

TAINARA CRISTINA AVILA

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DA MISTURA DE CINZA DA CASCA DE
ARROZ COM HIDRÓXIDO DE SÓDIO NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS
ATIVADAS ALCALINAMENTE**

(STUDY OF THE USE OF RICE HUSK ASH MIXTURE WITH SODIUM HYDROXIDE IN THE PRODUCTION
OF ALKALI ACTIVATED MORTARS)

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

TAINARA CRISTINA AVILA

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DA MISTURA DE CINZA DA CASCA DE
ARROZ COM HIDRÓXIDO DE SÓDIO NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS
ATIVADAS ALCALINAMENTE**

(STUDY OF THE USE OF RICE HUSK ASH MIXTURE WITH SODIUM HYDROXIDE IN THE PRODUCTION
OF ALKALI ACTIVATED MORTARS)

Dissertação apresentada à Faculdade
de Engenharia – UNESP – Campus de
Ilha Solteira, para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Civil.

Área do Conhecimento: Estruturas

Orientador: Prof. Dr. José Luiz Pinheiro
Melges

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

A958e Avila, Tainara Cristina.
Estudo da utilização da mistura de cinza da casca de arroz com hidróxido de sódio na produção de argamassas ativadas alcalinamente / Tainara Cristina Avila. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2018
95 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Estruturas, 2018

Orientador: José Luiz Pinheiro Melges
Inclui bibliografia

1. Geopolímero. 2. Argamassas ativadas alcalinamente. 3. Ativação alcalina.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Estudo da utilização da mistura de cinza da casca de arroz com hidróxido de sódio na produção de argamassas ativadas alcalinamente.

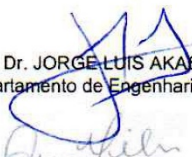
AUTORA: TAINARA CRISTINA AVILA

ORIENTADOR: JOSE LUIZ PINHEIRO MELGES

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA CIVIL,
área: ESTRUTURAS pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. JOSE LUIZ PINHEIRO MELGES
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. JORGE LUIS AKASAKI
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof.ª Dra. ANA PAULA SILVA MILANI
Centro de Ciência Exatas e Tecnologia - CCET / Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

Ilha Solteira, 12 de julho de 2018

Dedico este trabalho aos meus pais José Luís Avila e Maria Helena Pereira Borges, à minha irmã Tatiane e aos meus sobrinhos Felipe e Guilherme, por todo incentivo e paciência.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a Deus que tornou tudo isso possível, deu-me vida e me mostrou o caminho certo a seguir. Além de colocar na minha vida tantas pessoas maravilhosas, que fizeram toda a diferença.

Agradeço aos meus pais, José Luís Avila e Maria Helena Pereira Borges, por sempre me apoiarem e me ensinarem o caminho certo a seguir. Sem o apoio e compreensão destes eu jamais teria chegado até aqui.

Agradeço à minha irmã Tatiane, meu cunhado Regis e meus sobrinhos Felipe e Guilherme, por todo apoio dado, e pela compreensão quando não pude estar presente.

Agradeço ao meu namorado José Diomaro, pelo apoio, pela paciência e compreensão, mesmo com a distância imposta durante todo esse tempo. Nada disso teria sido possível sem o seu companheirismo.

Agradeço ao orientador Prof. Dr. José Luiz Pinheiro Melges, ao Prof. Dr. Jorge Luis Akasaki, e ao Prof.Dr. João Claudio Bassan de Moraes por todos os ensinamentos ao longo do mestrado, bem como pela paciência e por sempre estarem disponíveis para me auxiliar no que fosse possível.

Agradeço ao Prof.Dr. Geraldo de Freitas Maciel, juntamente com seu orientado João Batista, pela orientação quanto à utilização de equipamentos do laboratório de reologia.

Agradeço aos técnicos do Laboratório Central de Engenharia Civil da FEIS/UNESP, Flávio, Gilson, Osias e Natália, pela colaboração ao longo de toda a pesquisa, bem como pela amizade ao longo desta caminhada.

Agradeço aos alunos do grupo de pesquisa MAC, João Victor, Adriana, Alan, Danilo, Letícia, Paulo Victor, Guilherme, Camila, Maria Julia, Isabela, Mateus, que colaboraram de forma direta ou indireta com a minha pesquisa, além de me proporcionarem grandes momentos de descontração e amizade.

Agradeço à Gisele, doutoranda do programa de ciências dos materiais, por ter me auxiliado nos ensaios de FTIR.

Agradeço imensamente ao Correrilha, local que me acolheu, onde pude encontrar minha nova família, uma vez que lá encontrei amizades que carregarei por onde for.

Por fim agradeço ao Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela bolsa de estudos concedida.

