2.4. Ativação alcalina	14
2.4.1. Composição dos ativadores alcalinos	16
2.5. Materiais de construção com ativação alcalina e cinzas com alto teor de cálcio.....	18
2.5.1. Blocos compactados com cinzas vegetais e ativação alcalina	20
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
3.1. Materiais	23
3.1.1. Cinzas de cavaco de eucalipto	23
3.1.2. Rejeito de minério de ferro.....	23
3.1.3. Hidróxido de sódio.....	23

3.1.4. Silicato de sódio.....	24
3.1.5. Aditivo superplastificante	24
3.1.6. Areia normal	25
3.2. Métodos	25
3.3. Caracterização da cinza de eucalipto e rejeito de mineração.....	25
3.4. Dosagem dos traços.....	26
3.5. Produção dos blocos.....	29
3.6. Caracterização dos traços	30
3.7. Caracterização dos blocos.....	31
3.8. Análise estatística.....	34
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	35
4.1. Caracterização da cinza de cavaco de eucalipto e rejeito de minério de ferro	35
4.2. Determinação da dosagem dos traços	41
4.3. Caracterização dos traços	42
4.4. Caracterização dos blocos.....	50
5. CONCLUSÕES.....	58
5.1. Sugestões para futuros trabalhos	59
6. REFERÊNCIAS	60
7. APÊNDICE A.....	69

1. INTRODUÇÃO

Grande parte dos processos industriais gera resíduos, porém nem todo material pode ser descartado sem causar danos ao meio ambiente (SILVA, 2011). Segundo o Panorama de resíduos sólidos do Brasil produzido pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, em 2014, enquanto o Brasil gerou cerca de 78,6 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, um aumento de 2,9% se comparado ao ano anterior, o índice de crescimento da população foi de 0,9% (ABRELPE, 2014). Já os resíduos oriundos das atividades agrícolas e rejeitos das atividades de mineração representavam em torno de 580 milhões de toneladas em 2009, segundo o Plano Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil (MMA, 2011).

Diante disso, a construção civil surge como aliada à redução dos impactos ambientais no sentido da incorporação de resíduos, uma vez que tem grande potencial para isso. Entre os segmentos da construção, aquele que mais reutiliza produtos gerados por outras indústrias é a cimenteira, que recicla principalmente escórias de alto forno e cinzas volantes (ÂNGULO *et al.*, 2001). A utilização de resíduos industriais como matéria prima, combustível e adições ativas, como é o caso das escórias de siderurgia e das cinzas de termelétricas, tem dado ao cimento um caráter menos agressivo ao meio ambiente (CNI, 2012).

Um dos resíduos sólidos mais significativos, em termos de volume, no mundo, são as cinzas de carvão (JUÁREZ *et al.*, 2015). Segundo Myburg *et al.* (2014), o eucalipto é a madeira mais cultivada no mundo, com cerca de 20 milhões de hectares plantados, sendo a principal madeira de reflorestamento. Por outro lado existe a indústria siderúrgica que depende do carvão, mas devido a problemas sociais e ambientais utiliza a madeira de reflorestamento como matéria prima para o carvão vegetal (GONÇALVES *et al.*, 2014).

Segundo o estudo de Amaya *et al.* (2015), na queima do carvão vegetal cerca de 1% do material é transformado em cinzas, tendo sido as cinzas de eucalipto já comprovadas como material cimentício viável em substituição ao cimento Portland em proporção de até 15% (RESENDE *et al.*, 2014). Acima deste valor de substituição acredita-se que a cinza não apresentará comportamento semelhante à

cinza de bagaço de cana de açúcar ou casca de arroz, devido ao seu baixo teor de óxido de silício.

Outro resíduo produzido em grande quantidade no Brasil é o rejeito do minério de ferro. Segundo o Sumário Mineral de 2015 produzido pelo Departamento Nacional de Produção Mineral, o Brasil detém 11,9% das reservas de ferro do mundo e é o terceiro maior produtor mundial de ferro com 12,8% da produção, cerca de 411.182.786 toneladas (DNPM, 2015). A deposição do rejeito ocorre usualmente na forma de barragens, apesar de seu grande impacto ambiental na fase de implementação e potenciais riscos de rupturas (PORTES, 2013). Segundo Presotti (2002), esse tipo de disposição é geralmente negligenciada devido à heterogeneidade do material disposto, o que reflete em baixo controle geotécnico e deficiências nas especificações técnicas na fase de concepção da construção gerando estruturas com grande potencial de ruptura. Dessa forma, a disposição desse material se apresenta como um problema para a sociedade.

O rompimento da barragem de Fundão, localizada em Mariana – MG, é um exemplo dos impactos sociais e ambientais que podem ser provocados por este tipo de acidente. A barragem de rejeitos construída a montante despejou bilhões de litros de lama destruindo povoados, ecossistemas e causando perdas humanas. O desastre ambiental, considerado o maior do Brasil, atingiu mais de 600 km carreando resíduos até a foz do rio Doce no oceano Atlântico no Estado do Espírito Santo (PINTO-COELHO, 2015).

Uma alternativa para o aproveitamento destes resíduos são os tijolos de solo cimento que podem incorporar materiais que são descartados. Diversos trabalhos já estudaram a adição de algum tipo de resíduo no tijolo, como a incorporação de casca de arroz e o capim braquiária (FERREIRA *et al.*, 2008), resíduos do granito (LIMA, 2010), resíduos da indústria de papel e celulose (PINHEIRO *et al.*, 2013) e rejeito de mineração para fabricação de tijolos cimento-rejeito (ESPÓSITO *et al.*, 2014).

Diante do exposto, a motivação desta pesquisa foi buscar uma possibilidade de utilização para as cinzas de eucalipto e o para o rejeito de mineração como matéria prima para produção de blocos. A proposta é produzir blocos compactados curados

à temperatura ambiente para alvenaria sem a utilização de cimento Portland em sua composição, a partir de cinzas de eucalipto com alto teor de cálcio e rejeito de mineração de ferro com elevado teor de silício e ferro.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver um bloco compactado ativado alcalinamente utilizando-se rejeito de minério de ferro e cinza de cavaco de eucalipto respeitando-se as exigências normativas.

1.1.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos delimitados para atingir o objetivo principal do projeto de pesquisa estão relacionados abaixo:

- Avaliar o efeito das proporções de rejeito, cinza e ativador alcalino na resistência à compressão e absorção de água dos traços produzidos para os blocos;
- Avaliar a absorção de água e a resistência à compressão dos blocos produzidos;
- Avaliar os parâmetros de durabilidade, expansibilidade e lixiviação, dos blocos produzidos.

1.2. Justificativa e Relevância

Diante da necessidade de se produzir tecnologias que contribuam para uma maior igualdade social, econômica e ambiental, este trabalho se mostra relevante por apresentar uma alternativa para a destinação de resíduos industriais que, geralmente, são descartados e impactam no meio ambiente. O rejeito de minério de ferro, por exemplo, é disposto usualmente em forma de barragens. Estas barragens causam grande impacto na implantação devido ao grande espaço físico e em caso de ruptura, pode ocasionar sérios danos ambientais e sociais para as comunidades locais. As cinzas, por sua vez, devido ao grande volume muitas vezes são descartadas de maneira inadequada. Quando dispostas de forma negligenciada

podem provocar muitos danos ao meio ambiente devido a lixiviação de elementos químicos presentes em sua composição Além disso, busca-se propor uma solução aplicável para o material produzido.

1.3. Restrições e Limitações da Pesquisa

Devido à grande variabilidade dos processos produtivos e, conseqüentemente, à variabilidade dos resíduos gerados, esta pesquisa se mostra representativa diante dos materiais utilizados e previamente caracterizados. Sendo assim, é importante ressaltar que a pesquisa foi realizada com as cinzas de cavaco de eucalipto fornecida pela Nestlé da unidade de Ibiá-MG. O rejeito utilizado foi cedido pela Vallourec Mineração, Mina do Pau Branco, obtido no fim do processo pelo filtro prensa que filtram e drenam a lama resultante do beneficiamento do minério de ferro, permitindo que o material depois de seco seja empilhado e reaproveitado.

1.4. Estrutura do trabalho

No Capítulo 1, Introdução, foram desenvolvidas a contextualização, a justificativa e relevância do trabalho. Ainda neste item foram enunciados os objetivos geral e específicos e a estrutura do trabalho.

No Capítulo 2, Fundamentação Teórica, foi realizada uma pesquisa bibliográfica, inicialmente, foi realizado um estudo sobre os blocos de terra compactados destacando-se suas principais características e composição. Entre os possíveis componentes dos blocos dois foram ressaltados: as cinzas volantes e o rejeito de mineração. Estes dois materiais foram descritos e caracterizados. Para complementar o tema dos blocos compactados foi citada uma forma de se estabilizá-los, a ativação alcalina. Depois foram apresentados trabalhos que utilizaram cinzas para a confecção de materiais cimentícios e, para finalizar, foram apresentados trabalhos que utilizaram cinzas e ativação alcalina para a confecção de blocos de terra compactados.

No Capítulo 3, Materiais e Métodos, foram apresentados todos os materiais utilizados no trabalho e métodos pertinentes para se alcançar o objetivo da pesquisa.

No Capítulo 4, Resultados e Discussões, apresentaram-se os resultados dos ensaios propostos na metodologia e foram realizadas as discussões sobre eles.

No Capítulo 5, Conclusões, foi feita uma síntese do estudo realizado, as conclusões quanto aos resultados e análises realizadas, retomando aos objetivos do trabalho.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

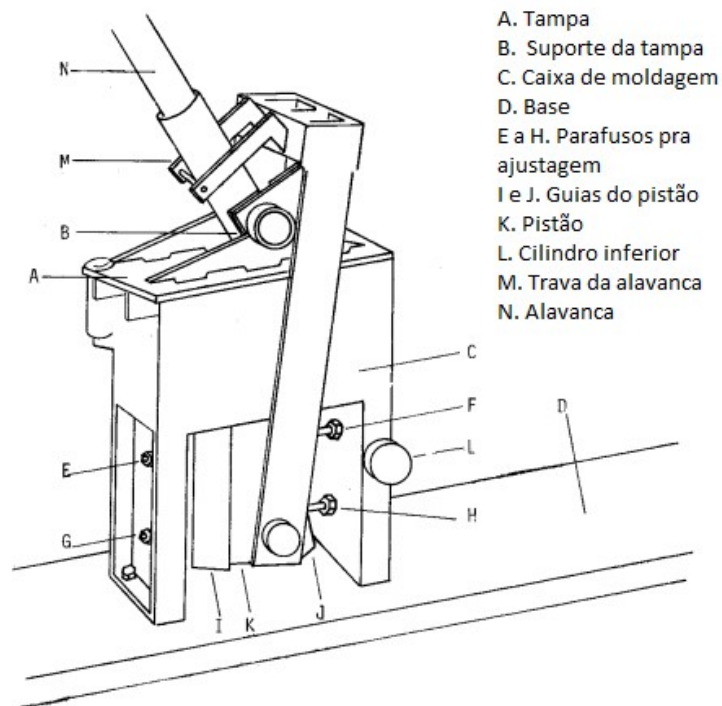
2.1. Blocos de terra comprimidos

Entre os produtos que podem ser fabricados a partir da terra, o bloco de terra compactada se destaca por não necessitar da fase de queima e com isso dispensar a utilização de combustíveis em sua fabricação. Se comparados com blocos de cerâmica tradicional, com queima em forno, os blocos de terra compactada que utilizam 10% de cimento em sua composição consomem de 8 a 16 vezes menos energia (PASSOS *et al.*, 2001).

Segundo a NBR 8491 (ABNT, 2012A), blocos comprimidos de terra estabilizados com cimento sem função estrutural devem apresentar resistência à compressão média superior a 2,0 MPa e nenhum valor individual inferior a 1,7 MPa, aos sete dias da moldagem. Além disso, a absorção de água média não deve ser superior a 20% e nem valores individuais superiores a 22%, aos sete dias.

O bloco de terra comprimida (BTC) é um componente da alvenaria fabricado com terra adensada. A produção deste tipo de material foi impulsionada após o desenvolvimento da prensa manual, denominada CINVA-RAM, (Figura 1), criada pelo Centro Internacional de Viviendas y Planeamiento, em 1959. Atualmente, ainda é um equipamento muito utilizado para fabricação de BTC. Prensas manuais geralmente requerem baixo custo de aquisição e manutenção, além de serem leves, pequenas e fáceis de usar (GOULART, 2009).

Figura 1 - Prensa manual CINVA-RAM para BTC



Fonte: Adaptado Goulart (2009)

O BTC é constituído basicamente de terra e pode ser estabilizado física ou quimicamente para melhorar suas propriedades físico-mecânicas além da durabilidade. A estabilização física consiste na mistura de proporções de diferentes terras para melhor distribuição granulométrica proporcionando um maior empacotamento de partículas. Na estabilização química é necessário a utilização de um aditivo químico à terra (NEVES e FARIA, 2011).

Para fabricação do BTC, segundo Goulart (2009), recomenda-se que o solo deve ser isento de matéria orgânica, com a seguinte composição:

- areia: partículas com \varnothing entre 0,06mm e 6mm e quantidade entre 40 a 90% da mistura;
- silte: partículas com \varnothing entre 0,002mm e 0,06mm e quantidade até 20% da mistura;
- argila: partículas com \varnothing inferior a 0,002mm e quantidade entre 5 a 35% da mistura;
- matéria orgânica: limite máximo de 2% da mistura.

Em relação à plasticidade, o solo deve apresentar limite de liquidez (LL) $\leq 45\%$ e índice de plasticidade (IP) $\leq 18\%$ (GOULART, 2009).

Antes da moldagem dos blocos, a terra deve ser destorroada, peneirada e, se necessário, seca. Após esse processo, é adicionado o aglutinante, no caso de estabilização química, mistura-se os materiais secos até se obter uma coloração uniforme e posteriormente é adicionada a água até atingir o ponto de umidade ideal. Com a massa preparada a moldagem é realizada por meio da prensagem manual ou mecânica. A Tabela 1 apresenta a energia de compactação e produtividade de algumas prensas (NEVES e FARIA, 2011).

Tabela 1 - Energia de compactação e produtividade

Tipo de prensa		Energia de compactação (MPa)	Produção (BTC/dia)
Manual	Mecânica	1,5-2,0	300 a 1200
	Hidráulica	2,0-10,0	2000 a 2800
Motorizada	Mecânica	4,0-24,0	1600 a 12000
	Hidráulica	>20,0	2000 a 4000

Fonte: Adaptado Neves e Faria (2011)

A cura, para blocos moldados com cimento, deve ser úmida feita por meio de molhagens sucessivas para permitir a continuidade do processo de hidratação do cimento (NEVES e FARIA, 2011).

2.2. Cinzas de eucalipto

Atualmente, a biomassa, principalmente o bagaço de cana, carvão vegetal e madeira, representa cerca de 25% do total de fontes renováveis no Brasil. Apenas a madeira corresponde a 8,2% do total da matriz energética brasileira (ENERGIA, 2015). O uso madeira reflorestada contribui para a sustentabilidade, uma vez que reduz as emissões dos gases do efeito estufa, pois é uma alternativa à utilização dos combustíveis fósseis para geração de energia (ANDRADE LOPES *et al.*, 2016).

Entre as madeiras utilizadas para geração de energia, pode-se citar o eucalipto. Várias indústrias utilizam a madeira de eucalipto em suas caldeiras como fonte de energia, seja na forma de lenha, resíduos ou processadas (RESENDE, 2013).

As cinzas da madeira e casca de eucalipto são consideradas ricas em elementos minerais. As principais características da cinza de eucalipto são altos teores de cálcio, potássio, magnésio e fósforo além de baixos teores de nitrogênio. A principal diferença entre as cinzas provenientes da casca e da madeira é a concentração de minerais, sendo que as cinzas das cascas são mais ricas em nutrientes do que as da madeira. Entretanto a composição química das cinzas é muito variável, sendo impossível considerar um valor médio com pequenas variações para as concentrações dos elementos presentes nas cinzas (FOELKEL, 2011).

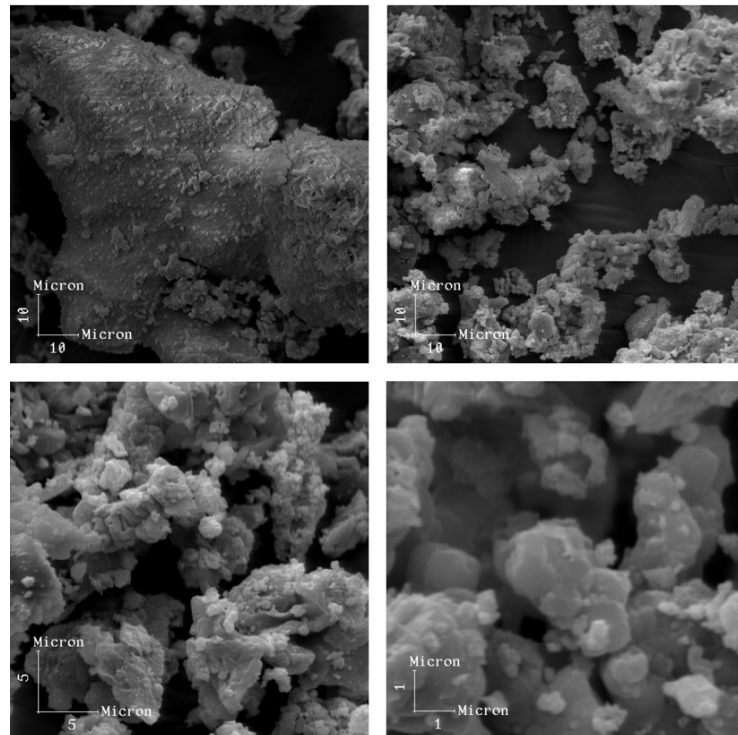
Outro fator importante para a qualidade das cinzas é a temperatura de combustão. Considera-se que o valor ideal para a queima da madeira seja acima de 800°C-900°C, uma vez que após essa temperatura uma maior quantidade de carbonato é dissociada em óxidos e também há maior volatilização de potássio, enxofre, cobre, boro, sódio e nitrogênio. A umidade também está diretamente relacionada com a qualidade da cinza. Madeiras com alta umidade promovem uma combustão incompleta, perda de eficiência do combustível e aumento da geração de cinzas. Outros fatores ainda podem ser associados à qualidade da cinza resultante, como as dimensões das partículas, contaminações e misturas de diferentes tipos de materiais (FOELKEL, 2011).

Gluitz e Marafão (2014) analisaram a cinza de eucalipto de uma indústria de secagem e armazenamento de grãos localizada na cidade de Francisco Beltrão-PR. Na caracterização química da cinza foram utilizados a espectroscopia na região do infravermelho (FTIR), a difratometria de raios X (DRX) e a perda ao fogo. Em relação a FTIR, os autores verificaram a presença de calcita, um dos polimorfismos do carbonato de cálcio, no pico mais expressivo além de silício, caulinita e hidroxila. Já na DRX o pico mais relevante é associado ao carbonato de cálcio, mas também foi observada a presença de hidróxido de cálcio e óxido de silício. Para análise da perda ao fogo a amostra foi submetida ao forno mufla à 550°C por 2 horas e, a partir disso, verificou-se que a porcentagem de matéria orgânica presente na cinza era cerca de 15,96% em média.

Borlini *et al.* (2005) estudaram cinzas de eucalipto da indústria de cerâmica vermelha do município de Campos dos Goytacazes-RJ. A cinza foi caracterizada em relação a sua composição química e mineralógica, perda ao fogo, distribuição de tamanho de partículas, análise térmica e microscopia eletrônica de varredura. A

composição química foi caracterizada pela alta concentração de CaO e SiO₂ e com quantidades significativas de K₂O e MgO. Em relação à análise mineralógica destaca-se o carbonato de cálcio como principal fase cristalina e ainda se observa a presença de quartzo, hidróxido e fosfato de cálcio. O material apresentou perda ao fogo de 21,5% em relação ao peso. Pela microscopia pode-se observar diferentes formatos de partículas e estrutura bastante porosa do material, conforme Figura 2.

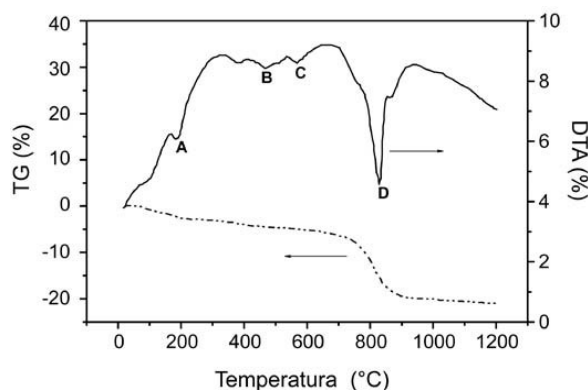
Figura 2 – Microscopia eletrônica de varredura das cinzas de eucalipto



Fonte: Borlini (2005)

A distribuição granulométrica apresentou o tamanho médio dos aglomerados de partículas de 0,15mm. Contudo, os próprios autores consideraram a técnica de peneiramento e sedimentação empregada para determinação do tamanho das partículas não adequada, uma vez que só foi possível identificar o tamanho dos aglomerados e não das partículas em si. Em relação à análise térmica os ensaios de termogravimetria e termodiferencial resultaram em quatro picos endotérmicos relevantes, conforme Figura 3.