RESUMO

Atualmente, é vasta a quantidade de materiais estudados com potencial de substituir o cimento Portland em matrizes cimentícias, uma vez que a produção do mesmo é responsável pela emissão de grande quantidade de CO₂, o que contribui drasticamente para o efeito estufa. Nesse contexto, os aglomerantes ativadas alcalinamente são materiais que prometem qualidades similares ou superiores àqueles à base de cimento, porém produzidos com elementos menos agressivos ao meio ambiente. Neste trabalho, é realizado o estudo da aplicação de Cinza da Casca de Arroz (CCA) com Hidróxido de Sódio (NaOH) na produção de solução alcalina, para ativação do metacaulim, material este que já possui resultados positivos quando ativado com silicato de sódio, e outros ativadores obtidos comercialmente. A solução de CCA-NaOH é utilizada como substituta do silicato de sódio comercial, uma vez que, além de utilizar um resíduo em sua produção, dando a ele uma destinação adequada, observa-se uma significativa economia de energia, já que a produção de silicato de sódio demanda uma grande quantidade de energia para sua obtenção. Para que a solução de CCA-NaOH apresente potencial de ativar o metacaulim, é necessário manter tais materiais, por 24h em meio térmico, para que ocorra a dissolução da sílica do CCA. Utilizando-se a composição CCA-NaOH, foram elaborados 5 traços de argamassa com relações molares SiO₂/NaOH iguais a 0.0; 0.4; 0.8; 1.2 e 1.6. Também foram elaborados outros 5 traços com as mesmas relações molares, mas dessa vez utilizando-se o silicato de sódio comercial para efeito de comparação. Observou-se a importância do uso do recipiente termostático para que maiores resistências pudessem ser alcançadas. Também foi comprovado o efeito reativo da CCA. Por meio de ensaios MEV, FTIR e compressão axial, foi possível constatar a eficiência da utilização dos traços CCA-NaOH para ativação alcalina, sendo obtidos resultados de compressão de até 48MPa aos 28 dias, para o traço com relação molar de 1,6.

Palavras-chave: Geopolímero. Argamassas ativadas alcalinamente. Ativação alcalina.

ABSTRACT

Nowadays, the amount of studied materials with the potential to replace Portland cement in cementitious matrices is extensive, since its production is responsible for the emission of a large amount of CO₂, which contributes drastically to the greenhouse effect. In this context, alkali-activated binders are materials that promise qualities similar or superior to those based on cement, but produced with elements that are less aggressive to the environment. In this work, Rice Husk Ash (RHA) with sodium hydroxide (NaOH) are used to produce an alkaline solution for the activation of metakaolin, which has already positive results when activated with sodium silicate or others commercially available activators. The RHA-NaOH solution is used as a substitute for commercial sodium silicate, once in addition to use a residue in its production, giving it an adequate disposal, it works with the fact of saving energy, since the production of silicate of sodium consumes a large amount of energy for its obtainment. In order for the RHA-NaOH solution to have the potential to activate metakaolin, it is necessary to keep such materials for 24 hours in a thermal container in order to dissolve the silica from the CCA. Using the RHA-NaOH solution, 5 mixtures of mortar were prepared with SiO₂ / NaOH molar ratios equal to 0.0; 0.4, 0.8, 1.2 and 1.6. Another 5 mixtures were prepared with the same molar ratios, but this time using commercial sodium silicate for comparison purposes. It was observed the importance of using the thermostatic container so that greater strenghts could be reached. The reactive effect of RHA was also demonstrated. By means of MEV, FTIR and axial compression tests, it was possible to verify the efficiency of the RHA-NaOH mixtures for alkaline activation, obtaining results of compression of up to 48 Mpa, at 28 days, for the mixture with a 1.6 molar ratio.

Keywords: Geopolymer. Alkali-activated mortars. Alkaline activation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Impactos ambientais na cadeia da construção civil	17
Figura 2 – Estruturas de geopolímeros	21
Figura 3 – Publicações com as palavras “geopolymer” e “lightweight geopolymer”	21
Figura 4 – Modelo descritivo para a ativação alcalina de aluminossilicatos	24
Figura 5 – Modelo descritivo para a ativação alcalina segundo Glukhovsky	25
Figura 6 – Materiais produzidos com geopolímeros: a)espuma geopolimérica; b)tijolo maciço; c)blocos vazados; d)blocos maciços	27
Figura 7 – Aplicações de geopolímeros na Austrália feitos pela empresa Zeobond: a)caminhão concretando calçamento em Templestowe; b) calçamento já finalizado em Lyndarum State	28
Figura 8 – Aeroporto de Brisbane, Austrália	28
Figura 9 – Diferentes tipos de metacaulim produzidos por diferentes empresas: a)Metacaulim do Brasil; b) Advanced Cement Technologies; c)Engelhard	30
Figura 10 – Esquema simplificado da produção do silicato de sódio pelo processo de fusão (a) ou hidrotérmico (b)	34
Figura 11 – Curva granulométrica da areia	41
Figura 12 – Máquina universal de ensaios	44
Figura 13 – Equipamentos para ensaio MEV	44
Figura 14 – Equipamentos para ensaio FTIR	45
Figura 15 – Corpos de prova 5cm x 5cm x 5cm produzidos com CCA, sendo a relação molar a)0,0; b)0,4; c)0,8; d)1,2; e)1,6	47
Figura 16 – Imagem do MEV da amostra de relação molar 0,0 aos 28 dias de cura	56
Figura 17 – Imagem do MEV das amostras de traço Ref, feita aos 28 dias, sendo a relação molar a)0,0; b)0,4; c)0,8; d)1,2; e)1,6	57
Figura 18 – Imagem do MEV das amostras de traço CCA+NaOH, feita aos 28 dias, sendo a relação molar a)0,0; b)0,4; c)0,8; d)1,2; e)1,6	57
Figura 19 – Espectroscopia do metacaulim	58
Figura 20 – Espectroscopia da CCA	59
Figura 21 – Espectroscopia realizada após 1 dia de moldagem, sendo a) traço Ref.; b) traço CCA+NaOH	60

Figura 22 – Espectroscopia realizada após 3 dias de moldagem, sendo a) traço Ref.; b) traço CCA+NaOH	60
Figura 23 – Espectroscopia realizada após 7 dias de moldagem, sendo a) traço Ref.; b) traço CCA+NaOH	61
Figura 24 – Espectroscopia realizada após 28 dias de moldagem, sendo a) traço Ref.; b) traço CCA+NaOH	61

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Efeito das condições de queima nas propriedades da CCA.....	35
TABELA 2 – Propriedades físico-químicas do metacaulim	39
TABELA 3 – Características físicas da areia.....	40
TABELA 4 – Composição química da cinza da casca de arroz.....	42
TABELA 5 – Traços CCA+NaOH	46
TABELA 6 – Traços Ref.	47
TABELA 7 – Traços utilizados na produção das argamassas para validação da necessidade de utilização de recipientes termostáticos.....	48
TABELA 8 – Resistência à compressão dos traços T (recipientes termostáticos) e P (recipientes plásticos), em MPa	51
TABELA 9 – Resultado do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova dos traços 1 e 2.....	51
TABELA 10 – Resultado do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova dos traços Ref (em MPa).....	52
TABELA 11 – Resultado do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova dos traços CCA+NaOH (em MPa).....	53

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – Comparativo da temperatura ao longo do tempo.....	50
GRÁFICO 2 – Resistência à compressão após 1 dia de moldagem (em MPa)	54
GRÁFICO 3 – Resistência à compressão após 3 dias de moldagem (em MPa)	54
GRÁFICO 4 – Resistência à compressão após 7 dias de moldagem (em MPa)	55
GRÁFICO 5 – Resistência à compressão após 28 dias de moldagem (em MPa)	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	16
1.2	AGLOMERANTES ATIVADOS ALCALINAMENTE	17
1.3	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	18
1.4	OBJETIVOS DA PESQUISA	18
1.4.1	Objetivo geral	18
1.4.2	Objetivos específicos	19
1.5	JUSTIFICATIVA.....	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	AGLOMERANTES ATIVADOS ALCALINAMENTE	20
2.2	REAÇÃO DE SÍNTESE DE GEOPOLÍMERO	23
2.3	APLICAÇÕES DOS AGLOMERANTES ATIVADOS ALCALINAMENTE	26
2.4	AGLOMERANTES ATIVADOS ALCALINAMENTE PRODUZIDOS COM METACAULIM	29
2.4.1	Definição de metacaulim	29
2.4.2	Metacaulim ativado alcalinamente	30
2.5	ATIVADORES ALCALINOS	31
2.5.1	Silicato de sódio	32
2.5.2	Cinza da Casca de Arroz (CCA) e Hidróxido de Sódio (NaOH)	34
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	39
3.1	MATERIAIS	39
3.1.1	Metacaulim	39
3.1.2	Agregado miúdo	40
3.1.3	Cinza da casca de arroz (CCA)	41
3.1.4	Hidróxido de sódio	42
3.1.5	Silicato de sódio	42

3.1.6	Água de amassamento.....	42
3.2	EQUIPAMENTOS.....	43
3.2.1	Recipiente termostático	43
3.2.2	Argamassadeira industrial	43
3.2.3	Fôrmas de aço	43
3.2.4	Mesa vibratória	43
3.2.5	Máquina universal de ensaios	43
3.2.6	Microscópio eletrônico de varredura (MEV).....	44
3.2.7	Espectroscopia Infravermelha por Transformada de Fourier (FTIR)	45
3.3	METODOLOGIA.....	45
3.3.1	Confeção das argamassas	45
3.3.2	Ensaio para comprovar a necessidade dos recipientes termostáticos	48
3.3.3	Ensaio para demonstrar a reatividade da CCA	48
3.3.4	Amostra para ensaio MEV	48
3.3.5	Amostra para ensaio FTIR	49
3.3.6	Determinação da resistência à compressão	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
4.1	VERIFICAÇÃO DA NECESSIDADE DO RECIPIENTE TERMOSTÁTICO... ..	50
4.2	VERIFICAÇÃO DA REATIVIDADE DA CCA	51
4.3	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	51
4.4	MEV.....	55
4.5	FTIR.....	58
5	CONCLUSÕES	62
	REFERÊNCIAS.....	64
	APÊNDICE A - Análise de variância amostra Ref. 1 dia.....	72
	APÊNDICE B - Análise de variância amostra Ref. 3 dias	73