Figura 3 - Curva termogravimétrica (TG) e termodiferencial (DTA)



Fonte: Borlini (2005)

O pico A foi relacionado à perda de água adsorvida, o B à desidratação do sulfato de magnésio, o C à transformação alotrópica do quartzo- α em quartzo- β e o D à decomposição do carbonato de cálcio.

Guerrero *et al.* (2005) e Guerrero *et al.* (2008), em seus estudos sobre cinzas de biomassa, avaliaram cinzas de eucalipto coletadas a partir da espécie *Eucalyptus Globulus Labill* na estação florestal localizada em Cedeira, na Espanha. A partir do eucalipto produziu-se a cinza e esta foi caracterizada em relação à composição química, análise térmica e microscopia eletrônica. Em relação à composição química observou-se que o principal componente presente na cinza é o CaO (~56%) seguido do MgO (~14%) e SiO₂ (~11%). Na análise térmica pode-se destacar três picos principais, o primeiro para temperaturas menores que 100°C relativos à umidade da amostra, o segundo pico à presença de CO₂ derivado de grupos carbonila, hidroxila e oxigênio do tipo éter. O último pico é relativo à presença de CO derivado de grupos carboxila e lactona. Em relação à microscopia, pode-se notar que quanto maior a taxa de aquecimento da cinza maiores são as modificações da morfologia original, uma vez que as cavidades internas são maiores e a porosidade também.

2.3. Rejeito de mineração

O ferro é o quarto elemento mais abundante da crosta terrestre, superado apenas pelo oxigênio, silício e alumínio. Sua obtenção, industrialmente, só é possível a partir de substâncias minerais. Os principais minerais portadores de ferro são: magnetita, hematita e goethita, pois apresentam maior teor do elemento em sua composição (CARVALHO *et al.*, 2014).

No Brasil, as principais regiões produtoras de minério de ferro são o Quadrilátero Ferrífero, a Província Mineral de Carajás e a região de Corumbá devido à maior concentração de reservas nestes locais (CARVALHO *et al.*, 2014). Segundo o Sumário Mineral de 2015, o Brasil detém 11,9% das reservas de ferro do mundo e é o terceiro maior produtor mundial de ferro com 12,8% da produção, cerca de 411.182.786 toneladas (DNPM, 2015).

Para obtenção do minério de ferro, o material retirado de rochas passa por um processo de beneficiamento que consiste na preparação granulométrica, concentração ou purificação por métodos físicos ou químicos sem alteração da constituição química dos minerais (WOLFF, 2009).

O beneficiamento do minério de ferro é usualmente realizado por métodos gravíticos, magnéticos e por flotação. Os métodos gravíticos se baseiam na diferença de densidade entre os materiais e podem ser feitos por jigues ou espirais concentradoras. A separação magnética utiliza a atração magnética dos minerais para sua distinção. A separação pode ser de alto ou baixo campo, dependendo do tipo de equipamento empregado. A flotação, por sua vez, se baseia na diferença de polaridade das partículas para promover a concentração dos minerais (LUZ e LINS, 2010).

Idealmente, todo produto lavrado deveria ser aproveitado economicamente. Entretanto isso não ocorre, visto que, após o beneficiamento do minério bruto gera-se um concentrado e um rejeito. Sendo assim, o rejeito da mineração é um resíduo do processo de beneficiamento, que teoricamente apresenta baixo teor do mineral de interesse. Contudo, em alguns processos, o rejeito apresenta teores significativos do mineral devido a procedimentos inadequados ou falta de tecnologia viável (WOLFF, 2009).

A baixa eficiência do beneficiamento, além de gerar perdas financeiras, leva a um aumento do volume de rejeitos que serão dispostos no meio ambiente, aumentando o impacto ambiental da atividade (WOLFF, 2009). A minimização dos impactos ambientais é viável, segundo Fernandes (2005), através da reciclagem dos resíduos de minério de ferro, resultando na redução de bota-foras, do desmatamento e de frentes de lavra para a exploração de materiais granulares tradicionais. Os rejeitos de minério de ferro apresentam uma grande heterogeneidade em suas

características em função das diferenças do processo de beneficiamento do minério, do tipo de minério bruto ou mesmo da variabilidade das frentes de lavra (SILVA, 2010).

O rejeito de mineração é constituído pela presença bem definida de uma fração líquida e uma sólida. A fração sólida é formada por partículas com granulometria fina e concentração típica de 30% a 50% em peso (WOLFF, 2009; SILVA, 2010).

Em relação à classificação granulométrica verifica-se que há algumas discordâncias entre os autores. Entretanto, a indústria de mineração frequentemente adota a seguinte classificação para os rejeitos: rejeitos grossos ou granulares com partículas maiores do que 0,074mm e rejeitos finos ou lamas com diâmetros de partículas abaixo de 0,074mm (IBRAM, 2016).

A granulometria é um importante parâmetro de controle para o processo de beneficiamento do minério visto que, no alto forno, partículas finas, inferiores a 8mm, limitam a velocidade dos gases ascendentes que alimentam a combustão, comprometendo a queima e reduzindo a velocidade (WOLFF, 2009).

Outro importante fator no beneficiamento do minério são os teores de alguns elementos que são considerados indesejados na produção do aço. Geralmente, a sílica, o fósforo, a alumina e o manganês causam efeitos indesejados. O fósforo pode tornar o aço quebradiço, enquanto a alumina e o manganês podem diminuir sua ductilidade (WOLFF, 2009). De acordo com a Norma Europeia EN 10020 (BS, 2000), os teores máximos destes elementos no aço são: alumina 0,10%, manganês 1,65%, sílica 0,30% e fósforo 0,05%.

Huang *et al.* (2013) estudaram a adição de rejeito de mineração como agregado para o desenvolvimento de compósitos cimentícios. Para a caracterização do rejeito realizaram análises químicas e granulométricas. Como resultado obtiveram a composição química do rejeito consistindo basicamente em óxidos de silício, de alumínio e de ferro, com o óxido de alumínio sendo o composto mineral mais relevante, conforme Tabela 2. A granulometria do rejeito sem nenhum tratamento adicional foi constituída de partículas majoritariamente abaixo de 300µm.

Tabela 2 - Composição química rejeito de minério de ferro (%)

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
69,52	4,14	7,44	3,72	8,13	1,38	1,97	0,03

Fonte: HUANG *et al.* (2013)

Hernandez *et al.* (2005) analisaram a reologia de pastas a base de rejeito de mineração e cimento para preenchimento de fissuras em barragens. Duas amostras foram coletadas para a caracterização. A amostra 1 apresentou 30,81% de ferro e 52,35% de SiO₂ por meio da análise química enquanto a amostra 2 é constituída de 51,67% de ferro e 9,65% de SiO₂. A perda ao fogo se mostrou maior para a amostra com maior porcentual de ferro, sendo 0,46% para amostra 1 e 6,63% para amostra 2. Na análise granulométrica, a amostra 1 apresentou 100% das partículas com diâmetro menor ou igual a 206 µm e 50% abaixo de 72 µm. A amostra 2 se mostrou mais fina uma vez que 100% das partículas apresentaram diâmetro menor ou igual a 21 µm e 50% menor que 4,3 µm. As pastas utilizadas no trabalho apresentaram comportamentos distintos quanto à reologia. Enquanto a pasta baseada na amostra 1 apresentou um comportamento totalmente reotrópico, a pasta da amostra 2 apresentou um comportamento de fluidez mista, sendo tixotrópico quando havia baixo teor de sólidos e reotrópico em altos teores de sólidos.

Zhao *et al.* (2014) utilizaram o rejeito de mineração como agregado para desenvolvimento de concreto de alta performance. O rejeito apresentou em sua constituição principalmente sílica, seguido de alumina, óxido de cálcio e óxido de ferro. O tamanho das partículas no material analisado está entre 0,003 a 0,5mm. Quanto ao concreto, verificou-se que a substituição de 100% do agregado natural pelo rejeito de mineração reduziu significativamente a trabalhabilidade e resistência à compressão do material. Entretanto, quando o nível de substituição não foi superior a 40%, durante cura padrão de 90, o comportamento mecânico foi comparável ao do concreto de controle.

2.4. Ativação alcalina

Ligantes obtidos por ativação alcalina são aqueles sintetizados a partir de materiais aluminossilicatos em soluções altamente alcalinas. Estes ligantes são considerados mais sustentáveis que o clínquer por apresentarem um nível de emissão de dióxido de carbono inferior àquele emitido na produção do clínquer.

Materiais ativados alcalinamente apresentam outras vantagens, como uma alta resistência aos esforços mecânicos, gradientes de temperatura e ataques químicos sendo, portanto, considerados mais duráveis que o concreto obtido a partir do cimento Portland (TORGAL e JALALI, 2010).

Os ligantes obtidos por ativação alcalina foram primeiramente estudados por Purdon na década de 40, que utilizou escórias ativadas alcalinamente com hidróxido de sódio. Contudo, foi Glukhovsky, em 1959, que analisou os ligantes utilizados em construções históricas e pôde concluir que estes ligantes eram compostos de aluminossilicatos de cálcio hidratados semelhante ao que ocorre no cimento Portland hidratado (TORGAL e JALALI, 2010).

As pesquisas sobre esse assunto ganharam visibilidade e interesse da comunidade científica após descobertas do pesquisador Davidovits, em 1979, que desenvolveu e patenteou ligantes obtidos de ativação alcalina a partir de caulim e metacaulim, além de criar o termo “geopolímero” (TORGAL e JALALI, 2010).

Segundo Torgal e Jalali (2010) qualquer material composto por sílica e alumina pode ser ativado alcalinamente. Materiais como argilas cauliníticas (BARBOSA *et al.*, 2000), metacaulim (PALOMO *et al.*, 1999), cinzas volantes (PUERTAS *et al.*, 2000; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ e PALOMO, 2003; VAN JAARSVELD *et al.*, 2003; BAKHAREV, 2005; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ e PALOMO, 2005; TEMUUJIN *et al.*, 2009; WINNEFELD *et al.*, 2010; VENUGOPAL e SASALATTI, 2016), escórias de alto forno (BAKHAREV *et al.*, 1999; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ *et al.*, 1999; PUERTAS *et al.*, 2000; BROUGH e ATKINSON, 2002) já foram estudados como precursores para os ligantes.

De acordo com Xu e Van Deventer (2000), a porcentagem de CaO e de K₂O e a razão Si/Al no material base para ativação apresentam correlação com a resistência mecânica do produto final. Fernández-Jiménez e Palomo (2003) elegeram os parâmetros mais significativos para reatividade do material ao ser ativado alcalinamente, entre eles estão: o teor de sílica reativa, o teor da fase amorfa, a distribuição granulométrica e o baixo teor de cálcio.

Embora estes autores afirmem que o teor de cálcio e ferro não contribuem para o ganho de resistência por não participarem das reações principais, Van Jaarsveld *et al.* (2003), em seu estudo com cinzas volantes contendo cálcio, afirmaram que a

presença deste elemento contribui para maiores resistências à compressão devido à formação de aluminatos de cálcio hidratado e outros compostos de cálcio.

Os produtos da ativação alcalina dependem dos precursores e ativadores utilizados (ISMAIL *et al.*, 2014; PROVIS e BERNAL, 2014). Segundo Provis *et al.* (2015), precursores com alto teor de cálcio têm como principal produto da geopolimerização o aluminossilicato de cálcio hidratado (C-A-S-H) com estrutura semelhante a tobermorita, enquanto os precursores com baixo teor de cálcio tendem a formar aluminossilicatos álcalis (N-A-S-H) com alta densidade de ligações cruzadas. O aluminossilicato de cálcio hidratado (C-A-S-H) apresenta picos característicos na difração de raios X por volta de $29,06^\circ$ e morfologicamente apresenta estrutura pouco cristalina (KAPELUSZNA *et al.*, 2017). Além disso, o C-A-S-H está diretamente relacionado à resistência mecânica dos materiais álcalis ativados (PUERTAS *et al.*, 2011).

Outro produto que pode ser obtido a partir da ativação alcalina são as zeólitas. Zeólitas são materiais aluminossilicatos com estrutura tetraédrica e fórmula química $\text{Na}_{96}\text{Al}_{96}\text{Si}_{96}\text{O}_{384}27\text{H}_2\text{O}_2$. Estes aluminossilicatos despertam grande interesse da comunidade científica por apresentarem uma larga aplicação industrial. Devido a sua estrutura e conseqüente capacidade de troca iônica, este material é usualmente utilizado como catalizador, adsorvente e purificador (RIGO *et al.*, 2009; SANTANA *et al.*, 2012). As zeólitas também são utilizadas na construção civil desde a antiguidade devido às suas propriedades físicas (COLELLA *et al.*, 2001).

Estes materiais são tradicionalmente obtidos a partir da caulinita através de processos térmicos que atingem até 800°C . Há também a zeólita do tipo A, que pode ser formada em temperaturas mais baixas, cerca de 100°C (KRÓL *et al.*, 2016).

2.4.1. Composição dos ativadores alcalinos

Davidovits (1999), utilizando um material com alto grau de pureza, denominado *kandoxi*, recomendou o uso das seguintes razões molares para otimizar a resistência mecânica e durabilidade dos materiais alcalinamente ativados: no precursor – $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ entre 3,5 e 4,5; $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ entre 0,2 e 0,48; $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ entre 10 e 25 e no ativador: $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}=1,85$. Contudo, como este estudo foi muito específico,

muitos pesquisadores consideram relativos os valores referentes às razões molares relacionadas ao material precursor e dificilmente adaptáveis para outros materiais, como cinzas volantes e escórias de alto forno (TORGAL e JALALI, 2010).

Os ativadores mais utilizados para ativação alcalina são uma combinação de hidróxido de sódio (NaOH) com silicato de sódio ($n\text{SiO}_2\text{Na}_2\text{O}$). Alguns autores utilizaram ativadores sem silicatos e concluíram que não são tão eficazes como tal combinação (BAKHAREV *et al.*, 1999; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ *et al.*, 1999; PALOMO *et al.*, 1999).

Xu e Van Deventer (2000) afirmaram que a adição do silicato em uma solução de hidróxido acelera a dissolução dos precursores e fornece Si suficiente para iniciar a reação, uma vez que a maioria dos materiais não possui concentração necessária para isso. O hidróxido de sódio, segundo Puertas *et al.* (2000), está relacionado com o desenvolvimento de resistência mecânica do material, dependendo da concentração.

Hardjito *et al.* (2002) afirmaram que a razão $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ do ativador não influencia na resistência mecânica do material alcalinamente ativado. Kirschner e Harmuth (2004) concluíram que a resistência aumenta quando se diminui a razão $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$.

Fernández-Jiménez *et al.* (1999) estudaram argamassas de escórias de alto forno ativadas alcalinamente e concluíram que os fatores que influenciam a resistência do material são a concentração do ativador, temperatura de cura, área superficial da escória e natureza do ativador. Estes pesquisadores afirmam ainda que a concentração ideal é cerca de 3 a 5% de Na_2O por massa de escórias para se evitar as eflorescências. Bakharev *et al.* (1999) obteve maior resistência para argamassas de escória ativadas com silicato de sódio e hidróxido de sódio com 8% de Na_2O . Fernández-Jiménez e Palomo (2005) utilizaram concentrações de 5 a 15% de Na_2O em relação a massa de cinzas volantes para ativação de argamassas com silicato de sódio e hidróxido de sódio e obtiveram a maior resistência com 14% de Na_2O .

Em relação à cura, a temperatura foi relatada como fator contribuinte para o aumento da resistência mecânica destes materiais. Brough e Atkinson (2002), estudando escórias ativadas com silicato de sódio obtiveram resistências similares

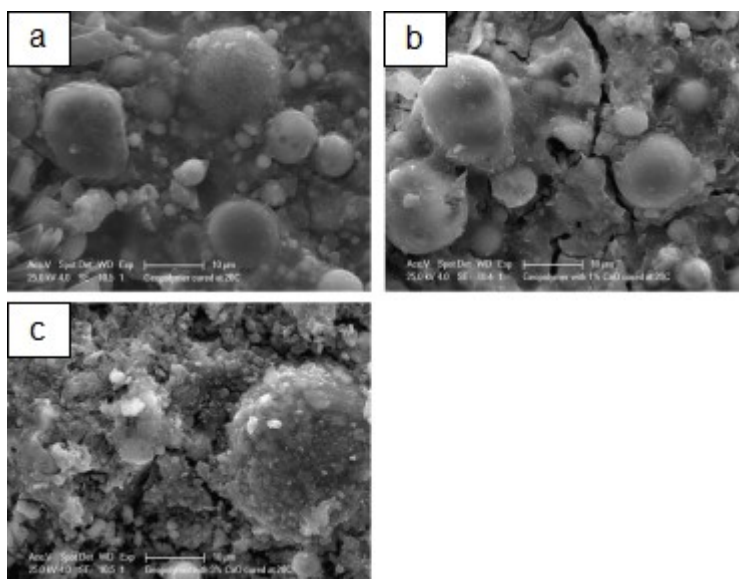
para corpos de prova curados a 80°C durante 12 horas e em temperatura ambiente durante 28 dias. Para Bakharev (2005) a temperatura é um importante fator para ativação de cinzas volantes, pois estas possuem uma barreira de ativação que deve ser superada para que as reações se iniciem.

2.5. Materiais de construção com ativação alcalina e cinzas com alto teor de cálcio

Temuujin *et al.* (2009) estudaram o efeito de compostos de cálcio presentes em cinzas volantes nas características mecânicas de geopolímeros e concluíram que eles tem efeito positivo quando as amostras são curadas à temperatura ambiente. Entretanto existe uma redução da resistência à compressão quando as amostras são curadas a 70°C, uma vez que, nestas condições de cura, apresentam menor densidade e maior porosidade, pois a água presente na matriz geopolimérica evapora mais rapidamente com a cura em temperaturas mais elevadas.

A presença de óxido de cálcio favorece a microestrutura mais homogênea se comparada com misturas sem cálcio, em que nota-se a presença de esferas de cinzas volantes parcialmente reagidas, conforme Figura 4, em que (a) não há presença de cálcio, (b) adição de 1% de CaO, (c) adição 3% de CaO . O aumento do teor de cálcio reflete em uma microestrutura mais compactada e com presença de cristais menores, o que indica que o CaO age como um elemento precipitador. Temuujin *et al.* (2009) também destacam que a presença de Ca(OH)_2 é mais benéfica que CaO em termos de resistência à compressão, concluindo que o Ca(OH)_2 é o constituinte reativo em misturas geopoliméricas, uma vez que a hidratação incompleta do CaO em meio alcalino para formação de Ca(OH)_2 resulta em resistências à compressão cerca de 20% inferiores.

Figura 4 – Microscopia eletrônica de varredura do geopolímero curado a temperatura ambiente



Fonte: Temuujin *et al.* (2009)

Cristelo *et al.* (2012), utilizando um solo com alto teor de carbonato de cálcio oriundo da região da Leiria em Portugal, compararam a resistência à compressão de amostras contendo cinzas do tipo C (com alto teor de cálcio) e do tipo F (com teor de cálcio inferior a 5%). Após uma semana de cura, as misturas com 20% de cinzas do tipo C apresentaram resistência à compressão superior às misturas com 20% de cinza do tipo F, entretanto, ao final da 12ª semana, as misturas com 20% de cinza do tipo F apresentaram resistência à compressão 190% maiores do que as de cinza do tipo C.

Winnefeld *et al.* (2010), em seu estudo comparando a viabilidade de materiais cimentícios utilizando cinzas com alto e baixo teor de cálcio, concluíram que a fase amorfa é mais presente em cinzas com baixo teor de cálcio, o que favorece sua reatividade. Foi observada também uma rápida perda de trabalhabilidade acompanhada de um aumento de temperatura nas argamassas com alto teor de cálcio devido à reação precoce da cal livre presente na cinza. Desta forma, para melhorar a trabalhabilidade da pasta foi necessário o aumento da relação água/ativador, implicando em um aumento da porosidade da argamassa e redução da resistência à compressão. Sendo assim, cinzas com alto teor de cálcio não foram consideradas como melhor alternativa para produção de materiais cimentícios.

2.5.1. Blocos compactados com cinzas vegetais e ativação alcalina

Venugopal e Sasalatti (2016), utilizando uma combinação de cinzas volantes com baixo teor de cálcio e escórias de alto forno (na proporção 80:20), areia e ativação alcalina de hidróxido de sódio e silicato de sódio, obtiveram uma argamassa alcalinamente ativada que serviu de base para confecção de blocos compactados para alvenaria. Os blocos foram curados a temperatura ambiente sem nenhum tratamento especial. O traço que apresentou menor absorção de água (8,5%) e maior resistência à compressão (2,70 MPa) consistia na proporção hidróxido: silicato igual a 1:2.5. Os resultados do ensaio de resistência à compressão foram realizados após 28 dias da confecção dos blocos.