APÊNDICE C - Análise de variância amostra Ref. 7 dias	74
APÊNDICE D - Análise de variância amostra Ref. 28 dias	75
APÊNDICE E - Análise de variância amostra CCA+NaOH 1 dia	76
APÊNDICE F - Análise de variância amostra CCA+NaOH 3 dias	77
APÊNDICE G - Análise de variância amostra CCA+NaOH 7 dias	78
APÊNDICE H - Análise de variância amostra CCA+NaOH 28 dias	79
APÊNDICE I - Análise de variância amostra de relação molar 0,4 após 1 dia..	80
APÊNDICE J - Análise de variância amostra de relação molar 0,4 após 3 dias	81
APÊNDICE K - Análise de variância amostra de relação molar 0,4 após 7 dias	82
APÊNDICE L- Análise de variância amostra de relação molar 0,4 após 28 dias	83
APÊNDICE M - Análise de variância amostra de relação molar 0,8 após 1 dia	84
APÊNDICE N - Análise de variância amostra de relação molar 0,8 após 3 dias	85
APÊNDICE O - Análise de variância amostra de relação molar 0,8 após 7 dias	86
APÊNDICE P - Análise de variância amostra de relação molar 0,8 após 28 dias	87
APÊNDICE Q- Análise de variância amostra de relação molar 1,2 após 1 dia	88
APÊNDICE R- Análise de variância amostra de relação molar 1,2 após 3 dias	89
APÊNDICE S- Análise de variância amostra de relação molar 1,2 após 7 dias	90
APÊNDICE T- Análise de variância amostra de relação molar 1,2 após 28 dias	91

APÊNDICE U- Análise de variância amostra de relação molar 1,6 após 1 dia	92
APÊNDICE V- Análise de variância amostra de relação molar 1,6 após 3 dias	
.....	93
APÊNDICE X- Análise de variância amostra de relação molar 1,6 após 7 dias	
.....	94
APÊNDICE Z- Análise de variância amostra de relação molar 1,6 após 28 dias	
.....	95

1 INTRODUÇÃO

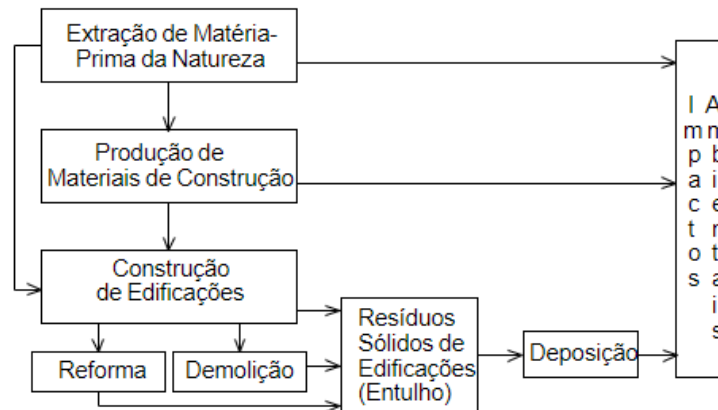
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os impactos ambientais causados pela atividade humana vêm sendo objeto de estudo constante em todo o mundo uma vez que seus efeitos estão se tornando cada vez mais frequentes e devastadores. Com isso, é cada vez maior a preocupação com a sustentabilidade, que visa suprir as necessidades do ser humano de hoje sem comprometer o futuro das próximas gerações.

Nesse contexto, existem reuniões criadas periodicamente entre diferentes países, onde o foco é analisar estratégias a serem tomadas para reduzir os impactos impostos pelo ser humano. Nessas reuniões cada país se compromete a refletir, local e globalmente, sobre como cooperar no estudo de soluções para os problemas socioambientais. Como exemplo de tais reuniões pode-se citar a Conferência das Nações Unidas sobre Meio ambiente humano, ocorrida em Estocolmo, em 1972, que apresentou como foco o comprometimento dos países participantes em se preocuparem em não degradar de forma insustentável o meio ambiente, independentemente de sua política de crescimento econômico. Já a Conferência no Brasil, ocorrida no Rio de Janeiro em 2012, teve como principal objetivo, garantir e renovar o compromisso entre os políticos para o desenvolvimento sustentável.

Neste âmbito, tem-se que a construção civil possui papel fundamental no crescimento do país, sendo responsável por consumir cerca de 40% dos recursos naturais, além de ser grande produtora de resíduos (MENDES, 2017). De acordo com Barreto (2005), a construção civil é uma indústria que produz grandes impactos ambientais, desde a extração das matérias-primas, passando pela execução dos serviços, até a destinação final, onde ocorre grande formação de resíduos. Torgal e Jalali (2007) alegam que a indústria da construção civil é uma das atividades econômicas que mais consome matéria prima extraída do meio ambiente, além de consumir grande quantidade de energia elétrica e de água potável. A Figura 1 ilustra os principais impactos gerados pela construção civil.

Figura 1 – Impactos ambientais da cadeia na construção civil



Fonte: Roth e Garcias (2011).

De acordo com Cortês (2011), a preocupação com a sustentabilidade tem levado a indústria da construção civil a grandes mudanças e em busca de novos conceitos gerenciais em razão de aperfeiçoamento profissional de seus administradores. Devido à pressão exercida pela concorrência em nível internacional e do maior grau de conhecimento e exigência do consumidor, empresas e produtos certificados em qualidade, ética e responsabilidade ambiental são cada vez mais valorizados.

1.2 AGLOMERANTES ATIVADOS ALCALINAMENTE

Desde a década de 40, existem estudos que visam a utilização de materiais de construção capazes de substituir o cimento Portland e que causem menos impacto ao meio ambiente, sem, no entanto, afetar a resistência e durabilidade dos produtos obtidos.

Nesse contexto, na década de 70, Joseph Davidovits, um pesquisador francês, publicou estudos a respeito de materiais que eram ativados a partir de diferentes tipos de aluminossilicatos, e os denominou de geopolímeros.

Aglomerantes ativados alcalinamente são polímeros inorgânicos que apresentam grande potencial de aplicação como aglomerante, em substituição ao cimento Portland (DAVIDOVITS, 1994). Ativação Alcalina é a reação de hidratação de aluminossilicatos com substâncias alcalinas ou alcalinoterrosos, sendo uma vasta

gama de materiais aluminossilicosos suscetíveis a esse tipo de reação (SEVERO et al., 2013).

Dependendo dos materiais utilizados na produção de argamassas ativadas alcalinamente, estas podem reduzir de forma significativa a emissão de CO₂ lançado à atmosfera, se comparada com argamassas produzidas com cimento.

1.3 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O cimento é o material de construção mais utilizado no mundo, uma vez que suas qualidades mecânicas tornam possível a elaboração dos mais variados tipos de construção. De acordo com o SNIC (2016), a produção de cimento no mercado brasileiro, no ano de 2016, foi de 57,2 milhões de toneladas, mesmo o país enfrentando uma queda considerável de vendas, o que demonstra a grande quantidade ainda utilizada deste material.

O grande problema na utilização do cimento é que a sua obtenção é responsável por uma grande emissão de CO₂ na atmosfera, além de extrair uma grande quantidade de recursos naturais. De acordo com Ecycle (2016), as fábricas cimentícias, além de consumirem 2% de toda a energia global, são responsáveis também por 5% de toda a emissão de dióxido de carbono (CO₂) do mundo, contribuindo, em grande parte, para o aumento do efeito estufa, além de produzirem outros gases também poluentes.

1.4 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.4.1 Objetivo geral

O objetivo principal dessa pesquisa é analisar a viabilidade da substituição do silicato de sódio comercial, pelo produto obtido da mistura entre a cinza da casca de arroz e o hidróxido de sódio, na confecção de aglomerantes à base de metacaulim.

1.4.2 Objetivos específicos

- a) Avaliar a resistência à compressão das argamassas ativadas alcalinamente, nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias;
- b) Avaliar a composição mineralógica dos aglomerantes formados, por meio de ensaio de espectroscopia de infravermelho (FTIR), realizado nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias;
- c) Avaliar a microestrutura dos aglomerantes formados por meio de uma análise microscópica (MEV), realizada após 28 dias de cura.

1.5 JUSTIFICATIVA

Embora a utilização de aglomerantes ativados alcalinamente seja bastante promissora, é interessante encontrar um material capaz de substituir o silicato de sódio comercial, na ativação alcalina. Tal substituição é necessária, uma vez que a produção de silicato se dá pela fusão de carbonato de sódio e sílica em um forno com temperatura em torno de 1200°C. Este processo demanda quantidade elevada de energia, para produzir calor, além de exigir alta quantidade de areia, nem sempre encontrada com a facilidade necessária.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AGLOMERANTES ATIVADOS ALCALINAMENTE

O estudo de aglomerantes ativados alcalinamente apresenta sua primeira publicação em 1940, realizada por Jessie Purdon, na Bélgica. Tal pesquisador descobriu que a adição de escória de alto forno a um meio alcalino produzia um novo material, aglomerante, que possuía rápido endurecimento. (PACHECO-TORGAL et. al., 2008).

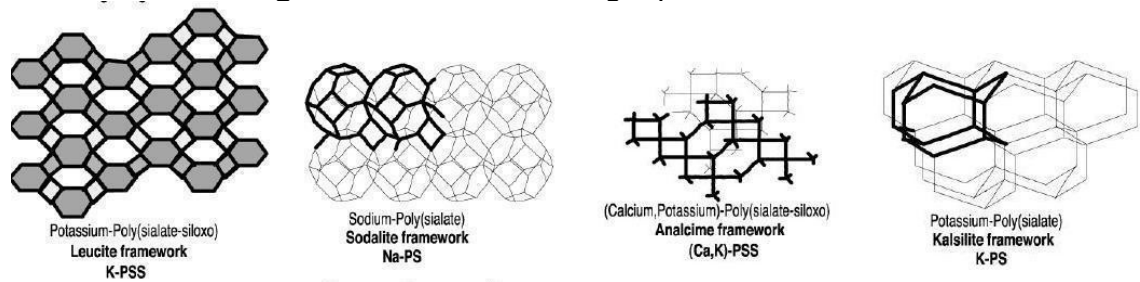
Victor Glukhovsky estudou os aglomerantes utilizados nas antigas construções da Roma e do Egito e, baseado em suas investigações, criou um novo tipo de aglomerante que denominou de “soil cement”. A palavra “soil” foi utilizada, devido à similaridade do novo material com uma rocha moída; já a palavra “cement” foi utilizada por causa das propriedades ligantes do material obtido. Em 1959, Glukhovsky publicou um livro intitulado “Soil Silicates”, onde descreveu a ativação alcalina de aluminatos de cálcio (KRIVENKO, 2005; SKVÁRA et al., 2009).