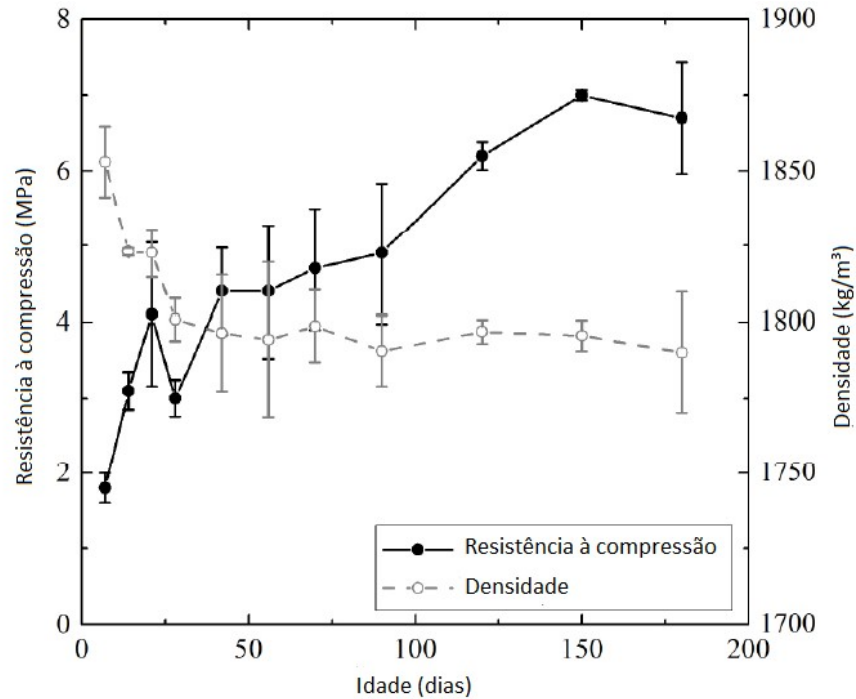
Chen *et al.* (2012) utilizaram cinzas de carvão constituídas majoritariamente por SiO_2 e Al_2O_3 para confecção de blocos compactados alcalinamente. Cerca de 60% das cinzas se apresentava na forma amorfa e com perda ao fogo igual a 1,7%. Como ativador foram utilizados: hidróxido de sódio, silicato de sódio, hidróxido de potássio e hidróxido de lítio em concentrações de 5 mol/L e 10 mol/L. Os blocos foram moldados de forma mecânica e curados a 40°C e 100% de umidade. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados aos 3, 7, 14 e 28 dias. As maiores resistências foram obtidas para a ativação com hidróxido de sódio (10 mol/L), seguida pelo silicato de sódio ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 1,5$), chegando a atingir, aos 28 dias, mais de 20MPa.

Silva *et al.* (2015) estudaram cinzas provenientes de uma planta de termoelétrica para produção de material álcali ativado. Associado às cinzas, foi adicionado o solo da região para confecção dos blocos compactados. Para a ativação alcalina foram utilizados o hidróxido de sódio e silicato de sódio na proporção 2:1. Foram feitos dois traços, o primeiro com 10% de cinza e o segundo com 15%. Ambos foram moldados em prensa manual e curados nas condições ambientes do laboratório, o que resultou na ocorrência de algumas eflorescências devido à carbonatação do sódio. Como resultado para o ensaio de compressão, obteve-se 8,8 MPa para 10% de cinza e 12MPa para 15%.

Silva *et al.* (2015) em paralelo com o trabalho anterior, fixando o traço de 15% de cinza e os mesmos procedimentos, alterando-se apenas a cura do material para

18°C e 52% de umidade obteve o resultado do ensaio de resistência à compressão para 7, 14, 21, 28, 42, 56, 70, 120, 150 e 180 dias, conforme Figura 5.

Figura 5 - Resultados para BTC



Fonte: Adaptado Silva *et al.* (2015)

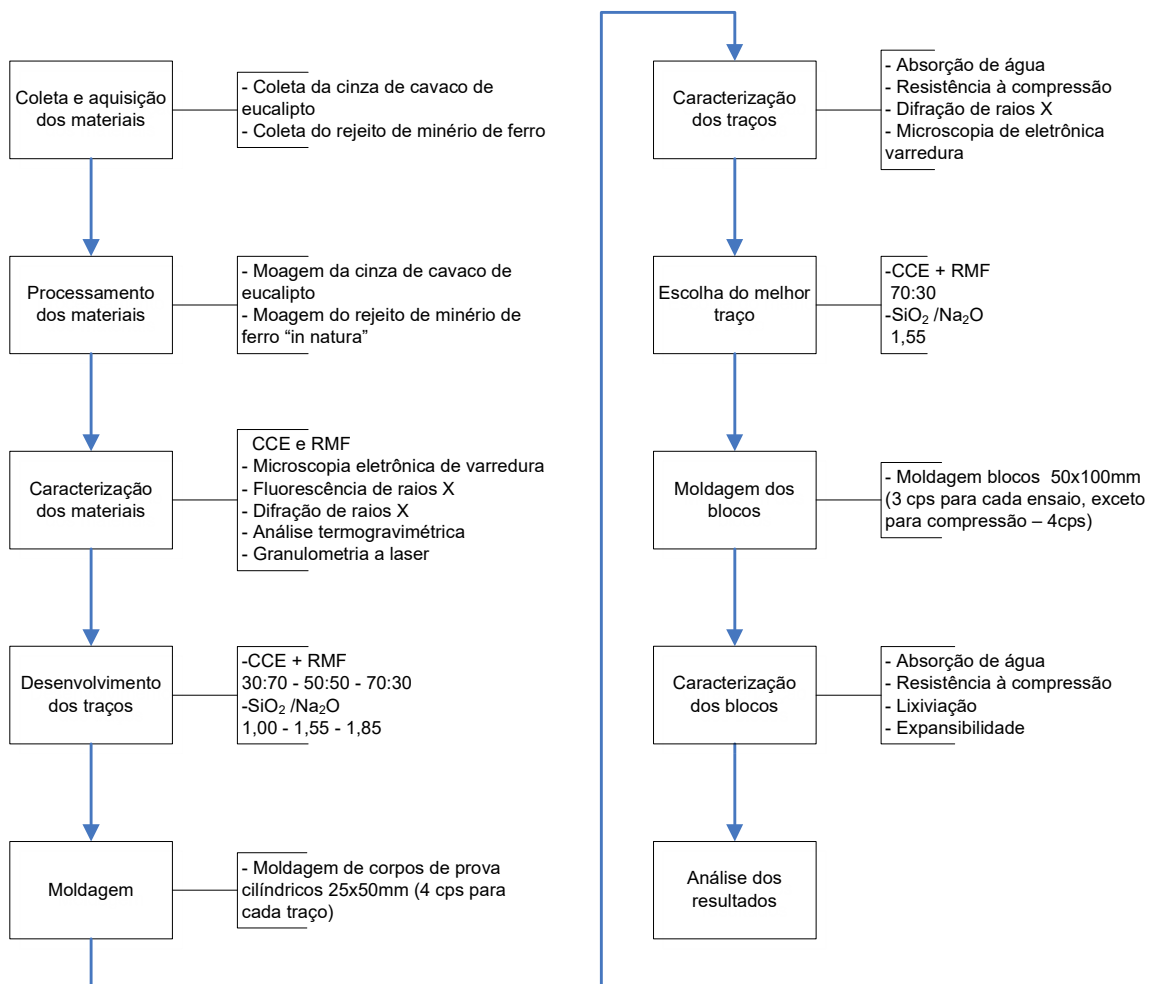
A resistência à compressão apresenta um rápido crescimento nos primeiros 21 dias, contudo há um decaimento aos 28 dias. Essa diminuição da resistência à compressão, segundo Silva *et al.* (2015), está relacionada com o processo de geopolimerização em temperatura ambiente, mas exige investigações mais profundas envolvendo análises mineralógicas. Após este período, a resistência volta a aumentar em ritmos próximos ao inicial até os 42 dias, depois desta idade o ganho de resistência é mais constante até os 90 dias. A resistência ainda aumenta até os 150 dias e depois se estabiliza. A resistência máxima foi obtida próxima dos 120 dias, o que é bem distante da referência tipicamente utilizada aos 28 dias para materiais cimentícios conforme norma NBR 7215 (ABNT, 1996).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa pode ser classificada, quanto a sua natureza, como aplicada e explicativa segundo os objetivos. Quanto aos procedimentos técnicos é classificada como experimental e em relação à abordagem utilizada é quantitativa (PRODANOV e DE FREITAS, 2013).

Na Figura 6 é apresentado o fluxograma experimental das atividades do trabalho com todas as etapas de beneficiamento da cinza de cavaco de eucalipto (CCE) e rejeito de minério de ferro (RMF) para a produção dos blocos.

Figura 6 - Fluxograma das atividades



Fonte: Própria autora

3.1. Materiais

Todos os materiais utilizados para desenvolvimento do trabalho estão listados a seguir, com seus respectivos fornecedores.

3.1.1. Cinzas de cavaco de eucalipto

As amostras de cinza de cavaco de eucalipto foram coletadas de filtros mangas na planta industrial da Nestlé S/A, em Ibiá-MG. A cinza é um resíduo das caldeiras utilizadas na fábrica e são recolhidas pelo filtro manga. Após passarem pelo filtro, as cinzas são coletadas por funis acoplados à estrutura.

As cinzas foram coletadas em bombonas de polietileno com capacidade de 50 litros. Após a fase de coleta, as cinzas foram moídas e posteriormente armazenadas em embalagens plásticas impermeáveis à umidade, com capacidade de 5 litros.

3.1.2. Rejeito de minério de ferro

As amostras do rejeito de mineração foram coletadas de hidrociclones desaguadores chamados EvoWash, na mina de Pau Branco, localizada na região metropolitana de Belo Horizonte, pertencente à Vallourec Unidade Mineração.

O resíduo é proveniente do processo de separação magnética de alta intensidade e foi coletado em bombonas de polietileno impermeáveis à umidade com capacidade de 50 litros. Após a fase de coleta do rejeito, ele foi seco em estufa por 24 horas e posteriormente moído e armazenado em embalagens plásticas impermeáveis à umidade, com capacidade de 5 litros.

3.1.3. Hidróxido de sódio

O hidróxido de sódio adotado no trabalho apresenta-se na forma de micropérolas e é fabricado pela SIGMA ALDRICH. A concentração informada pelo fabricante é de 99% e a massa molar 40g/mol. As propriedades físicas e químicas do hidróxido de sódio estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades físicas e químicas hidróxido de sódio

<i>Propriedades</i>	<i>Resultado</i>
<i>Estado físico</i>	Micropérolas
<i>Cor</i>	Branco
<i>Odor</i>	Inodoro
<i>pH</i>	14 em 59g/L 20°C
<i>Ponto de fusão</i>	323°C
<i>Densidade relativa</i>	2,13g/cm ³ a 20°C
<i>Solubilidade em água</i>	1090 g/L a 20°C

Fonte: Sigma Aldrich, 2015

3.1.4. Silicato de sódio

O silicato de sódio utilizado no trabalho se encontra na forma líquida e recebe o nome comercial de silicato de sódio alcalino C112 fornecido pela empresa Imperial Química e Representações LTDA. Segundo laudo de análise química do fabricante, o material apresenta relação $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}=2,2$ e peso molecular de 194 g/mol. As propriedades do material fornecidas pelo laudo estão transcritas na Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades físicas e químicas silicato de sódio

<i>Propriedades</i>	<i>Resultado</i>
<i>Estado físico</i>	Líquido
<i>Cor</i>	Incolor
<i>Odor</i>	Inodoro
<i>Na₂O</i>	14,99%
<i>SiO₂</i>	32,20%
<i>Massa específica</i>	1,576 g/cm ³
<i>pH</i>	11,42

Fonte: Imperial Química e Representações LTDA, 2016

3.1.5. Aditivo superplastificante

O superplastificante utilizado foi o Silicon ns high 400 da marca Silicon – alto desempenho em concretos. O aditivo é formado à base de policarboxilatos modificados com nanosílica estabilizada. A Tabela 5 apresenta as características físicas e químicas do superplastificante Silicon ns high 400.

Tabela 5 - Propriedades físicas e químicas superplastificante Silicon ns high

<i>Propriedades</i>	<i>Resultado</i>
<i>Aspecto</i>	Líquido homogêneo
<i>Cor</i>	Mel
<i>pH</i>	3,0±1,0
<i>Massa específica</i>	1,09±0,02 g/cm ³
<i>Teor de cloretos</i>	<0,15%

Fonte: Silicon, 2017

3.1.6. Areia normal

O agregado miúdo adotado na pesquisa foi a areia normal fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). Foram utilizadas as areias das seguintes granulometrias: 0,3 mm (média fina) e 0,15mm (fina).

3.2. Métodos

Os experimentos foram realizados nos laboratórios dos Departamentos de Engenharia de Transportes, Engenharia Química e Engenharia Civil do CEFET-MG. O ensaio de fluorescência foi realizado pela empresa SGS Geosol.

As cinzas de eucalipto foram moídas em planetário da marca FRITSCH modelo Pulverisette 5, composto por 4 estações de trabalho com capacidade de 500 ml cada. Tanto o recipiente de moagem como as esferas utilizadas são compostas por óxido de zircônio, 96,2% ZrO₂, com densidade 5,7g/cm³. Para a moagem das cinzas foram utilizadas 25 esferas com diâmetro de 20 mm por 10 min, com velocidade de 300 rpm e 130 g de cinza. Na moagem do rejeito foram utilizadas 18 esferas com diâmetro de 20 mm por 10 min à velocidade de 300rpm e 250 g de rejeito.

3.3. Caracterização da cinza de eucalipto e rejeito de mineração

Para identificação da composição mineralógica das fases cristalinas dos resíduos foi utilizada a técnica de difração de raios X (DRX). O ensaio foi realizado com o equipamento da marca SHIMADZU, modelo XRD-7000, com tubo de raios X de cobre (Cu) com tensão de 40,0 kV e corrente elétrica de 30,0 mA, com varredura de por passo de 0,02θ variando de 5 a 80° na velocidade de 5s/passos.

A composição química da cinza foi determinada pelo espectrômetro de fluorescência de Raios X Axios Fast, da marca Panalitycal, enquanto a do rejeito foi realizada pelo Axios da mesma marca. Ambas as amostras foram fundidas com tetraborato de lítio. O ensaio de fluorescência foi realizado pela empresa SGS Geosol, cujo laboratório está localizado na região metropolitana de Belo Horizonte. Os equipamentos utilizados nos ensaios foram diferentes por uma questão de logística do laboratório.

A análise da morfologia das partículas foi feita através do microscópio eletrônico de varredura (MEV) de baixo vácuo da marca Hitachi, modelo TM 3000, com detectores de elétrons retroespalhados, do laboratório de Mecânica dos Pavimentos e Tecnologia dos Materiais do Departamento de Engenharia de Transportes (DET) do CEFET-MG. O equipamento possui capacidade de ampliação de até 30 mil vezes e aceleração variável (5kV e 15kV).

O ensaio de análise termogravimétrica (TGA) para as amostras de cinza de eucalipto e rejeito de mineração foram analisadas no Laboratório de Análises Térmicas do Departamento de Química do CEFET-MG, no analisador térmico da marca SHIMADZU DTG – 60H.

Para determinar a distribuição granulometria e diâmetro médio de partículas do rejeito e das cinzas foi utilizado o equipamento Cilas 1090 Laser Particle Size Analyzer, do laboratório de Manipulação Química do Departamento de Engenharia Civil do CEFET-MG. As medições foram realizadas por meio do modo de dispersão líquida do próprio aparelho e foi necessário utilizar um ultrassom durante 480 segundos para impedir a aglutinação dos grãos da amostra. O grau de obscuração utilizado para o ensaio das cinzas foi igual a 25% e o do rejeito 15%.

3.4. Dosagem dos traços

As proporções foram definidas de acordo com os resultados de um estudo piloto em que foi utilizada a proporção ideal de $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ para o ativador, proposta por Davidovits (1999), de 1,85. Além desta relação, foram testadas as proporções 2,05 e 1,55. Em todos estes traços manteve-se a relação cinza/rejeito igual a 50/50. O fator ativador/precursor e a relação precursor/agregado foram mantidos os mesmos para todos os traços, 0,7 e 1:3, respectivamente, conforme Tabela 6.

Tabela 6 - Proporções estudo piloto

Traço	CCE (%)	RMF (%)	SiO ₂ /Na ₂ O	Ativador/precursor	Plastificante
CCE50RMF50_1,55	50	50	1,55	0,7	2% da massa de precursores
CCE50RMF50_1,85	50	50	1,85		
CCE50RMF50_2,05	50	50	2,05		

Fonte: Própria autora

No estudo piloto, o parâmetro avaliado foi a resistência à compressão. Para o ensaio de resistência à compressão foram moldados quatro corpos de prova cilíndricos para cada proporção, com base em parâmetros prescritos nas exigências da norma NBR 7215 (ABNT, 1996).

Para a moldagem dos corpos de prova realizou-se a homogeneização da pasta com auxílio de um misturador mecânico. Inicialmente, os elementos secos, areia e resíduos, foram colocados na cuba do misturador mecânico e homogeneizados de forma manual com uma espátula durante 30 segundos. Posteriormente foram acrescentados os líquidos, silicato de sódio, hidróxido de sódio previamente dissolvidos em água e o plastificante. Logo após, realizou-se a mistura mecanicamente durante 1 minuto. Em seguida houve uma pausa de 15 segundos para reagregar a parte da pasta que ficou aderida às paredes da cuba e não foi suficientemente misturada. Após esse intervalo, a mistura mecânica prosseguiu por mais 1 minuto.

Diante dos melhores resultados obtidos no estudo piloto foram propostos 9 traços. Os dois melhores traços do projeto piloto foram mantidos e acrescentou-se a relação SiO₂/Na₂O = 1,00, conforme pode ser visto mais adiante na Figura 20. Nestes traços foram avaliadas a resistência à compressão e a absorção de água. Na Tabela 7 são apresentadas as proporções dos materiais dos 9 traços.

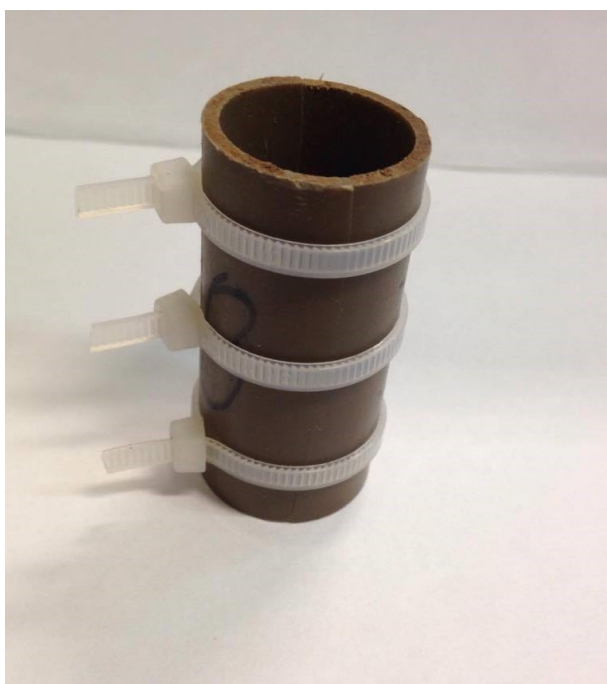
Tabela 7 - Proporções de materiais para os traços

Traço	CCE (%)	RMF (%)	SiO ₂ /Na ₂ O	Ativador/precursor	Plastificante
CCE70RMF30_1,00	70	30	1,00	0,7	2% da massa de precursores
CCE50RMF50_1,00	50	50			
CCE30RMF70_1,00	30	70			
CCE70RMF30_1,55	70	30	1,55		
CCE50RMF50_1,55	50	50			
CCE30RMF70_1,55	30	70			
CCE70RMF30_1,85	70	30	1,85		
CCE50RMF50_1,85	50	50			
CCE30RMF70_1,85	30	70			

Fonte: Própria autora

A moldagem dos corpos de prova foi realizada em moldes cilíndricos de PVC com dimensões de 25x50 (diâmetro x altura) mm. O fechamento dos moldes foi realizado com três braçadeiras de náilon, conforme Figura 7. Essas medidas foram utilizadas para manter a relação diâmetro e altura do cilindro igual a 1:2, conforme corpos de prova usualmente utilizados para ensaios de resistência à compressão de argamassas e concretos.