Davidovits, um pesquisador francês, foi o primeiro a trabalhar com aglomerantes ativados alcalinamente de forma significativa, e os denominou de geopolímeros, no início de 1979. Infelizmente, a maioria dos seus primeiros estudos não foi de natureza acadêmica, de acordo com o próprio Davidovits (DAVIDOVITS; DAVIDOVICS, 1991).

Conforme Buchwald et al. (2005), o nome geopolímero foi escolhido pois “geo” simboliza a semelhança do novo material com materiais geológicos, e “polímero”, porque se baseia na química dos silicoaluminatos, que, por sua vez, resultam da condensação de estruturas planas de aluminossilicatos e silicatos alcalinos, gerando estruturas poliméricas mais complexas, tridimensionais.

A Figura 2 demonstra a estrutura de alguns geopolímeros que são empregados em diversas áreas.

Figura 2 – Estruturas de geopolímeros

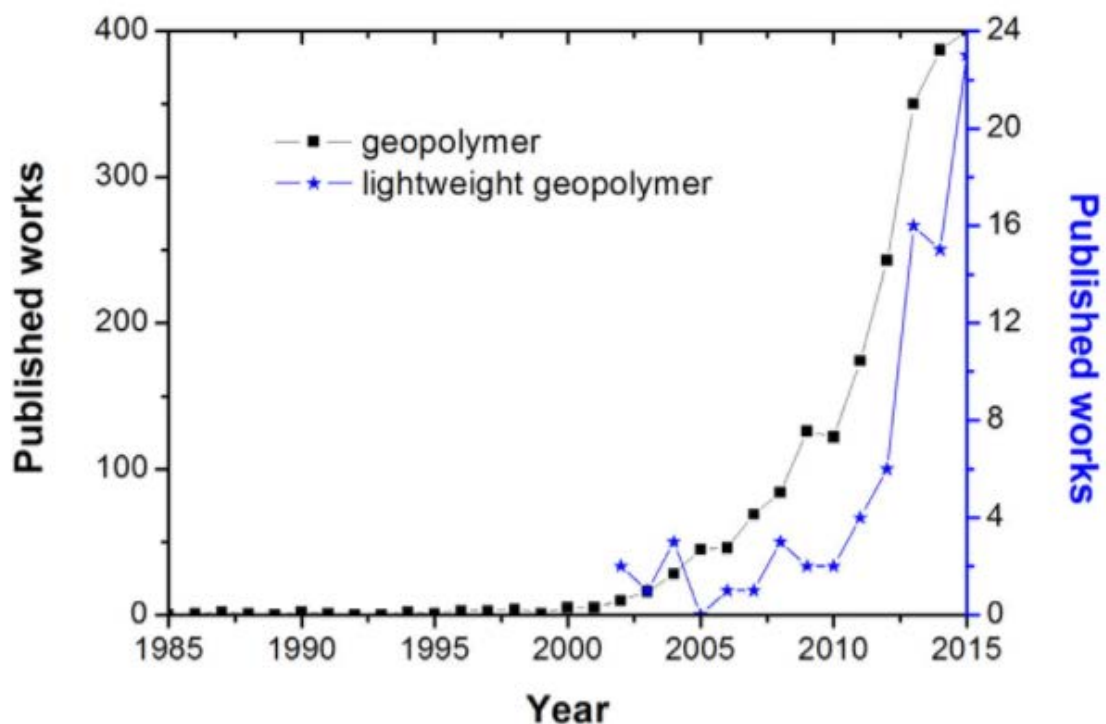


Fonte: Davidovits e Davidovics (1991)

A partir de 1989, foram surgindo artigos que mostravam relatórios sobre o processamento, propriedades, aplicações e impactos causados pelos aglomerantes ativados alcalinamente (WILLIAMS, 2015).

A Figura 3 mostra como foi aumentando a quantidade de publicações com as palavras “geopolymer” e “lightweight geopolymer”, de 1985 até 2015. Nota-se que, de 1989 até meados de 2005, houveram poucas publicações a respeito do assunto. Somente a partir de 2005 é que observou-se o crescimento exponencial das publicações sobre o tema.

Figura 3 – Publicações com as palavras “geopolymer” e “lightweight geopolymer”



Fonte: Novais et al. (2016)

Para Dias e Thaumaturgo (2001), o aglomerante ativado alcalinamente é uma alternativa vantajosa de material utilizado no lugar do cimento Portland. Segundo os autores, a vantagem principal é a redução da emissão de dióxido de carbono (CO_2) na fase de produção do cimento geopolimérico, se comparado ao cimento Portland. Em média a produção de 1 tonelada de cimento Portland gera, em média, 1 tonelada de CO_2 ; já a produção de cimento geopolimérico apresenta menor gasto energético, reduzindo a emissão do gás poluente em torno de 80 a 90%, dependendo do material alcalino utilizado.

Mclellan et al. (2011) realizaram estudos na Austrália e constataram que embora o geopolímero venha a ser uma promessa para redução dos impactos causados ao meio ambiente na produção de cimento, este material pode também ser um agravante à emissão. Benefícios somente são obtidos quando são aplicadas determinadas matérias-primas, sendo necessário sempre um estudo prévio, principalmente do material responsável pela ativação alcalina.

Xu e van Deventer (2000) alegaram que os aglomerantes ativados alcalinamente podem possuir, como matéria-prima, qualquer material inorgânico que seja constituído por sílica e alumina, desde que este material tenha sofrido um tratamento térmico tornando-o amorfo, e, com isso, mais reativo. Sendo assim, existe uma variação muito grande de matéria-prima disponível.

Mozgawa e Deja (2009) afirmam que a escória de alto-forno é um material bastante interessante para a produção de geopolímeros, uma vez que tal material é econômico, favorável ao meio ambiente e altamente resistente a ataques químicos. Os autores alegam que, embora a escória já seja utilizada na construção civil, sua aplicação na tecnologia de geopolimerização traria ainda mais benefícios na utilização da mesma.

Songpiriyakij et al. (2011) avaliaram a aderência de barras de aço em concreto, utilizando pastas de aglomerantes geopoliméricos. Com isso, chegaram à conclusão de que pastas produzidas por ativação alcalina apresentam mais aderência do que epóxis comerciais.

Alguns pesquisadores já estudam a utilização de geopolímeros, com matérias-primas que já são conhecidas por seu bom desempenho, com aplicações de novas fontes de aluminossilicato, a fim de verificar a possibilidade de utilização também destes materiais. Albitar et al. (2017) analisaram a durabilidade de concretos de

geopolímeros produzidos a partir de cinzas volantes de escórias granuladas de fundição de chumbo, bem como de concreto convencional. O concreto convencional apresentou menor absorção de água do que aqueles ativados alcalinamente. Além disso, pode-se constatar que sulfatos de sódio apresentam maior impacto aos concretos geopoliméricos; no entanto, quando o ataque é realizado com ácido sulfúrico, o concreto convencional apresenta ser mais suscetível à degradação. No geral, ficou constatado que, se o meio a que for submetido o concreto não houver sulfato de sódio, o concreto ativado alcalinamente apresenta durabilidade superior ao convencional.

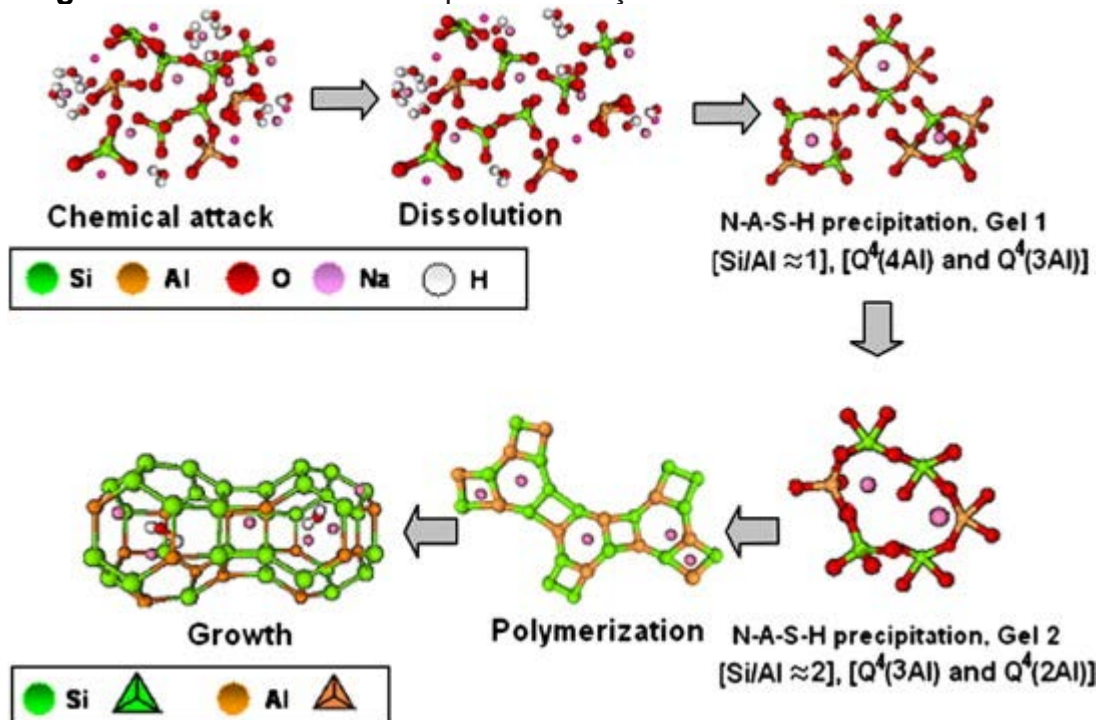
Pouhet e Cyr (2016) avaliaram a produção de geopolímeros produzidos com metacaulim a fim de substituir o cimento na produção de concreto. Foi verificado que os concretos de geopolímeros apresentam maior porosidade. No entanto, ainda assim apresentam melhores propriedades mecânicas do que o concreto de cimento Portland.