Figura 7 - Molde cilíndrico 25x50mm



Fonte: Própria autora

3.5. Produção dos blocos

A produção dos blocos foi realizada em um molde de aço, conforme Figura 8, e compactado na prensa EMIC à 4 MPa, como recomendado por Neves e Faria (2011). Os blocos foram produzidos nas dimensões 5x10x2,5 cm (largura x comprimento x espessura) e os parâmetros utilizados para confecção foram os mesmos da formulação mais satisfatória nos ensaios de compressão e absorção de água. Os blocos com as dimensões de 5x10x2,5 cm foram utilizados para os ensaios de absorção de água, lixiviação e expansibilidade. Para estes ensaios foram moldados 3 corpos de prova de cada traço.

Figura 8 - Molde de aço



Fonte: Própria autora

Os blocos para realização do ensaio de compressão foram moldados nas dimensões 5x10x5 cm (largura x comprimento x espessura), conforme Figura 9, adaptando-se a norma NBR 8492 (ABNT, 2012B) que estabelece a sobreposição de duas metades do tijolo. Devido à flexibilidade na altura dos blocos no método proposto, optou-se por dobrar a espessura ao invés de serrá-los ao meio.

Figura 9 - Bloco para ensaio resistência à compressão



Fonte: Própria autora

A produção dos blocos ocorreu de acordo com os requisitos específicos de moldagem da norma NBR 10833 (ABNT, 2013A) que aborda a fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento. Para o ensaio de resistência à compressão foram moldados 4 corpos de provas de cada traço.

3.6. Caracterização dos traços

A resistência à compressão dos corpos de prova foi determinada aos 7 e 28 dias. Para execução deste ensaio utilizou-se o Equipamento Universal de Ensaio da marca EMIC e os softwares TESC e Vmaq, do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e Materiais do Departamento de Engenharia de Transportes do CEFET-MG.

Antes do início do ensaio as dimensões dos corpos de prova foram inseridas no software TESC e o tipo de ensaio e velocidade de carregamento equivalente a $(0,25 \pm 0,05)$ MPa/s foram configuradas de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1996). Para garantir uma superfície plana e regular foram utilizados capeadores metálicos com neoprene evitando-se variações devido à falta de paralelismo, atrito e desvio de eixo entre os corpos de prova e os pratos da prensa.

A determinação da absorção de água foi realizada com referência na norma NBR 9778 (ABNT, 2009) – Argamassa e concreto endurecido – Determinação de absorção de água, índice de vazios e massa específica. Para a realização do ensaio os seguintes equipamentos foram utilizados: balança hidrostática, estufa, cesto metálico e tanque de água. As medidas foram feitas com a água a temperatura ambiente. Foram utilizados 4 corpos de provas de cada traço tanto para o ensaio de resistência à compressão quanto para o ensaio de absorção de água.

Foram realizadas imagens por microscopia eletrônica de varredura nos traços com o objetivo de compreender a morfologia superficial. A microscopia foi realizada com o auxílio do Microscópio eletrônico de varredura de baixo vácuo da marca Hitashi, modelo TM 3000 no laboratório de Mecânica dos Pavimentos e Tecnologia dos Materiais do Departamento de Engenharia de Transportes do CEFET-MG. Os fragmentos dos corpos de prova rompidos no ensaio de resistência à compressão dos traços foram submetidos ao MEV.

O ensaio de difração de raios X foi realizado com objetivo de avaliar e comparar a formação de diferentes fases cristalinas a partir da modificação dos constituintes dos traços. O ensaio foi realizado no mesmo equipamento utilizado para a caracterização da CCE e do RMF.

Para a preparação das amostras para esse ensaio foi necessário o processo de cominuição utilizando o moinho de bolas planetário de alto desempenho. Foram colocados 150 g de fragmentos dos corpos de prova rompidos no ensaio de resistência à compressão em cada recipiente de moagem e 12 esferas com diâmetro de 20 mm. O processo de cominuição teve duração de 10 minutos e o equipamento foi configurado com a rotação de 300 rpm.

3.7. Caracterização dos blocos

A resistência à compressão dos blocos foi determinada aos 7 e 28 dias. Para execução deste ensaio utilizou-se o Equipamento Universal de Ensaio da marca EMIC e os softwares TESC e Vmaq, do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e Materiais do Departamento de Engenharia de Transportes do CEFET-MG.

Para a determinação da resistência, a norma NBR 10836 (ABNT, 2013B) foi utilizada como referência, adaptando-se apenas o parâmetro de velocidade de

aplicação da carga para $(0,25 \pm 0,05)$ MPa/s. No ensaio de compressão dos blocos não foi realizado o capeamento dos corpos de prova, conforme Figura 10.

Figura 10 - Ensaio de resistência à compressão bloco



Fonte: Própria autora

A determinação da absorção de água dos blocos foi realizada com referência na norma NBR 10836 (ABNT, 2013B). Para a realização do ensaio os seguintes equipamentos foram utilizados: balança, estufa, e tanque de imersão. As medidas foram feitas com a água a temperatura ambiente.

O ensaio de lixiviação foi realizado conforme NEN 7375 (EA, 2004). Os procedimentos desta norma consistem na imersão dos blocos em água deionizada, conforme Figura 11, e a renovação desta água em 8 intervalos de tempo (0,25-1-2,25-4-9-16-32-64 dias). Após coletadas, as soluções foram filtradas e então realizou-se a leitura de pH e condutividade elétrica. Para agilizar o processo de filtragem foi utilizada uma bomba a vácuo. O ensaio de lixiviação foi realizado no Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Engenharia Civil do CEFET-MG.

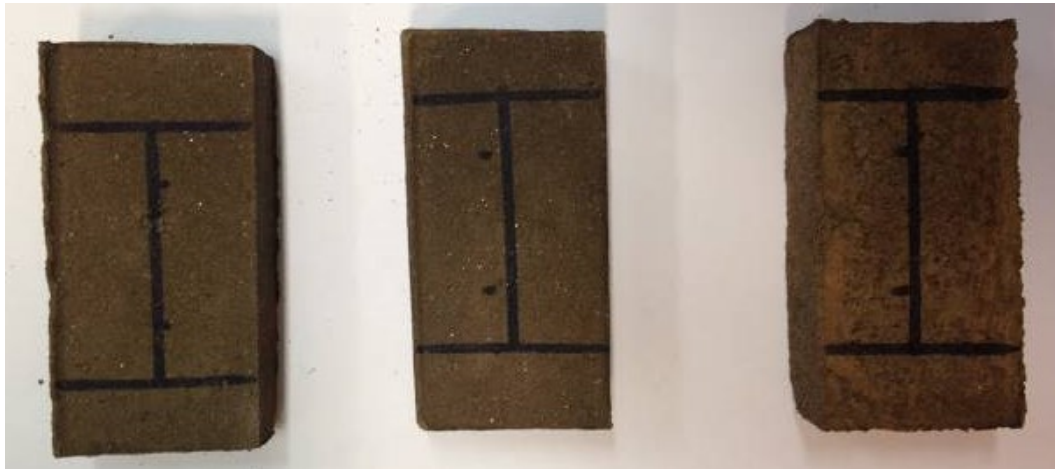
Figura 11 - Blocos em tanque de imersão



Fonte: Própria autora

A determinação da expansibilidade dos blocos foi realizada a partir da análise da estabilidade dimensional para as peças fabricadas, segundo ciclos de molhagem e secagem. Inicialmente, a peça foi dividida em três partes e no centro geométrico dos terços exteriores foram marcadas retas de referência, conforme Figura 12. A marcação das retas serviu como orientação para a realização das medidas durante o processo de ensaio. Após um dia de cura foram determinadas as medidas iniciais. Determinada a medida inicial, os blocos foram colocados em estufa à temperatura de 105°C por um período de 24 horas. Passada às 24 horas, os blocos foram retirados da estufa e esperou-se a sua estabilização com a temperatura ambiente para se determinar, novamente, a medida entre os terços exteriores de referência. Posteriormente, os blocos foram colocados em um tanque sob a condição de submersão por um período de 24 horas e então foram coletadas as medidas novamente. Após 7 e 28 dias, as medidas foram determinadas novamente, conforme recomendação de Silva *et al.* (2011).

Figura 12 - Marcações das retas de referência



Fonte: Própria autora

3.8. Análise estatística

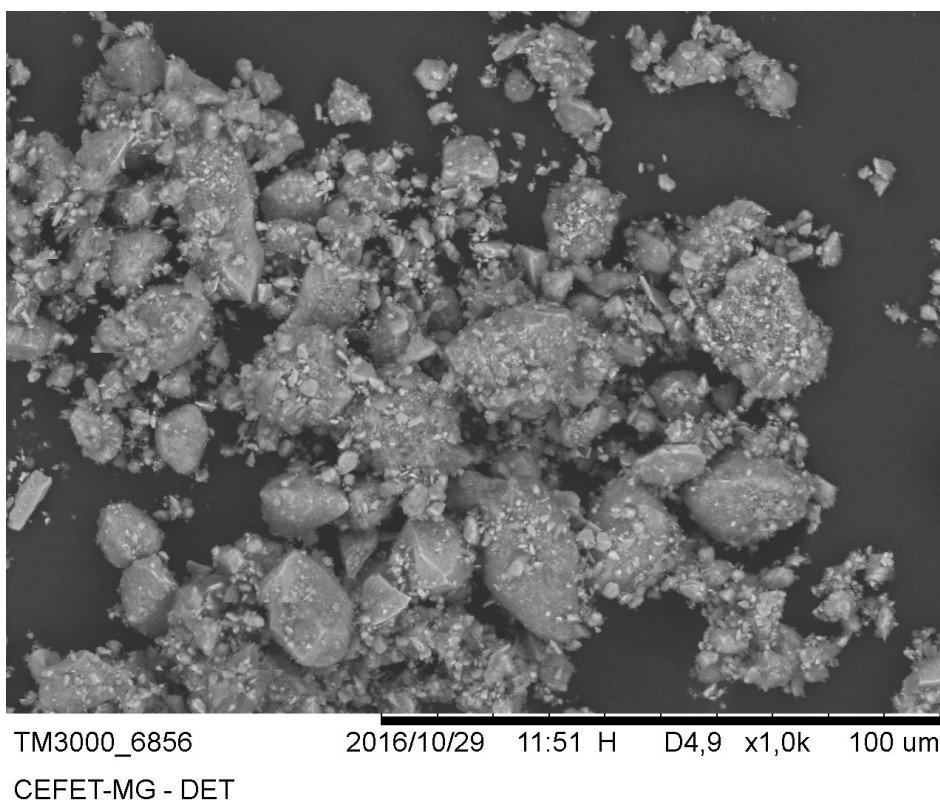
Para a avaliação estatística dos resultados foi utilizado o método “Anova: Fator simples” com auxílio do software Microsoft Excel e grau de significância de 5%. O teste de análise de variância foi aplicado para avaliar as médias dos resultados entre os traços, a fim de testar a hipótese nula, que afirma a igualdade entre as médias. Para a análise foi levada em consideração a fonte de variação entre grupos e dentro dos grupos. Para o teste de valor P, valores de P menores que o grau de significância rejeitam a hipótese de igualdade entre os resultados. O mesmo ocorre para o teste com F. Quando F calculado é maior que F crítico a hipótese nula é rejeitada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Caracterização da cinza de cavaco de eucalipto e rejeito de minério de ferro

Na Figura 13, está representada a morfologia da amostra do rejeito de mineração, a imagem foi realizada com ampliação de 1000x. Pela imagem pode-se observar a estrutura compacta das partículas do material como a falta de superfície lamelar, o que pode evidenciar baixa área superficial específica. Nota-se também a presença de partículas maiores, subarredondadas a angulosas, provavelmente de quartzo.

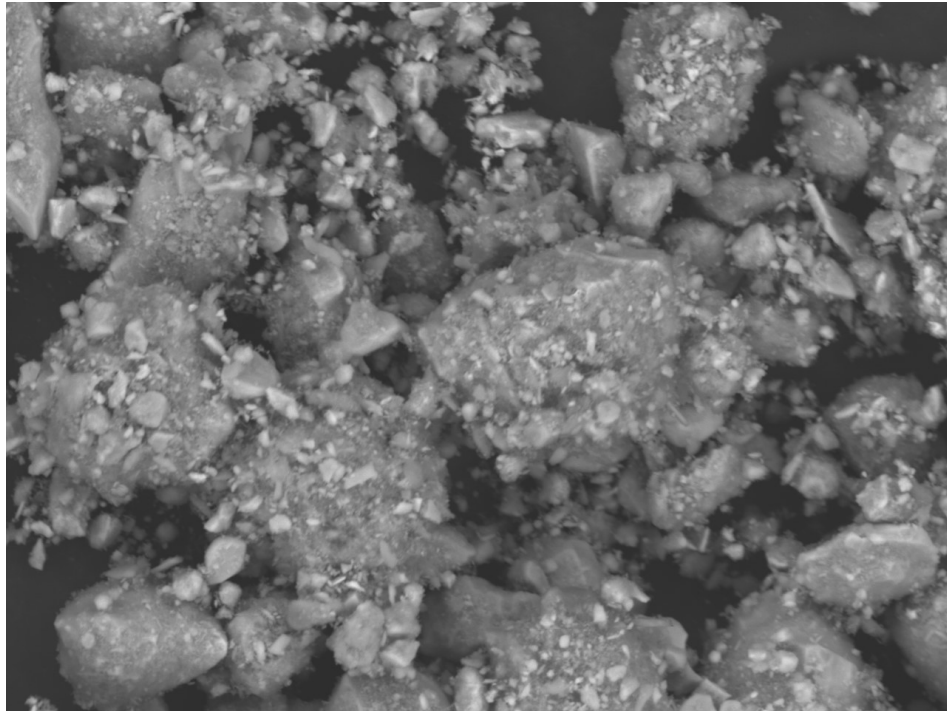
Figura 13 – Microscopia eletrônica de varredura do rejeito de minério de ferro moído



Fonte: Própria autora

Na Figura 14, realizada com ampliação de 2000x, pode-se notar a presença de um material bastante fino e pulverulento aderido às partículas maiores. O material também apresenta maior quantidade de partículas com dimensão superior a 0,01mm.

Figura 14 – Microscopia eletrônica de varredura do rejeito de minério de ferro

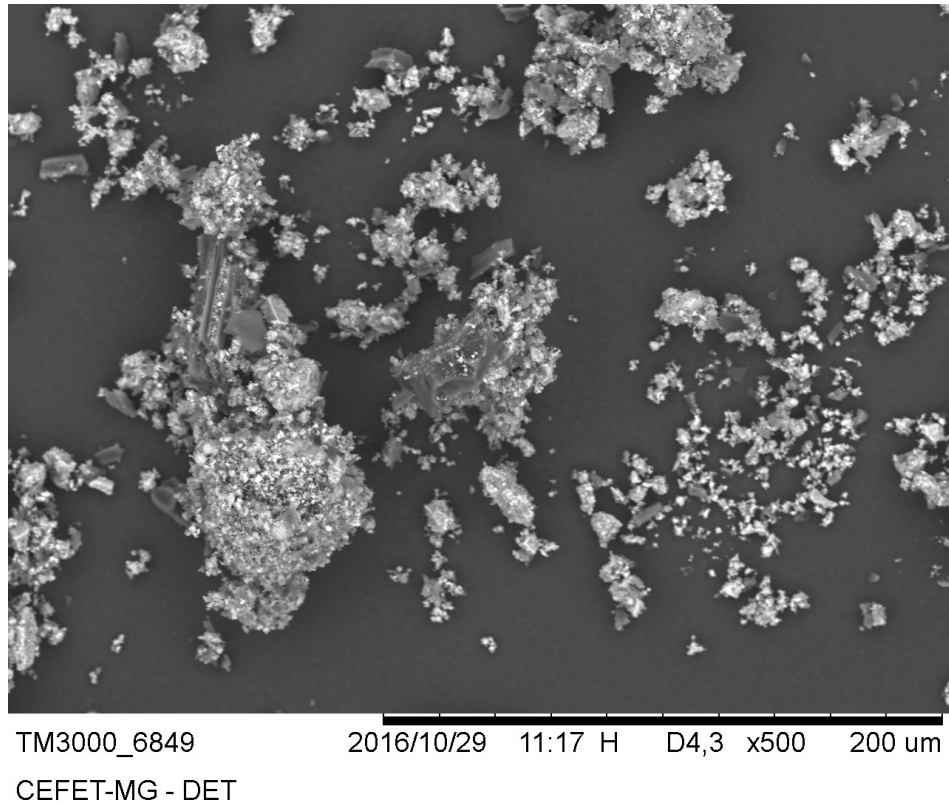


TM3000_6855 2016/10/29 11:50 H D4,9 x2,0k 30 um
CEFET-MG - DET

Fonte: Própria autora

A Figura 15 mostra uma imagem da cinza com ampliação de 500x. Observa-se que a granulometria da cinza é muito diversa, apresentando partículas com diferentes formas e superfícies irregulares.

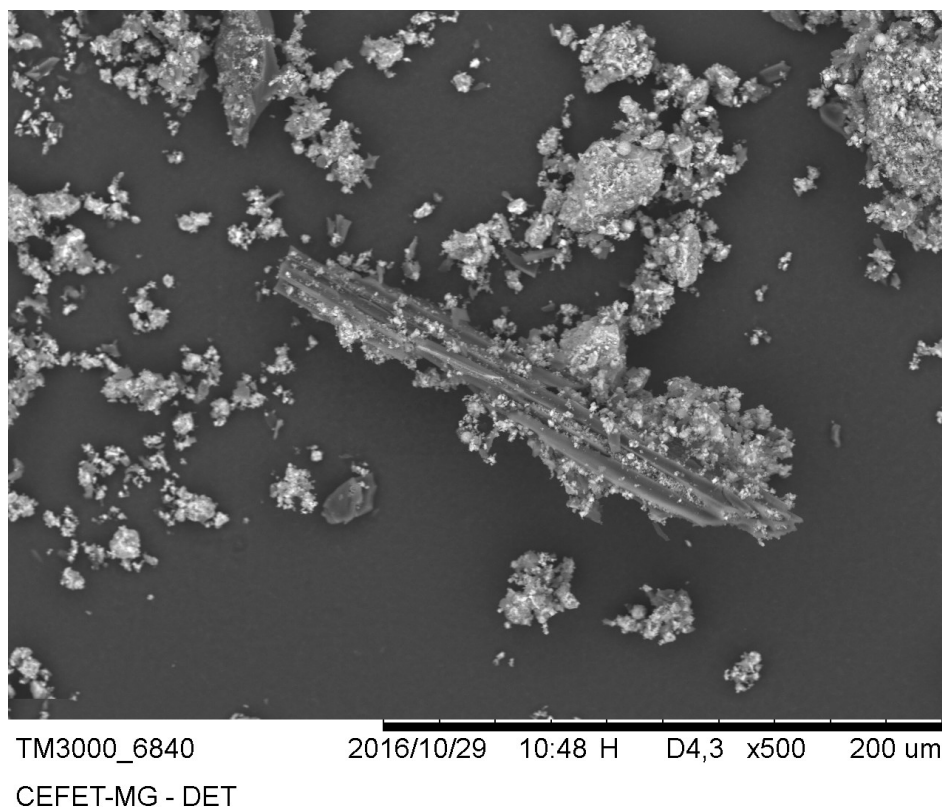
Figura 15 – Microscopia eletrônica de varredura da cinza de cavaco de eucalipto moída



Fonte: Própria autora

Na Figura 16 a imagem da cinza também apresenta ampliação de 500x. Na imagem é possível destacar a presença de fibras do eucalipto no estado natural, mostrando que o processo de queima não ocorreu de maneira uniforme em todo o material.

Figura 16 – Microscopia de eletrônica de varredura da cinza de cavaco de eucalipto moída



Fonte: Própria autora

A composição química do rejeito de mineração e da cinza de eucalipto foi obtida por FR-X. Os principais constituintes do rejeito foram: Fe (46%), SiO₂ (22,3%) e Al₂O₃ (4,25%). Os outros compostos encontram-se em quantidades inferiores a 1%. A cinza de cavaco de eucalipto é composta quimicamente principalmente por CaO (43,1%), MgO (8,24%), Al₂O₃ (4,94%), K₂O (4,52%), P₂O₅ (3,24%) e Fe₂O₃ (2,42%). De acordo com os critérios químicos da norma NBR 12653 (ABNT, 2014) a cinza de eucalipto não se classifica como material pozolânico por apresentar a soma dos teores de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ menores que 70%. Além disso, apresenta perda ao fogo de 29,66% devido à presença de fibras de eucalipto nas cinzas, sendo o máximo admissível 10%, conforme pode ser visto na Tabela 8.

Tabela 8 - Composição química do RMF e da CCE em porcentagem

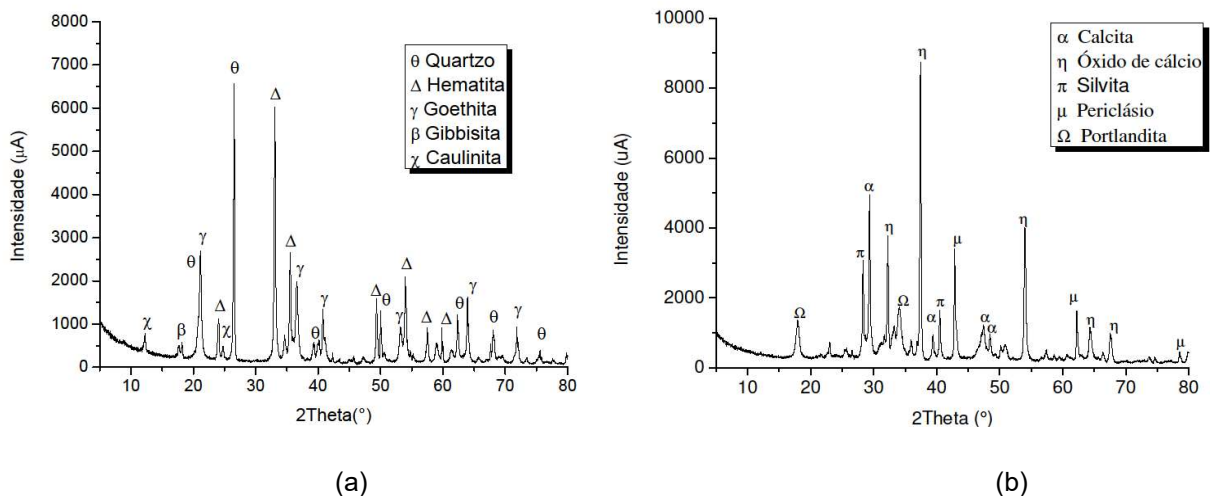
Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	Fe	P	P ₂ O ₅	Mn	MnO	LOI
RMF	22,3	4,3	-	0,01	0,1	0,2	<0,1	0,04	46,0	0,1	-	0,4	-	6,1
CCE	1,8	4,9	2,4	43,1	8,2	0,5	0,3	4,5	-	-	3,2	-	0,4	29,7

Fonte: Própria autora

No difratograma do rejeito de mineração foram identificados os principais minerais presentes no material: caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), quartzo (SiO_2), hematita (Fe_2O_3), goethita (FeOOH) e gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), Figura 17a. A hematita apresenta picos em 2θ iguais a 24,1; 33,4; 35,8; 41,0; 49,5; 54,3; 57,6; 62,3; 64,2; 69,6; 72,0 e $75,4^\circ$ (MAGALHAES, 2008). A goethita apresenta seus picos mais significativos em $21,27^\circ$, $33,27^\circ$, $36,70^\circ$, $41,22^\circ$, $53,31^\circ$ e $59,05^\circ$ (GUALTIERI e VENTURELLI, 1999). O quartzo apresenta os picos com maior intensidade em $20,82^\circ$, $26,62^\circ$, $36,52^\circ$, $39,44^\circ$, $50,10^\circ$ (DOWNS *et al.*, 1993). O pico mais significativo da gibbsita está em $18,3^\circ$ (INOUE *et al.*, 1989). A caulinita apresenta seus dois picos mais significativos em torno de 13 e 25° (MAIA *et al.*, 2008).

Para as cinzas as fases cristalinas identificadas foram: calcita (CaCO_3), óxido de cálcio (CaO), silvita (KCl), periclásio (MgO) e portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), conforme Figura 17b. A portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) apresenta picos em 2θ iguais a: $18,10^\circ$ com intensidade de 86,4 UA e $34,09^\circ$ com intensidade de 137,3 UA. Os demais picos da portlandita apresentam intensidades inferiores a estes dois picos principais, por isso acredita-se que ficaram dentro do alo amorfo e devido a isso não foram identificados (LARA, 2016). A calcita (CaCO_3) em sua forma romboédrica apresenta os picos (i) $29,34^\circ$, (ii) $39,41^\circ$, (iii) $43,16^\circ$ e (iv) $47,11^\circ$ (BARBOSA *et al.*, 2011). O óxido de cálcio apresenta seus picos característicos em $32,38^\circ$, $37,56^\circ$, $54,07^\circ$, $64,38^\circ$ e $67,57^\circ$ (YUE *et al.*, 2010).

Figura 17 - (a) Difratograma RMF e (b) Difratograma CCE

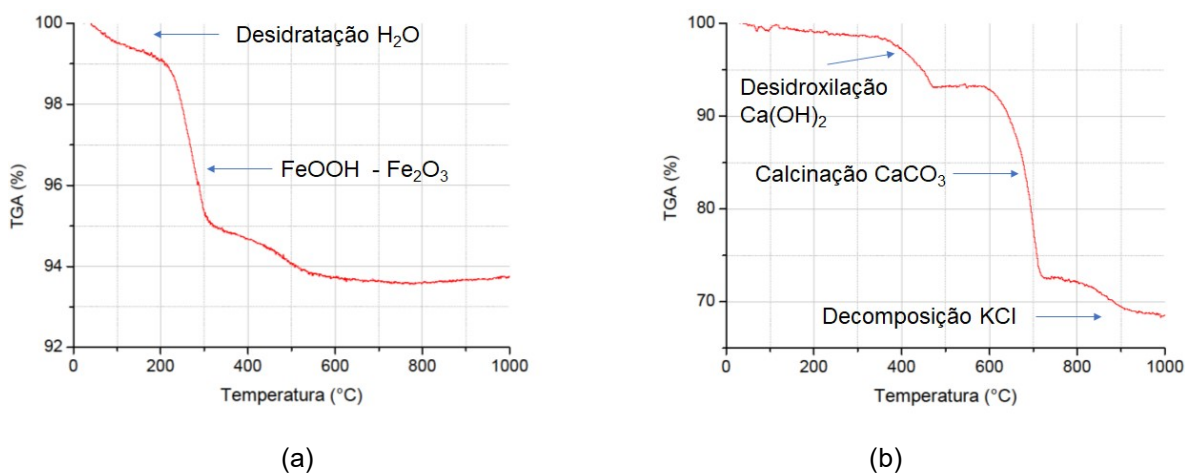


Fonte: Própria autora

No resultado da análise térmica do rejeito, Figura 18a, na curva de TGA, a perda de massa entre 50 e 200°C pode ser associada a dessorção da água superficial (MAGALHAES, 2008). Já entre 200 e 300°C, principal ponto de perda de massa, está associado a transformação da goethita em hematita (MAGALHAES, 2008).

Para as cinzas, Figura 18b, na curva de TGA as perdas até 350°C estariam relacionadas à perda de carbono da matéria orgânica ainda presente na cinza (LARA, 2016). O carbono presente no eucalipto é resultado de seu processo fotossintético o que acarreta o aprisionamento deste elemento na planta. Dessa forma, utilizando-se as cinzas com elevada perda ao fogo para confecção dos blocos pode-se contribuir para o aprisionamento de carbono. A perda de massa entre 400 e 500°C pode estar relacionado a calcinação do carbonato de magnésio (DENARI e CAVALHEIRO, 2012) e desidroxilação da portlandita (BHATTY *et al.*, 1988). Entre 600 e 700°C há uma intensa perda de massa que pode estar associada a calcinação do carbonato de cálcio (DENARI e CAVALHEIRO, 2012) ou mesmo calcita de magnésio e entre 700 e 900°C (JENSEN *et al.*, 2000; HINDIYARTI, 2007) a variação de massa é relacionada à decomposição da silvita.

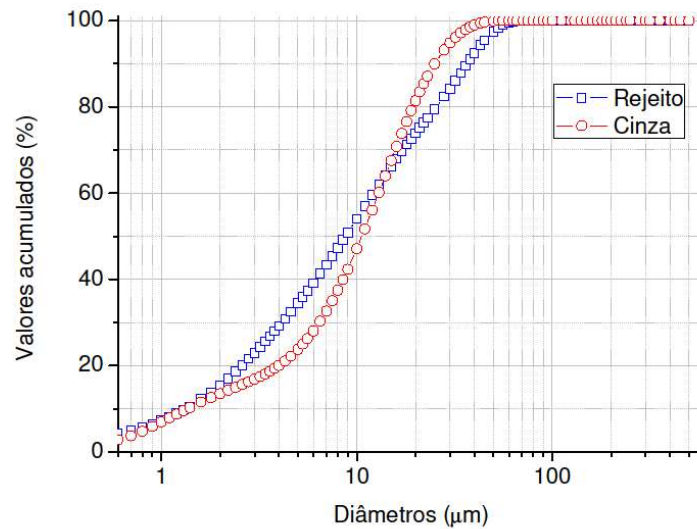
Figura 18 - (a) TGA RMF (b) TGA CCE



Fonte: Própria autora

As curvas granulométricas dos materiais estão apresentadas na Figura 19. As amostras de rejeito de mineração e cinzas de eucalipto apresentam 90% das partículas com diâmetro inferior a 36,63 µm e 25,03 µm, respectivamente. O diâmetro médio das partículas obtido pelo ensaio foi de 14,13 µm para o rejeito e 12,30 µm para a cinza.

Figura 19 - Granulometria das amostras de RMF e CCE

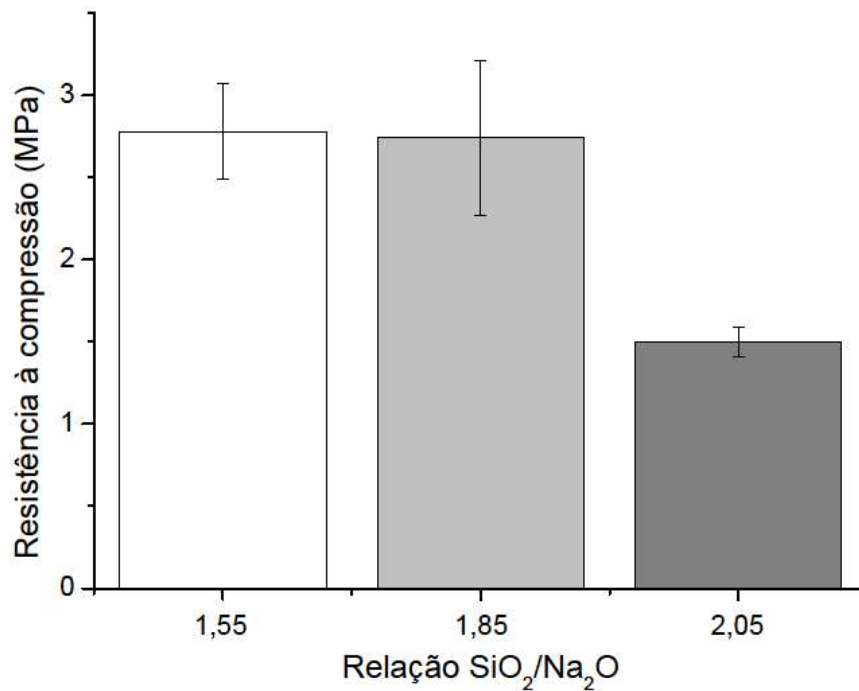


Fonte: Própria autora

4.2. Determinação da dosagem dos traços

Os resultados para a resistência à compressão aos 7 dias para os traços do estudo piloto estão apresentados na Figura 20.

Figura 20 - Resistência à compressão estudo piloto



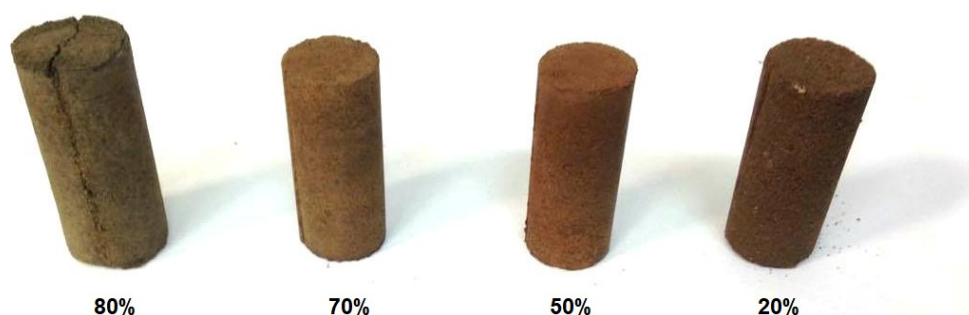
Fonte: Própria autora

Diante destes resultados, definiu-se utilizar o traço ideal de Davidovits (1999) ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 1,85$) e o traço que apresentou resultado de resistência à compressão

aos 7 dias semelhante ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 1,55$). Como houve aumento da resistência com a redução da relação $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ decidiu-se também utilizar a relação $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 1,00$, esperando-se que a resistência à compressão aumentasse.

Para se determinar a relação cinza/rejeito também foram testados alguns traços. A proporção 80% de cinza e 20% de rejeito se mostrou muito expansiva, conforme Figura 21 e por isso foi eliminada dos estudos. Conseqüentemente, relações de CCE superiores a 80% também foram excluídas do estudo. A relação 60% de cinza e 40% de rejeito não foi avaliada por se considerar que este valor não apresentaria diferenças significantes em relação ao traço com 50% de cinza.

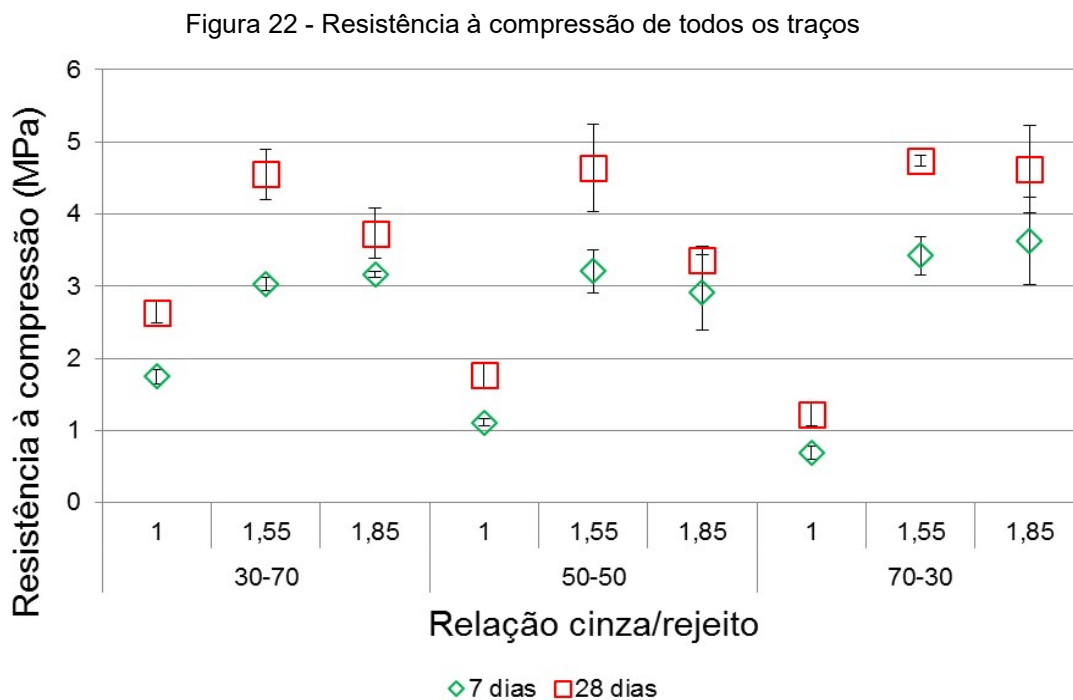
Figura 21 - Traço utilizando 80%,70%,50%,20% de cinza da esquerda para direita



Própria autora

4.3. Caracterização dos traços

Para a resistência à compressão, pode-se observar que os únicos traços que não atendem as especificações da norma NBR 8491 (ABNT, 2012) são os que apresentam a relação $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 1,00$, com exceção da proporção cinza/rejeito de 30/70 aos 28 dias, no qual apresenta resistência média de 2,64 MPa. Todas as demais misturas para esta proporção de $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ apresentam valores médios de resistência inferiores a 2 MPa, conforme Figura 22.



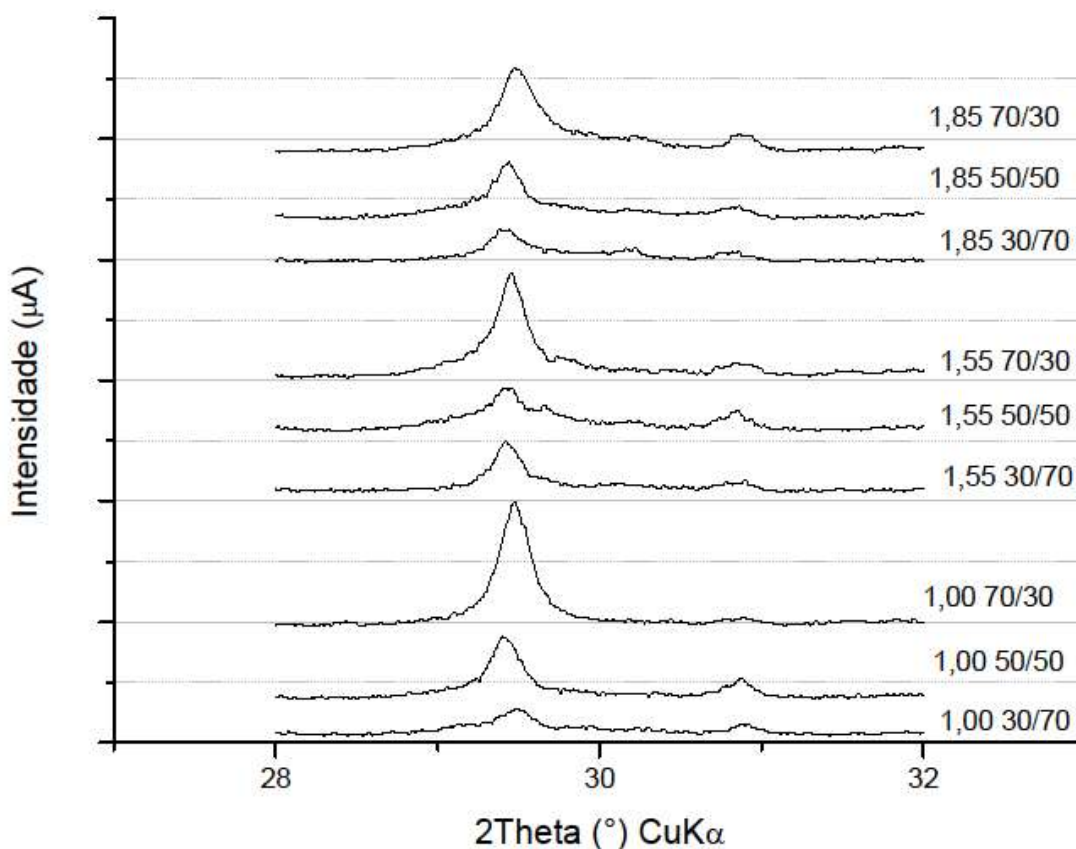
Fonte: Própria autora

Para os 7 e 28 dias, os resultados de $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 1,55$ e $1,85$ foram considerados semelhantes estatisticamente, com ressalva do traço com relação cinza/rejeito igual a 50/50 aos 28 dias, conforme APÊNDICE A. O traço que apresentou maior resistência à compressão aos 7 dias foi aquele constituído por 70% de cinza e 30% de rejeito e relação $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ igual a 1,85. Contudo seu valor de resistência foi muito próximo ao traço com a mesma relação de cinza e rejeito e proporção $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ igual a 1,55. Aos 28 dias aconteceu uma inversão neste comportamento passando o traço com $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ igual a 1,55 a apresentar maior resistência. É importante ressaltar que para estes dois traços o aumento da porcentagem de cinza favoreceu o aumento da resistência à compressão enquanto que para o traço com a relação $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ igual a 1,00 aconteceu o inverso, havendo uma diminuição de resistência com o aumento da quantidade de cinza. Isto pode ser explicado pela expansibilidade apresentada pelo traço com relação $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 1,00$ e proporção cinza/rejeito 70/30.

Na análise mineralógica, conforme pode ser observado na Figura 23, há presença do pico característico da formação de C-A-S-H em torno de 29° (KAPELUSZNA *et al.*, 2017). Pode-se notar também a existência deste pico em todos os traços e um aumento da intensidade conforme se aumenta o teor de cinza.

Sendo assim, pode-se afirmar que houve formação de C-A-S-H em todos os traços e que a presença da cinza de eucalipto contribuiu para esta formação.

Figura 23 - Difração de raio X - todos os traços



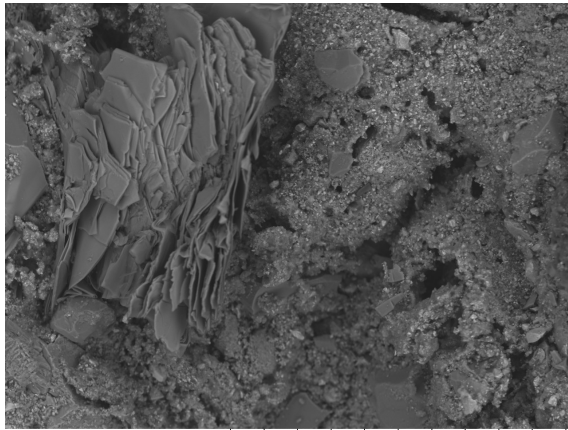
Fonte: Própria autora

Segundo Puertas *et al.* (2011) este produto da geopolimerização contribui diretamente para a resistência à compressão. Isto pode ser comprovado com o resultado do ensaio à compressão, em que os traços com maior teor de cinza apresentaram os melhores resultados de resistência, com exceção do traço com relação SiO₂/Na₂O=1,00 que apresentou um comportamento oposto em todos os resultados devido à sua expansibilidade. Desta forma os resultados sugerem que a cinza favorece o ganho de resistência à compressão do material.

Morfologicamente, nas argamassas com maior porcentagem de RMF foi notada a presença de estruturas cristalinas lamelares e compostas por planos sobrepostos, conforme Figura 24. Em todos os traços há presença desta estrutura. No traço com relação cinza/ rejeito igual a 30/70 e SiO₂/Na₂O = 1,00 notam-se os planos da estrutura mais emaranhados, enquanto nos demais nota-se a presença dos planos

paralelos e sobrepostos. Esta estrutura pode ser associada, possivelmente, com a caulinita devido à sua morfologia (SILVA FILHO *et al.*, 2015).

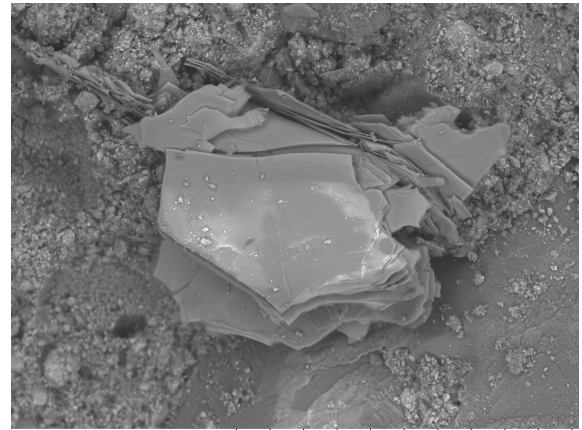
Figura 24 – Microscopia eletrônica de varredura do traço 30/70 (a) 1,00 (b) 1,55 e (c) 1,85



TM3000_9099
CEFET-MG - DET

H D5,1 x500 200 um

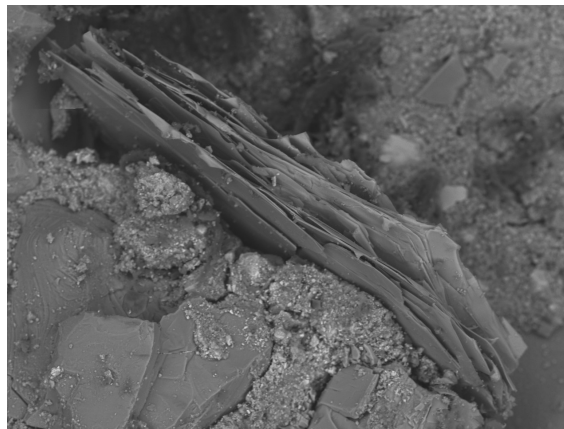
(a)



TM3000_9104
CEFET-MG - DET

H D6,0 x500 200 um

(b)



TM3000_9109
CEFET-MG - DET

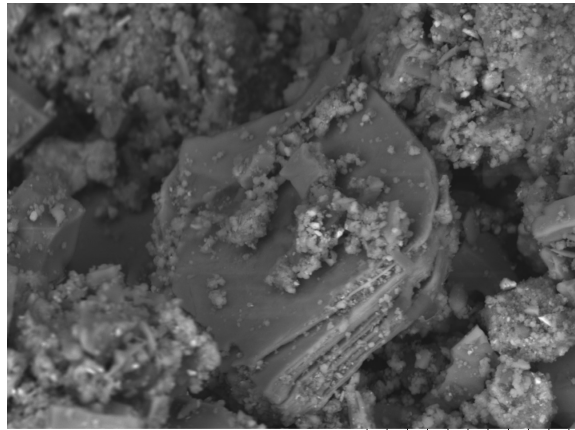
H D7,3 x500 200 um

(c)

Na Figura 25 estão apresentadas as microscopias do traço com relação de cinza rejeito igual a 50/50. Conforme pode ver visto, em todos os traços ainda há presença de caulinita, contudo diferente do traço com relação de cinza/rejeito igual a 30/70, estas estruturas apresentam uma dimensão menor, visto que o aumento utilizado para estas imagens é maior do que o utilizado para o traço anterior. Além de menores, as estruturas encontram-se mais dispersas. Desta forma, a redução de caulinita nas argamassas com maiores teores de CCE pode estar associada com sua dissolução por meio do cálcio existente na CCE e com a formação de estruturas mais resistentes, o que resulta em maiores resistências à compressão. A presença

de maior teor de óxido de cálcio resulta em maior eficiência na dissolução da caulinita (WHITTINGTON, 1996).

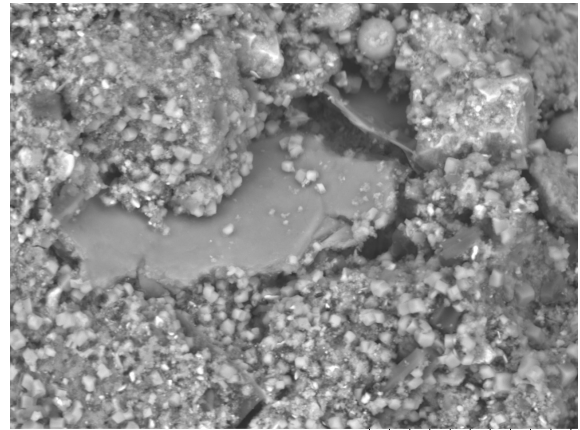
Figura 25 – Microscopia eletrônica de varredura do traço 50/50 (a) 1,00 (b)1,55 e (c) 1,85



TM3000_9120
CEFET-MG - DET

H D5,7 x2,0k 30 um

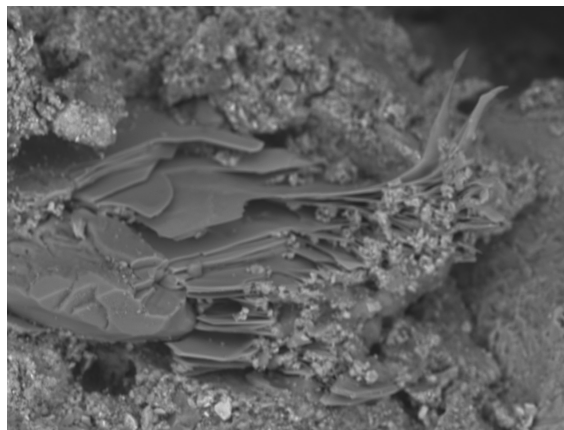
(a)



TM3000_9124
CEFET-MG - DET

H D4,9 x2,0k 30 um

(b)



TM3000_9122
CEFET-MG - DET

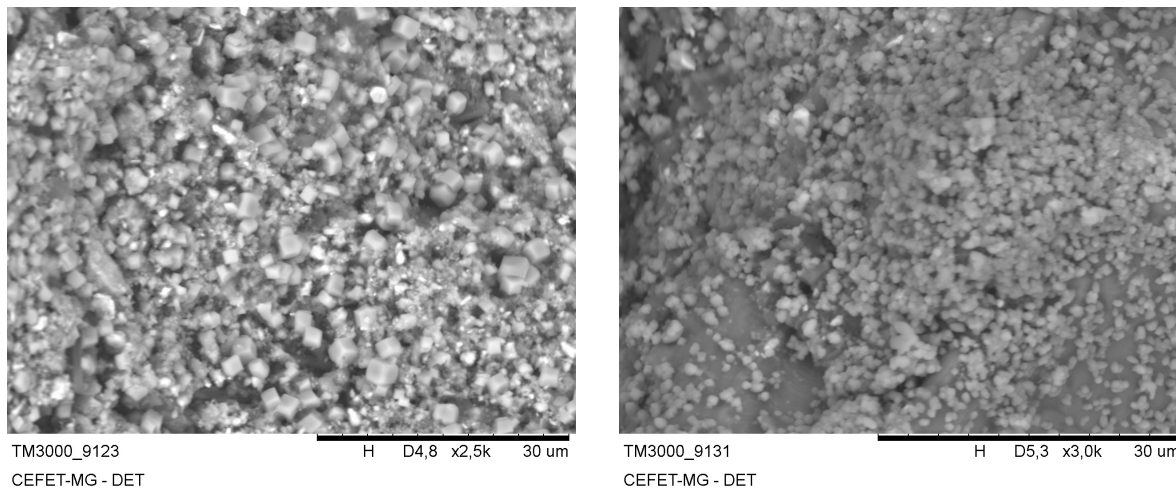
H D5,4 x1,0k 100 um

(c)

Para os traços com relação de cinza rejeito igual a 70/30, foram encontradas estruturas semelhantes a cubos para as proporções de $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ igual a 1,55 e 1,85, conforme Figura 26 . Estas estruturas podem estar associadas à zeólita A devido à sua morfologia (SILVA FILHO *et al.*, 2015) e ao acréscimo de resistência mecânica nas argamassas, uma vez que foram percebidas de forma mais nítida na formulação com maior resistência à compressão (AYELE *et al.*, 2015). É importante ressaltar que estas estruturas foram formadas a temperatura ambiente. Tang *et al.*

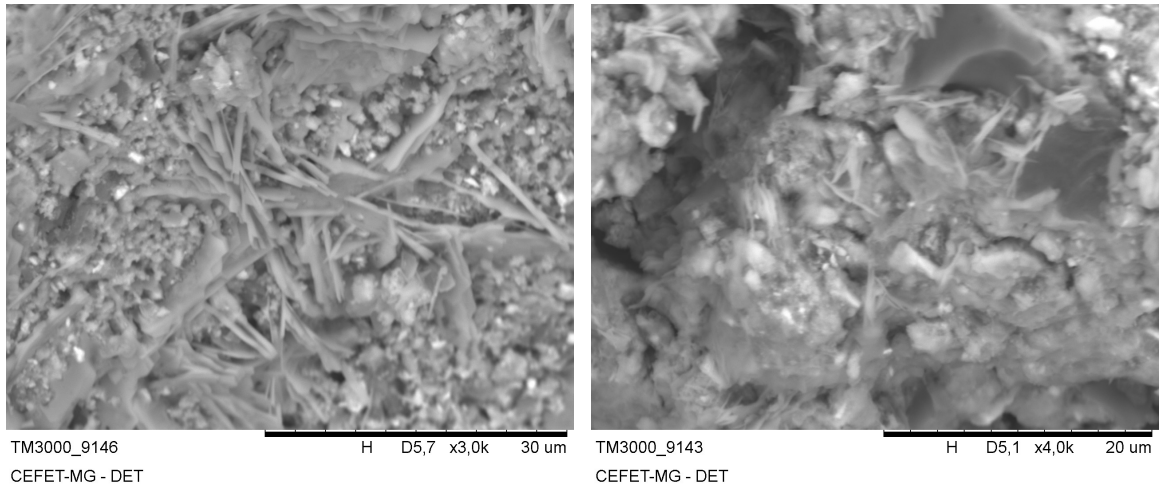
(2013) já confirmavam as interações entre a caulinita e o cálcio à temperatura ambiente formando como produtos aluminossilicatos cristalinos.

Figura 26 – Microscopia eletrônica de varredura do traço 70/30 (a) 1,55 e (b)1,85



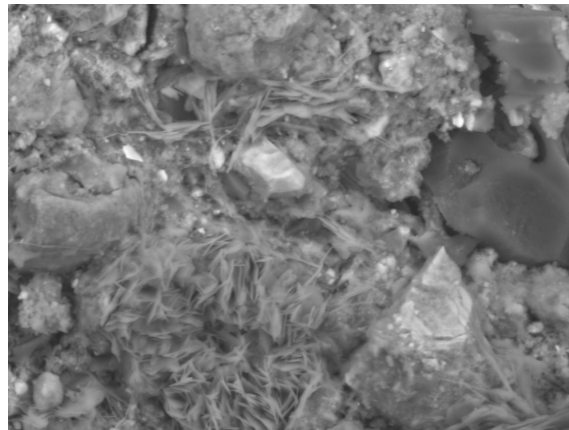
Para o traço com relação cinza/rejeito igual a 70/30 e proporção $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ igual a 1,00, notou-se a formação de estruturas semelhantes a agulhas, conforme Figura 27a. Estas estruturas podem ser relacionadas a etringita devido à sua morfologia (BRAGANÇA *et al.*, 2016). Nos demais traços para mesma proporção de cinza e rejeito, a presença desta estrutura se mostrou de forma menos evidente, conforme Figura 27b e c. Isto pode justificar a menor resistência à compressão para a argamassa com a relação $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ igual a 1,00, visto que, a etringita não contribui para a resistência e tem a capacidade de deterioração do material devido à expansão que provoca. Sendo assim, como discutido anteriormente, apesar do traço com relação cinza/rejeito igual a 70/30 e proporção $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ igual a 1,00 apresentar o maior pico de C-A-S-H, ela também apresenta as etringitas mais nítidas e bem formadas, contribuindo para a redução de sua resistência mecânica.

Figura 27 – Microscopia eletrônica de varredura do traço 70/30 (a) 1,00 (b)1,55 e (c) 1,85



(a)

(b)

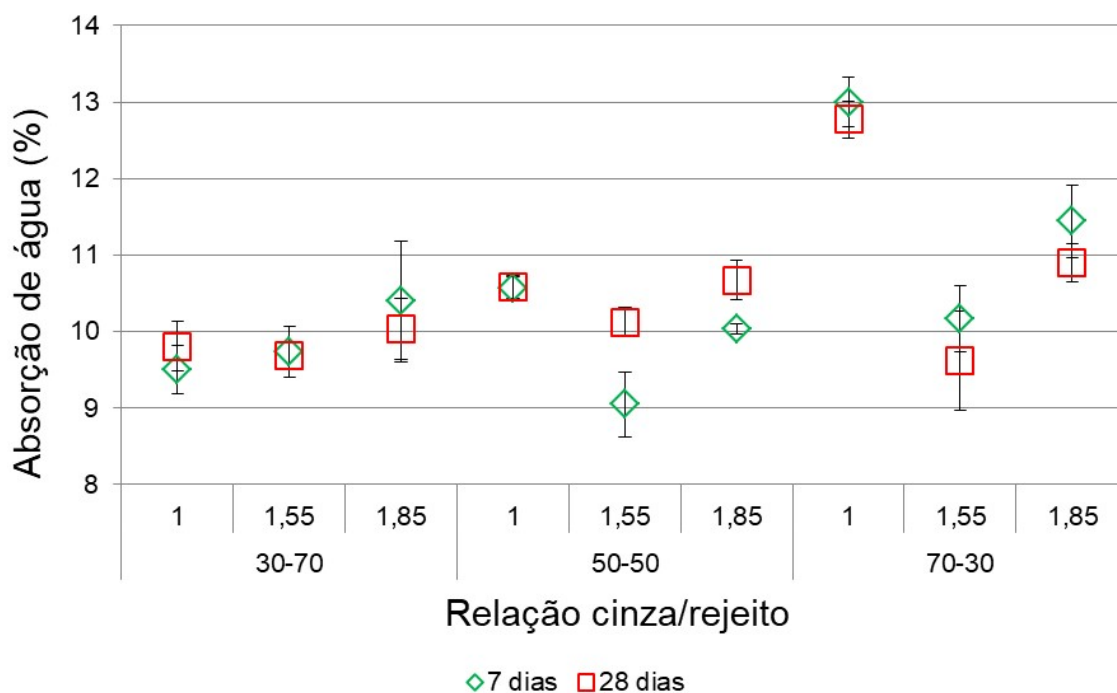


TM3000_9145
CEFET-MG - DET
H D5,7 x3,0k 30 um

(c)

No ensaio de absorção de água, todos os traços atenderam às exigências da norma NBR 8491 (ABNT, 2012) – Tijolo de solo-cimento - Requisitos, que estabelece a média máxima de absorção de água de 20% e valores individuais limitados a 22%, conforme pode ser observado na Figura 28.

Figura 28 - Absorção de água de todos os traços



Fonte: Própria autora

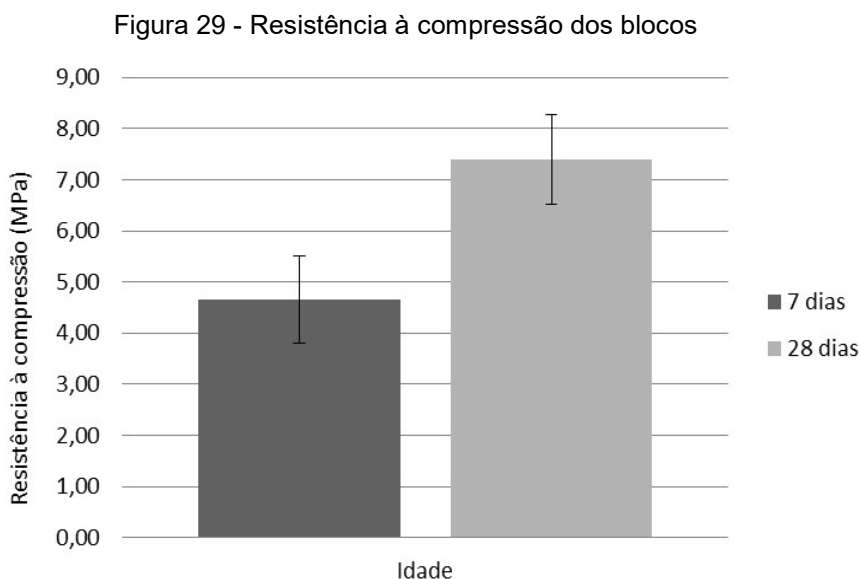
Conforme pode ser observado na Figura 28, os traços com maior teor de cinza apresentam maiores valores de absorção de água. Isso se deve à maior formação de C-A-S-H, que devido à secagem necessária para o ensaio, desidrata-se. Isto provoca microfissuras na estrutura do C-A-S-H, o que leva a maior porosidade e, com isso, maior absorção de água (DEVENTER *et al.*, 2015).

Observa-se também a redução de absorção de água para o traço com 70/30 cinza/rejeito com a evolução da idade dos corpos de prova, sendo o melhor resultado encontrado para o traço com $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 1,55$, visto que apresentou menor absorção de água, 9,62% aos 28 dias.

Considerando o ensaio de resistência à compressão e o de absorção de água, o traço que apresentou melhor desempenho foi o constituído por $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 1,55$ e relação cinza/rejeito 70/30, visto que, além de apresentar resistência superior também apresentou menor índice de absorção de água. Desta forma, os blocos foram moldados seguindo este traço e os resultados seguintes são referentes a apenas essa formulação.

4.4. Caracterização dos blocos

No resultado do ensaio de resistência à compressão para o bloco, conforme pode ser visto na Figura 29, houve um aumento na resistência dos tijolos dos 7 para os 28 dias. Este aumento se deve à evolução da cinética do processo de geopolimerização (OH *et al.*, 2010).



Fonte: Própria autora

O modo de ruptura do bloco quando submetido ao ensaio de compressão também foi observado. De acordo com a Figura 30, pode-se notar que ocorreu o fendilhamento lateral dos blocos. Segundo Monk (1967) e Cheema e Klinger (1986) o fendilhamento lateral ou vertical ocorre quando as tensões de tração superam a resistência à tração do bloco, levando ao rompimento por tração e cisalhamento. Ainda segundo Monk (1968), isto ocorre devido à maior rigidez do prato de aço da prensa, quando o bloco é submetido ao ensaio de compressão, provocando deformações laterais no bloco.

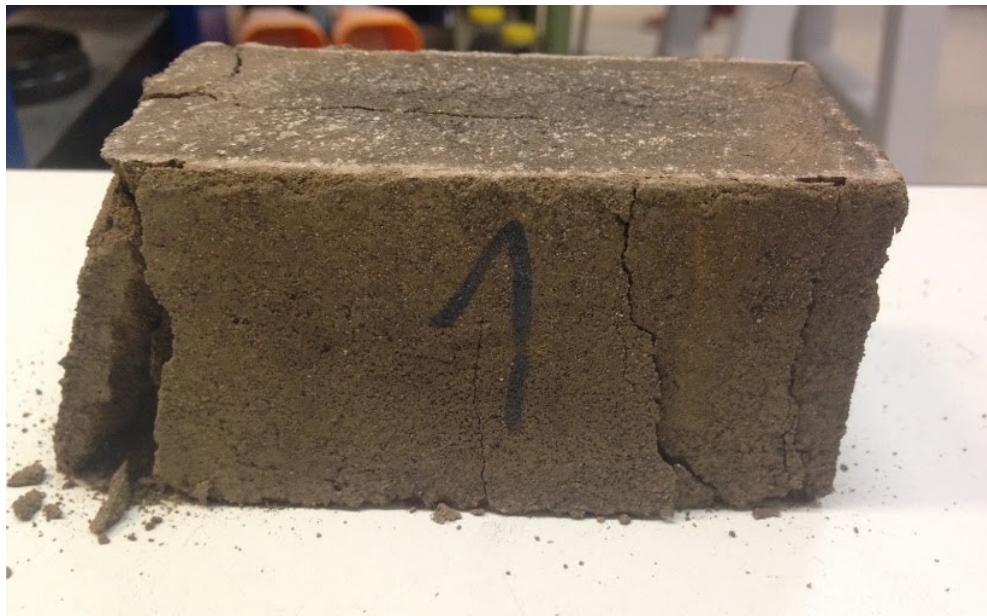
Figura 30 - Modo de ruptura bloco



Fonte: Própria autora

Algumas fissuras podem ser notadas no bloco após seu rompimento, conforme Figura 31.

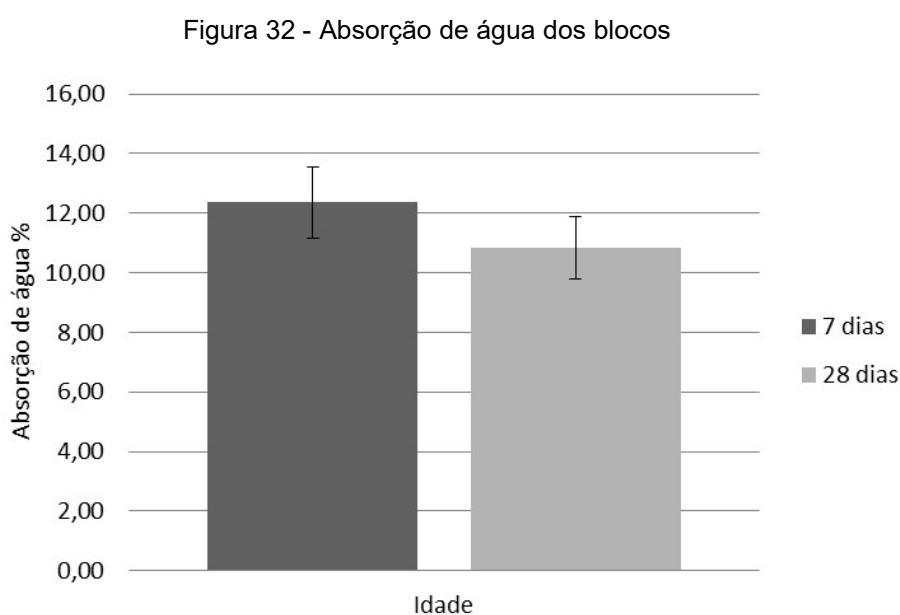
Figura 31 - Bloco rompido



Fonte: Própria autora

De acordo com a Figura 31, além do fendilhamento lateral, observa-se uma fissura no centro do bloco o que pode sugerir também o rompimento por tração na compressão do material.

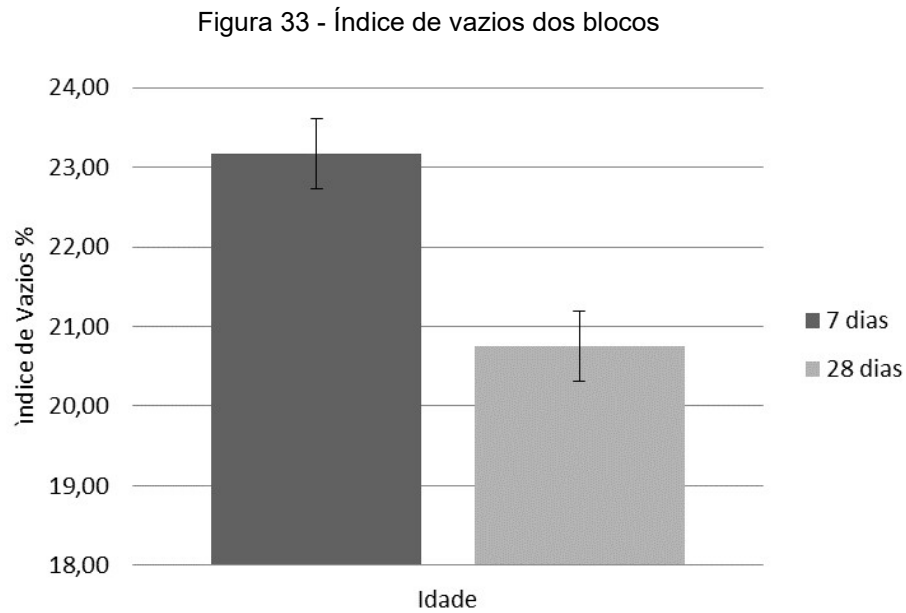
No ensaio de absorção de água dos blocos, pode-se notar que a absorção decresce com o passar do tempo, conforme pode ser visto na Figura 32. Isso se deve ao processo de geopolimerização que, com o decorrer do tempo e evolução das reações, vai refinando a estrutura de poros, tornando-os cada vez menores e menos interligados, dificultando a absorção de água (COLLINS e SANJAYAN, 2010).



Fonte: Própria autora

A presença de cálcio também está associada com a redução da absorção de água. Segundo Provis (2012), a presença de cálcio está associada a redução do tamanho de poros e o refinamento do diâmetro dos poros em materiais álcali ativado, uma vez que o cálcio favorece a reatividade do material o que leva a formação de uma estrutura mais complexa e redução da permeabilidade.

Outro parâmetro que pode ser obtido pelo ensaio de absorção de água é o índice de vazios. Este parâmetro está associado indiretamente com a porosidade do material e, por esse motivo, também pode ser relacionado com a resistência à compressão. Na Figura 33 está apresentado o resultado do índice de vazios para as duas idades.



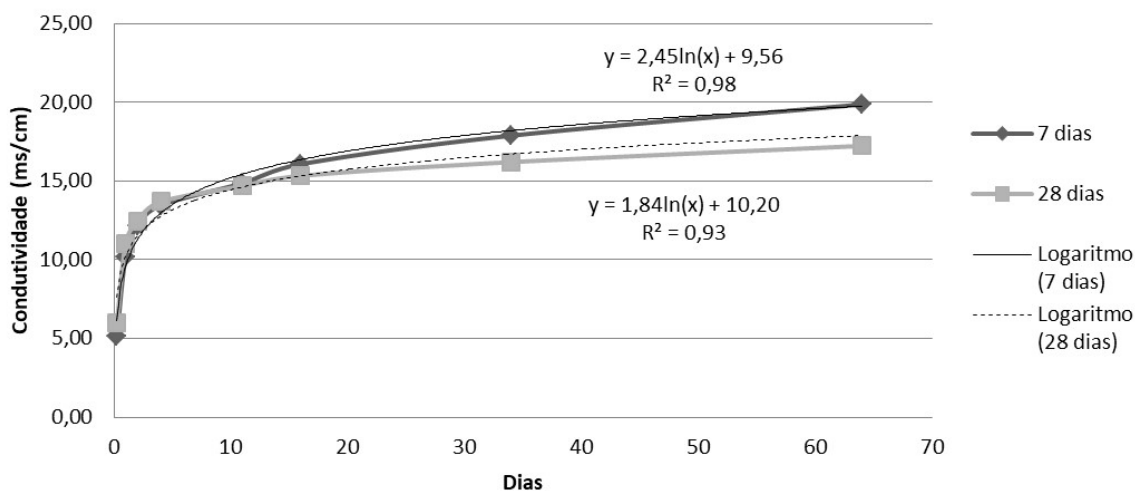
Fonte: Própria autora

Conforme pode ser visto na Figura 33, o índice de vazios diminui com o passar do tempo. Este fato está diretamente associado ao aumento da resistência à compressão com o decorrer do tempo, visto que a menor porosidade dificulta a conexão entre os poros e com isso, uma possível fratura e falha.

A redução do índice de vazios também pode ser associada à maior durabilidade do material, uma vez que a menor quantidade de poros dificulta a penetração de agentes agressivos.

O ensaio de lixiviação contou basicamente com duas etapas, a medição do pH e da condutividade do lixiviado extraído. Na Figura 34 estão apresentados os valores acumulados de condutividade para o lixiviado extraído dos tanques.

Figura 34 - Condutividade lixiviado dos blocos



Fonte: Própria autora

Conforme pode ser observado na Figura 34, os valores acumulados de condutividade vão se somando a incrementos cada vez menores até se estabilizar, ou seja, a condutividade vai diminuindo até atingir o valor da condutividade da água deionizada, no caso deste trabalho de $4 \mu\text{s/cm}$. Segundo Vaillant (2013), quando se atinge esse valor de incremento pode-se afirmar que o processo de lixiviação cessou. Ainda segundo Vaillant (2013) este comportamento da condutividade se assemelha ao comportamento matemático logarítmico e a equação obtida na regressão $\text{mS/cm} \times \text{Dias}$, pode ser utilizada para a caracterização do tempo decorrido até o final da lixiviação, quando se obtém o incremento igual ao valor da água deionizada. Desta forma, foram empregadas as equações fornecidas pela regressão das curvas para 7 e 28 dias e obtidos os valores para o final da lixiviação, apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Determinação final da lixiviação

7 dias			28 dias				
Dias	a	b	Incremento	Dias	A	b	Incremento
	2,45	9,56			1,84	10,2	
500	24,7858		...	400	21,2243		...
501	24,7907		0,0049	401	21,2289		0,0046
502	24,7956		0,0049	402	21,2335		0,0046
503	24,8004		0,0049	450	21,4410		...
600	25,2325		...	451	21,4451		0,0041
601	25,2366		0,0041	452	21,4492		0,0041
602	25,2406		0,0041	453	21,4532		0,0041
603	25,2447		0,0041	454	21,4573		0,0041
604	25,2488		0,0041	455	21,4613		0,0040
605	25,2528		0,0041				
606	25,2569		0,0040				

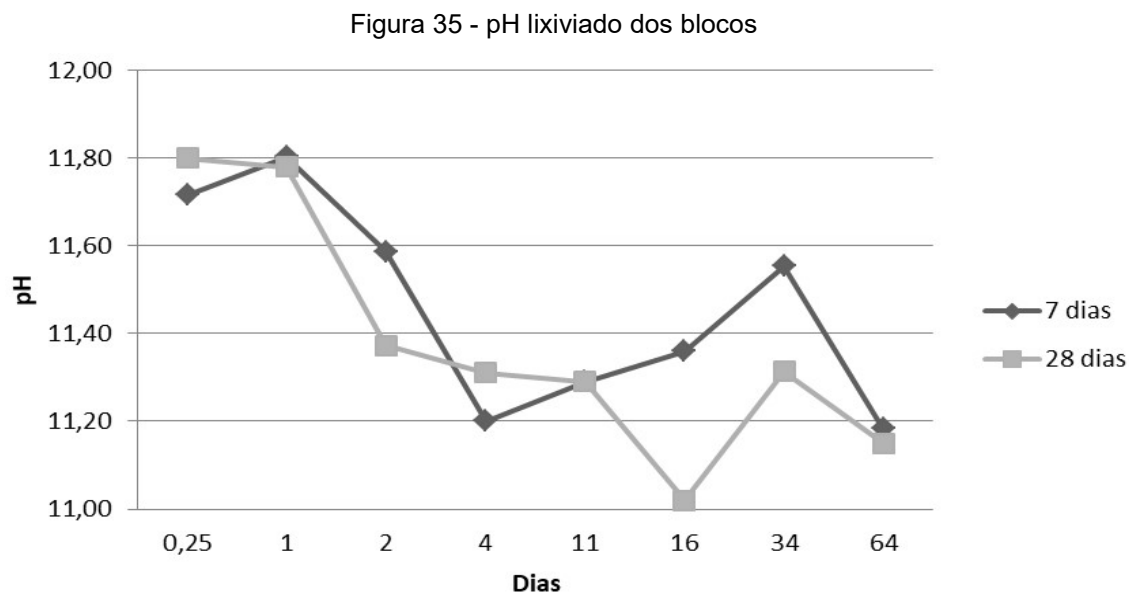
Fonte: Própria autora

Diante dos resultados da Tabela 9, pode-se estimar que a lixiviação irá cessar para os blocos curados até 7 dias em 606 dias imersos em tanque. Já para os blocos curados até 28 dias, a lixiviação ocorrerá até 455 dias.

Nota-se também, ainda conforme Figura 34, uma redução da condutividade com o aumento de tempo de cura dos blocos. Isso se deve, segundo Ponzoni *et al.* (2015), ao aumento de estabilidade da matriz através de sua consolidação.

Cabe ressaltar que a durabilidade dos blocos compactados é o maior entrave para sua maior aplicação nos processos produtivos. Muitas vezes os blocos são pouco duráveis devido à falta de boas técnicas construtivas e falta de manutenção. Além disso, a durabilidade é uma propriedade complexa de se definir e não há consenso em como se determinar a durabilidade de um BTC. Ainda sobre a durabilidade, segundo Da Silva (2015), como não houve alteração ao nível visual, da integridade e geometria dos blocos, estes podem ser adequados para locais em que haja um contato prolongado com a água.

Outro parâmetro estudado no ensaio de lixiviação foi o pH do lixiviado extraído dos tanques de imersão. Os resultados das medições de pH estão apresentadas na Figura 35.

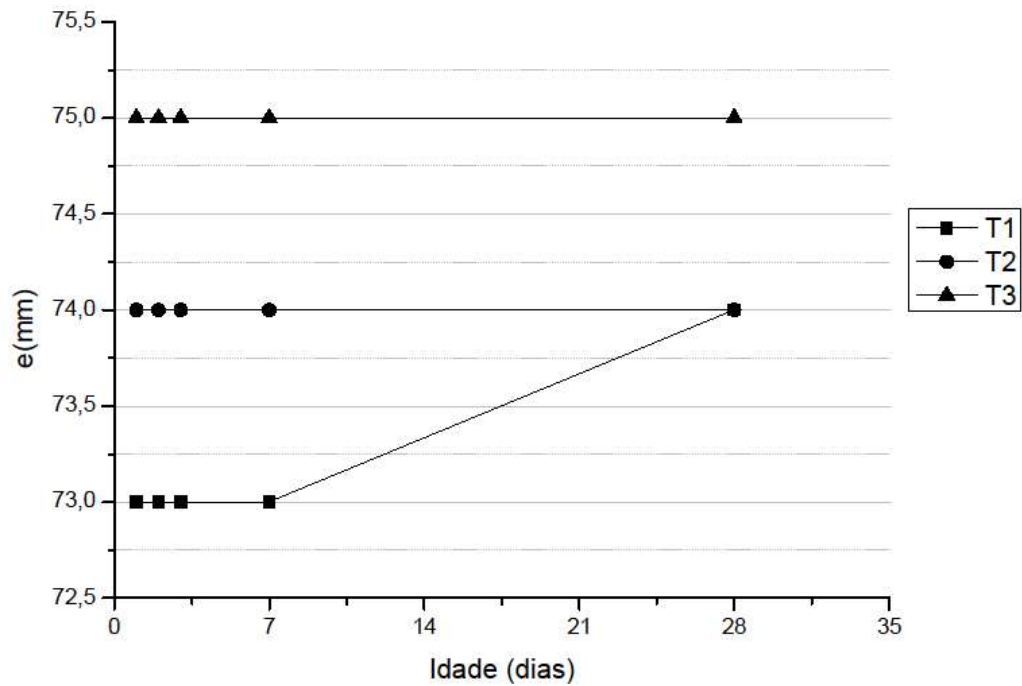


Fonte: Própria autora

Conforme pode ser visto na Figura 35, o pH do lixiviado se inicia com valores mais altos devido à maior concentração de íons no material inicialmente. Com o passar do tempo e redução da concentração de íons para serem lixiviados há uma queda na condutividade e, conseqüentemente, nas medições do pH. Contudo, esse valor ainda se mantém maior do que 10 devido à presença dos ativadores básicos na composição do bloco. A característica básica do pH, segundo Galiano *et al.* (2011), indica a presença de um ambiente alcalino. Além disso, segundo o mesmo autor, materiais com alto teor de cálcio em sua composição como cimento e escória de alto forno apresentam melhor resultado para lixiviação.

O resultado para o ensaio de expansibilidade para os blocos está apresentado na Figura 36. Foram realizadas medidas nas amostras nas idades de 3, 7 e 28 dias.

Figura 36 - Leitura da distância entre as retas de referências dos blocos



Fonte: Própria autora

Segundo Shi *et al.* (2015), valores de expansibilidade inferiores a 0,10% nos 16 primeiros dias indicam que a expansão não ocorre de maneira significativa. Dessa forma, pode-se afirmar que, conforme se pode ver na Figura 36, não houve expansão significativa dos blocos. Este comportamento pode estar associado à formação das etringitas, que no caso do traço escolhido para confeccionar os blocos, ocorreu de forma menos evidente.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho concluiu que é possível desenvolver um bloco compactado ativado alcalinamente utilizando-se rejeito de minério de ferro e cinza de cavaco de eucalipto respeitando-se as exigências normativas.

Os traços compostos por diferentes proporções de ativadores e percursores apresentaram as propriedades avaliadas adequadas para o desenvolvimento dos blocos, com exceção da formulação com relação $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 1,00$ no ativador. As formulações com relação $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 1,55$ e $1,85$ apresentaram valores de resistência à compressão semelhantes estatisticamente. Contudo, levando em conta o ensaio de absorção de água, o traço com relação $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 1,55$ apresentou desempenho mais satisfatório e por isso foi escolhido para o desenvolvimento do bloco.

Ainda sobre o ensaio de compressão pode-se destacar que a presença da cinza de cavaco de eucalipto e do rejeito de minério de ferro contribuiu para o aumento de resistência nos traços, visto que, a caulinita presente no rejeito apresentou grande reatividade com o cálcio da cinza, formando estruturas mais resistentes. Particularmente sobre a cinza, pode-se relacionar seu maior teor com a maior formação de C-A-S-H nos traços.

É importante também salientar a formação de zeólitas, estrutura de grande interesse industrial por apresentar várias funções. As zeólitas foram formadas a temperatura ambiente, o que merece destaque, visto que usualmente este processo necessita de tratamento térmico para ocorrer.

Sobre os blocos, pode-se observar que, além de apresentarem resistência à compressão superior às exigências da norma, ainda apresentam redução da absorção de água com o passar do tempo devido a presença de cálcio que refina o tamanho dos poros.

Quanto à durabilidade, pode-se concluir que não houve expansibilidade significativa para o material estudado.

5.1. Sugestões para futuros trabalhos

- Avaliar a supressão da areia normal e do superplastificante para aumento da competitividade do material e uma possível aplicação em habitações de interesse social;
- Investigar mais a fundo as questões de durabilidade do bloco.

6. REFERÊNCIAS

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

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecido – Determinação de absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 8491**: Tijolo de solo-cimento — Requisitos. Rio de Janeiro, 2012a.

_____. **NBR 8492**: Tijolo de solo-cimento — Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012b.

_____. **NBR 10833**: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica – Procedimento. . Rio de Janeiro 2013a.

_____. **NBR 10836**: Bloco de solo-cimento sem função estrutural - Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água - Método de ensaio 2013b.

_____. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

ABRELPE. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. 2014. Disponível em: < <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2014.pdf> >. Acesso em: 20/02/2018.

AMAYA, A. *et al.* Preparation of Charcoal Pellets from Eucalyptus Wood with Different Binders. **Journal of Energy and Natural Resources**, v. 4, n. 2, p. 34, 2015.

ANDRADE LOPES, G.; BRITO, J. O.; DE MOURA, L. F. USO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS MADEIREIROS NA PRODUÇÃO DE CERÂMICAS NO ESTADO DE SÃO PAULO. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 679-686, 2016. ISSN 1980-5098.

ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. **IV Seminário Desenvolvimento sustentável e a Reciclagem na construção-civil materiais**, São Paulo, 2001.

AYELE, L. *et al.* Synthesis of zeolite A from Ethiopian kaolin. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 215, p. 29-36, 2015. ISSN 1387-1811.

BAKHAREV, T. Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 6, p. 1224-1232, 2005. ISSN 0008-8846.

BAKHAREV, T.; SANJAYAN, J. G.; CHENG, Y.-B. Alkali activation of Australian slag cements. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 1, p. 113-120, 1999. ISSN 0008-8846.

BARBOSA, L. *et al.* Caracterización fisicoquímica de un biomaterial marino con fines de restauración de bienes culturales. **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**, v. 35, n. 136, p. 303-314, 2011. ISSN 0370-3908.

BARBOSA, V. F.; MACKENZIE, K. J.; THAUMATURGO, C. Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. **International Journal of Inorganic Materials**, v. 2, n. 4, p. 309-317, 2000. ISSN 1466-6049.

BHATTY, J. I. *et al.* The derivation of Kinetic Parameters in Analysis of Portland Cement for Portlandite and Carbonate by thermogravimetry **American Society for Testing and Materials**, p. 204-215, 1988.

BORLINI, M. *et al.* Cinza da lenha para aplicação em cerâmica vermelha Parte I: características da cinza (Firewood ash for application in red ceramic Part I: characteristics of the ash). **Cerâmica**, v. 51, p. 192-196, 2005.

BRAGANÇA, M. *et al.* The utilization of nanoadditions to enhance the durability of concrete applied to hydraulic structures. **Espaço Energia**, n. 24, p. 26-34, 2016.

BROUGH, A.; ATKINSON, A. Sodium silicate-based, alkali-activated slag mortars: Part I. Strength, hydration and microstructure. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 6, p. 865-879, 2002. ISSN 0008-8846.

BS. **EN 10020**: Steel Definition and Classification Grades of Steel. European Committee for Standardisation, 2000.

CARVALHO, P. S. L. D. *et al.* Minério de ferro. **BNDES Setorial, Rio de Janeiro**, n. 39, p. 197-233, 2014. ISSN 1414-9230.

CHEEMA, T. S.; KLINGER, R. E. Compressive Strength of Concrete Masonry Prisms. **Journal Proceedings**, v. 83, n. 1, 1/1/1986 1986.

CHEN, C. *et al.* Feasibility of manufacturing geopolymer bricks using circulating fluidized bed combustion bottom ash. **Environmental technology**, v. 33, n. 11, p. 1313-1321, 2012. ISSN 0959-3330.

CNI. **Indústria Brasileira de Cimento: Base para a construção do desenvolvimento**. PORTLAND, C. N. D. I. A. B. D. C. Brasília 2012.

COLELLA, C.; GENNARO, M. D.; AIELLO, R. Use of zeolitic tuff in the building industry. **Reviews in mineralogy and geochemistry**, v. 45, n. 1, p. 551-587, 2001. ISSN 1529-6466.

COLLINS, F. G.; SANJAYAN, J. G. Capillary shape: influence on water transport within unsaturated alkali activated slag concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 22, n. 3, p. 260-266, 2010. ISSN 0899-1561.

CRISTELO, N. *et al.* Effect of calcium content on soil stabilisation with alkaline activation. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 167-174, 2012. ISSN 0950-0618.

DA SILVA, M. F. C. G. **Blocos de terra compactada com e sem materiais cimentícios**. 2015. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

DAVIDOVITS, J. Chemistry of geopolymeric systems. Terminology. **Proceedings of 99 Geopolymere Conference**, 1999.

DENARI, G. B.; CAVALHEIRO, E. **Princípios e aplicações de análise térmica**. 2012. Material de Apoio - Curso Teórico/Prático Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP.

DEVENTER, J. S. V. *et al.* Microstructure and durability of alkali-activated materials as key parameters for standardization. **Journal of Sustainable Cement-Based Materials**, v. 4, n. 2, p. 116-128, 2015. ISSN 2165-0373.

DNPM. **Sumário Mineral**. MINERAL, D. N. D. P. Brasília. 35 2015.

DOWNS, R. *et al.* Interactive software for calculating and displaying X-ray or neutron powder diffractometer patterns of crystalline materials. **American Mineralogist**, v. 78, n. 9-10, p. 1104-1107, 1993. ISSN 0003-004X.

ENERGIA, M. D. M. E. **Resenha Energética Brasileira**. ENERGIA, M. D. M. E. 2015.

ESPÓSITO, T. *et al.* Utilização de rejeito de minério para a fabricação de Tijolos de Rejeito-Cimento-TRC. XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2014, Goiânia.

FERNANDES, G. **Comportamento de Estruturas de Pavimentos Ferroviários com Utilização de Solos Finos e/ou Resíduos de Mineração de Ferro**. 2005. 250 (Tese de Doutorado). Universidade de Brasília, Brasília.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements☆. **Fuel**, v. 82, n. 18, p. 2259-2265, 2003. ISSN 0016-2361.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: effect of the activator. **Cement and concrete research**, v. 35, n. 10, p. 1984-1992, 2005. ISSN 0008-8846.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, J.; PUERTAS, F. Alkali-activated slag mortars: mechanical strength behaviour. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 8, p. 1313-1321, 1999. ISSN 0008-8846.

FERREIRA, R. D. C.; GOBO, J. C. D. C.; CUNHA, A. H. Incorporação de casca de arroz e de braquiária e seus efeitos nas propriedades físicas e mecânicas de tijolos de solo-cimento. **Engenharia Agrícola, Jaboticabal**, v. 28, n. 1, p. 1-11, 2008.

FOELKEL, C. Resíduos Sólidos Industriais do Processo de Fabricação de Celulose Kraft de Eucalipto: Resíduos Minerais. **Eucalyptus Online Book. São Paulo**, v. 25, n. 5, 2011.

GALIANO, Y. L.; PEREIRA, C. F.; VALE, J. Stabilization/solidification of a municipal solid waste incineration residue using fly ash-based geopolymers. **Journal of hazardous materials**, v. 185, n. 1, p. 373-381, 2011. ISSN 0304-3894.

GLUITZ, A. C.; MARAFÃO, D. **Utilização da cinza da madeira de eucalipto na substituição parcial do cimento Portland em argamassa**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso Química, Universidade Tecnológica do Paraná, Pato Branco.

GONÇALVES, T. A. P. *et al.* A contribution to the identification of charcoal origin in Brazil: I-anatomical characterization of corymbia and eucalyptus. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 16, n. 3, p. 323-336, 2014. ISSN 0718-221X.

GOULART, J. M. D. A. **Tecnologia apropriada e sustentável na habitação de interesse social: o uso do bloco de terra comprimida**. 2009. Dissertação (Mestrado). Engenharia Civil, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

GUALTIERI, A. F.; VENTURELLI, P. In situ study of the goethite-hematite phase transformation by real time synchrotron powder diffraction. **American Mineralogist**, v. 84, n. 5-6, p. 895-904, 1999. ISSN 1945-3027.

GUERRERO, M. *et al.* Pyrolysis of eucalyptus at different heating rates: studies of char characterization and oxidative reactivity. **Journal of analytical and applied pyrolysis**, v. 74, n. 1, p. 307-314, 2005. ISSN 0165-2370.

GUERRERO, M. *et al.* Characterization of biomass chars formed under different devolatilization conditions: differences between rice husk and eucalyptus. **Energy & Fuels**, v. 22, n. 2, p. 1275-1284, 2008. ISSN 0887-0624.

HARDJITO, D.; WALLAH, S.; RANGAN, B. Research into engineering properties of geopolymer concrete. **International Conference 'Geopolymer2002-tur potential into profit'**, Melbourne, Australia, 2002.

HERNANDEZ, C. *et al.* Pasting characteristics of hematite/quartz systems. **Minerals engineering**, v. 18, n. 9, p. 935-939, 2005. ISSN 0892-6875.

HINDIYARTI, L. **Gas phase sulfur, chlorine and potassium chemistry in biomass combustion**. 2007. (Ph.D Thesis). Chemical Department, Technical University of Denmark, Denmark.

HUANG, X. *et al.* Development of green engineered cementitious composites using iron ore tailings as aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 757-764, 2013. ISSN 0950-0618.

IBRAM. Gestão e manejo de rejeitos da mineração. 2016. Disponível em: < <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00006222.pdf> >. Acesso em: 20/02/2018.

INOUE, M. *et al.* Alcohothermal treatments of gibbsite: Mechanisms for the formation of boehmite. **Clays and clay Minerals**, v. 37, n. 1, p. 71-80, 1989. ISSN 0009-8604.

ISMAIL, I. *et al.* Modification of phase evolution in alkali-activated blast furnace slag by the incorporation of fly ash. **Cement and Concrete Composites**, v. 45, p. 125-135, 2014. ISSN 0958-9465.

JENSEN, P. A. *et al.* Experimental investigation of transformation and release to gas phase of potassium and chlorine during straw pyrolysis. **Energy Fuels**, v. v.14, p. 1280-1285, 2000.

JUÁREZ, M. F.-D.; GÓMEZ-BRANDÓN, M.; INSAM, H. Merging two waste streams, wood ash and biowaste, results in improved composting process and end products. **Science of The Total Environment**, v. 511, p. 91-100, 2015. ISSN 0048-9697.

KAPELUSZNA, E. *et al.* Incorporation of Al in CASH gels with various Ca/Si and Al/Si ratio: Microstructural and structural characteristics with DTA/TG, XRD, FTIR and TEM analysis. **Construction and Building Materials**, v. 155, p. 643-653, 2017. ISSN 0950-0618.

KIRSCHNER, A.; HARMUTH, H. Investigation of geopolymer binders with respect to their application for building materials. **Ceramics Silikáty**, v. 48, n. 11, p. 7-20, 2004.

KRÓL, M.; MINKIEWICZ, J.; MOZGAWA, W. IR spectroscopy studies of zeolites in geopolymeric materials derived from kaolinite. **Journal of Molecular Structure**, v. 1126, p. 200-206, 2016. ISSN 0022-2860.

LARA, L. F. S. **Aglomerante de baixo carbono a partir da cinza de cavaco de eucalipto e sílica ativa**. 2016. (Dissertação). Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica, Belo Horizonte.

LIMA, R. **Estudo da durabilidade de paredes monolíticas e tijolos de solo-cimento incorporados com resíduo de granito**. 2010. Dissertação (Mestrado). Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil.

LUZ, A. B. D.; LINS, F. A. F. In: (Ed.). **Introdução ao tratamento de minérios**. 5. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. cap. 1, p.3-20. ISBN 8561121629.

MAGALHAES, F. **Síntese e caracterização de óxidos de ferro e compósitos para aplicações no tratamento redox de efluentes aquosos**. 2008. Tese (Doutorado). Química, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

MAIA, A. Á. B.; ANGÉLICA, R. S.; NEVES, R. D. F. Estabilidade térmica da zeólita A sintetizada a partir de um rejeito de caulim da Amazônia. **Cerâmica**, v. 54, 2008. ISSN 0366-6913.

MMA. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos Versão Preliminar**: Brasília 2011.

MONK, C. B. J. **A historical Survey and Analysis of the Compressive Strength of Brick Masonry**. Structural Clay Products Research Foundation, 1967.

MYBURG, A. A. *et al.* The genome of *Eucalyptus grandis*. **Nature**, v. 510, n. 7505, p. 356-362, 2014. ISSN 0028-0836.

NEN, E. 7375: 2004. **Leaching characteristics of moulded or monolithic building and waste materials**, 2004.

NEVES, C.; FARIA, O. B. Técnicas de construção com terra. **Bauru, SP: FEB-UNESP/PROTERRA.**, v. 14, n. 08, p. 2013, 2011.

OH, J. E. *et al.* The evolution of strength and crystalline phases for alkali-activated ground blast furnace slag and fly ash-based geopolymers. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 2, p. 189-196, 2010. ISSN 0008-8846.

PALOMO, A. *et al.* Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 7, p. 997-1004, 1999. ISSN 0008-8846.

PASSOS, M. E. M.; LIMA, S. M. Z.; SANTOS, F. A. Utilização de tijolos solocimento na construção de casas populares: treinamento de mão de obra e resultados. **XXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Campinas-SP, 2001. Disponível em: < http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2001_TR19_0369.pdf >.

PINHEIRO, M. L. *et al.* Experimental evaluation of pressed blocks of soil-cement with grits addition. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 2, p. 29-46, 2013. ISSN 1678-8621.

PINTO-COELHO, R. M. Existe governança das águas no Brasil? Estudo de caso: O rompimento da Barragem de Fundão, Mariana (MG). **Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico**, v. 24, 2015. ISSN 2525-6084.

PONZONI, C. *et al.* Chromium liquid waste inertization in an inorganic alkali activated matrix: Leaching and NMR multinuclear approach. **Journal of hazardous materials**, v. 286, p. 474-483, 2015. ISSN 0304-3894.

PORTES, A. M. C. **Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta**. 2013. Dissertação (Mestrado). Geotecnia e transportes, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG.

PRESOTTI, E. D. S. **Influência do teor de ferro nos parâmetros de resistência de um rejeito de minério de ferro**. 2002. (Dissertação). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

PRODANOV, C. C.; DE FREITAS, E. C. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico-2ª Edição**. Editora Feevale, 2013. ISBN 8577171582.

PROVIS, J. L.; BERNAL, S. A. Geopolymers and related alkali-activated materials. **Annual Review of Materials Research**, v. 44, p. 299-327, 2014. ISSN 1531-7331.

PROVIS, J. L. *et al.* X-ray microtomography shows pore structure and tortuosity in alkali-activated binders. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 6, p. 855-864, 2012. ISSN 0008-8846.

PROVIS, J. L.; PALOMO, A.; SHI, C. Advances in understanding alkali-activated materials. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 110-125, 2015. ISSN 0008-8846.

PUERTAS, F. *et al.* Alkali-activated fly ash/slag cements: strength behaviour and hydration products. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 10, p. 1625-1632, 2000. ISSN 0008-8846.

PUERTAS, F. *et al.* A model for the CASH gel formed in alkali-activated slag cements. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 31, n. 12, p. 2043-2056, 2011. ISSN 0955-2219.

RESENDE, D. S. *et al.* Eucalyptus Chip Ashes in Cementitious Composites. **Materials Science Forum**, v. 775, p. 205-209, 2014. ISSN 3037859431.

RESENDE, D. S. D. **Estudo do efeito da incorporação de cinzas de cavaco de eucalipto como material cimentício suplementar**. 2013. Tese (Doutorado). Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto-MG.

RIGO, R. T. *et al.* Um novo procedimento de síntese da zeólita A empregando argilas naturais. **Química nova. São Paulo. Vol. 32, n. 1 (2009), p. 21-25**, 2009. ISSN 0100-4042.

SANTANA, D. *et al.* Zeólita A sintetizada a partir de rejeitos do processo de beneficiamento de caulim. **Cerâmica**, v. 58, n. 346, p. 238-243, 2012.

SHI, Z. *et al.* Comparison of alkali-silica reactions in alkali-activated slag and Portland cement mortars. **Materials and Structures**, v. 48, n. 3, p. 743-751, 2015. ISSN 1359-5997.

SILVA FILHO, S. *et al.* Synthesis of Zeolite A employing Amazon kaolin waste. **Cerâmica**, v. 61, n. 360, p. 409-413, 2015. ISSN 0366-6913.

SILVA, M. J. *et al.* Utilização de resíduos da indústria siderúrgica na fabricação de blocos de concreto para pavimentação. **53º Congresso Brasileiro de Concreto**, Florianópolis-SC, 2011.

SILVA, M. V. **Desenvolvimento de tijolos com incorporação de cinzas de carvão e lodo provenientes de estação de tratamento de água** 2011. (Dissertação). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

SILVA, R. A. *et al.* Mechanical characterisation of dry-stack masonry made of CEBs stabilised with alkaline activation. **Construction and Building Materials**, v. 75, p. 349-358, 2015. ISSN 0950-0618.

SILVA, R. A. *et al.* CEBs stabilised with geopolymeric binders: mechanical performance of dry-stack masonry. **WASCON 2015-9th International Conference on the Environmental and Technical Implications of Construction with Alternative Materials**, p. 1-6, 2015.

SILVA, R. G. O. D. **Estudo laboratorial do desempenho mecânico de misturas asfálticas com resíduos industriais de minério de ferro**. 2010. Tese (Mestrado). Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto-MG.

TANG, J.; GUO, R.; WANG, J. Inhibition of interaction between kaolinite and K_2CO_3 by pretreatment using calcium additive. **Journal of thermal analysis and calorimetry**, v. 114, n. 1, p. 153-160, 2013. ISSN 1388-6150.

TEMUJIN, J. V.; VAN RIESSEN, A.; WILLIAMS, R. Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes. **Journal of hazardous materials**, v. 167, n. 1, p. 82-88, 2009. ISSN 0304-3894.

TORGAL, F. P.; JALALI, S. **A sustentabilidade dos materiais de construção**. Braga: Universidade do Minho 2010. ISBN 9728600224.

VAILLANT, J. M. M. **Avaliação dos parâmetros de lixiviação de metais pesados em matriz de cimento Portland por meio da condutividade elétrica**. 2013. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

VAN JAARSVELD, J.; VAN DEVENTER, J.; LUKEY, G. The characterisation of source materials in fly ash-based geopolymers. **Materials Letters**, v. 57, n. 7, p. 1272-1280, 2003. ISSN 0167-577X.

VENUGOPAL, K.; SASALATTI, V. M. Ambient Cured Alkali Activated Flyash Masonry Units. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 149, n. 1, p. 012073, 2016. ISSN 1757-899X.

WHITTINGTON, B. The chemistry of CaO and $Ca(OH)_2$ relating to the Bayer process. **Hydrometallurgy**, v. 43, n. 1-3, p. 13-35, 1996. ISSN 0304-386X.

WINNEFELD, F. *et al.* Assessment of phase formation in alkali activated low and high calcium fly ashes in building materials. **Construction and building materials**, v. 24, n. 6, p. 1086-1093, 2010. ISSN 0950-0618.

WOLFF, A. P. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro de minas da Vale**. 2009. Dissertação (Mestrado). Engenharia de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Ouro Preto-MG.

XU, H.; VAN DEVENTER, J. The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. **International Journal of Mineral Processing**, v. 59, n. 3, p. 247-266, 2000. ISSN 0301-7516.

YUE, G. *et al.* **Proceedings of the 20th International Conference on Fluidized Bed Combustion**. Springer Science & Business Media, 2010. ISBN 3642026826.

ZHAO, S.; FAN, J.; SUN, W. Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 540-548, 2014. ISSN 0950-0618.

7. APÊNDICE A

Análise estatística entre médias do ensaio de resistência à compressão aos 7 dias para os traços com relação cinza/rejeito igual a 70/30 e $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ igual a 1,55 e 1,85.

Tabela 10 - ANOVA $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ igual a 1,55 e 1,85 e cinza rejeito igual a 70/30

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,064067	1	0,064067	0,285163	0,621634	7,708647
Dentro dos grupos	0,898667	4	0,224667			
Total	0,962733	5				

Análise estatística entre médias do ensaio de resistência à compressão aos 7 dias para os traços com relação cinza/rejeito igual a 50/ 50e $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ igual a 1,55 e 1,85.

Tabela 11 - ANOVA $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ igual a 1,55 e 1,85 e cinza rejeito igual a 50/50

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,132017	1	0,132017	0,731732	0,440535	7,708647
Dentro dos grupos	0,721667	4	0,180417			
Total	0,853683	5				

Análise estatística entre médias do ensaio de resistência à compressão aos 7 dias para os traços com relação cinza/rejeito igual a 30/70 e $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ igual a 1,55 e 1,85.

Tabela 12 - ANOVA $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ igual a 1,55 e 1,85 e cinza rejeito igual a 30/70

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,022817	1	0,022817	4,444805	0,102691	7,708647
Dentro dos grupos	0,020533	4	0,005133			
Total	0,04335	5				

Conforme pode-se observar na Tabela 10, Tabela 11 e Tabela 12, o valor de P é maior que o grau de significância de 5% e o valor do F calculado é menor que o F

crítico. Devido a estes resultados deve-se aceitar a hipótese nula de que as médias são semelhantes. Logo, podemos concluir que as médias do ensaio de compressão para os traços com relação cinza/rejeito igual a 70/30, 50/50 e 30/70 e $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ igual a 1,55 e 1,85 são semelhantes estatisticamente aos 7 dias.

Análise estatística entre médias do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias para os traços com relação cinza/rejeito igual a 70/30 e $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ igual a 1,55 e 1,85.

Tabela 13 - ANOVA $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ igual a 1,55 e 1,85 e cinza rejeito igual a 70/30

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1,510017	1	1,510017	5,001435	0,088978	7,708647
Dentro dos grupos	1,207667	4	0,301917			
Total	2,717683	5				

Análise estatística entre médias do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias para os traços com relação cinza/rejeito igual a 50/ 50e $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ igual a 1,55 e 1,85.

Tabela 14 - ANOVA $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ igual a 1,55 e 1,85 e cinza rejeito igual a 50/50

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	2,394017	1	2,394017	12,00109	0,025718	7,708647
Dentro dos grupos	0,797933	4	0,199483			
Total	3,19195	5				

Análise estatística entre médias do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias para os traços com relação cinza/rejeito igual a 30/70 e $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ igual a 1,55 e 1,85.

Tabela 15 - ANOVA $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ igual a 1,55 e 1,85 e cinza rejeito igual a 30/70

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1,025067	1	1,025067	6,929247	0,058043	7,708647
Dentro dos grupos	0,591733	4	0,147933			
Total	1,6168	5				

Conforme pode-se observar na Tabela 13, Tabela 14 e Tabela 15, o único traço em que as médias não são consideradas semelhantes aos 28 dias é aquele composto pela relação cinza/rejeito igual a 50/50, visto que o valor de P é menor que o grau de significância de 5% e o valor de F calculado é maior que o valor de F crítico. Nos demais traços aos 28 dias as médias podem ser consideradas semelhantes.