2.2 REAÇÃO DE SÍNTESE DE GEOPOLÍMERO

Para Davidovits (1994), a reação de síntese de geopolímero baseia-se na capacidade do alumínio induzir, através da ativação alcalina, alterações químicas e cristalográficas numa matriz silicosa. Para o autor, a reação transforma uma estrutura plana em uma estrutura reticulada espacial.

Fernández-Jiménez e Palomo (2005) propuseram um modelo gráfico para o desenvolvimento microestrutural de cimentos de aluminossilicatos alcalinos (com base em ensaios de FTIR), conforme a Figura 4. De acordo com os autores, independentemente de quais sejam os ativadores e as matérias-primas empregadas, ocorrem as seguintes etapas na formação dos aglomerantes ativados alcalinamente: dissolução/precipitação, precipitação/polimerização e polimerização/crescimento.

Figura 4 – Modelo descritivo para a ativação alcalina de aluminossilicatos



Fonte: Shi, Jiménez e Palomo (2011)

Glukhovsky (1980) propôs um mecanismo geral de representação da ativação alcalina em materiais constituídos fundamentalmente por sílica e alumina reativa. De acordo com o autor, o passo inicial da reação ocorre na quebra das ligações covalentes Si-O-Si e Al-O-Si, que acontece quando o pH da solução alcalina aumenta. Posteriormente, ocorre a polimerização que é a acumulação dos produtos das quebras de ligações, que simultaneamente interagem entre eles para formar uma estrutura coagulada. Para finalizar ocorre a cristalização da estrutura, sendo que a qualidade e a quantidade dos cristais formados dependem da composição mineralógica da fase inicial, da natureza do componente alcalino e das condições de endurecimento das amostras.

Os três passos, são explicados a seguir, segundo Pereira (2014):

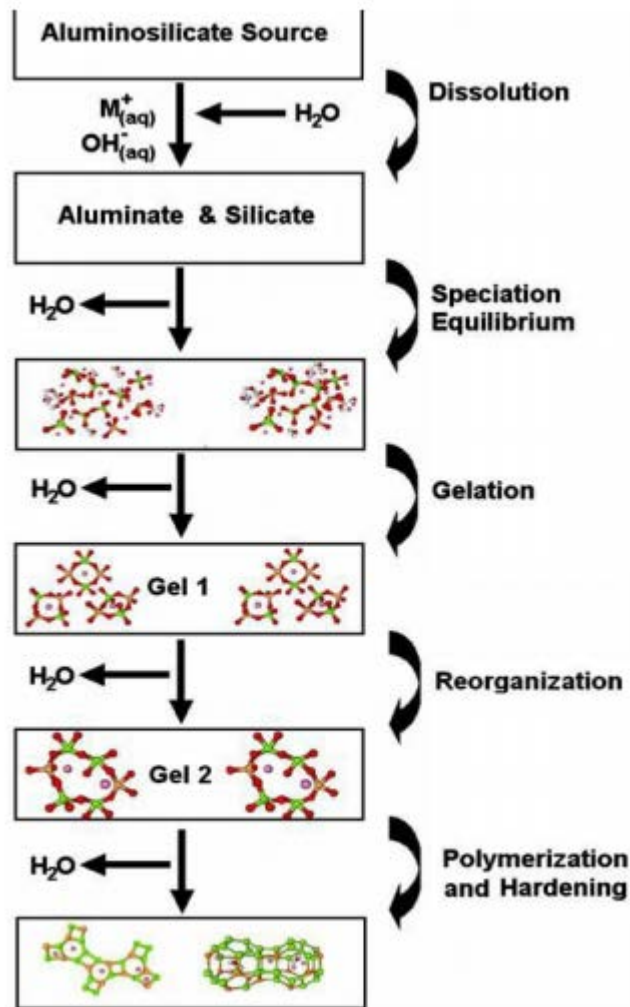
Dissolução/Precipitação: nesta fase inicial ocorrem as quebras das ligações de Si-O-Si, Al-O-Al e Al-O-Si, decorrentes da presença de átomos doadores de elétrons, o que produz elementos ativos de aluminossilicato, causados pelo aumento do pH da estrutura.

Reorganização: posteriormente, ocorre a acumulação de produtos, formando uma estrutura coagulada e por conseguinte, ocorre o processo de poli condensação.

Polimerização: por último as partículas de aluminossilicato condensadas e os materiais ricos em aluminossilicato que não sofreram reação precipitam-se para formar o aglomerante. Nesta fase é que ocorre a cristalização da estrutura.

A Figura 5 traz uma demonstração do processo de ativação alcalina proposta por Glukhovsky (1980).

Figura 5 – Modelo descritivo para a ativação alcalina segundo Glukhosvsky



Fonte: Duxson et al. (2006)

Segundo Shi, Jiménez e Palomo (2011), independente do ativador da solução e da matéria-prima utilizada, o processo dos aglomerantes ativados alcalinamente passará por três processos: dissolução/precipitação, precipitação/polimerização e polimerização/crescimento, o que condiz com o mecanismo utilizado por Glukhovsky (1980).

Se comparado o processo de reação do aglomerante ativado alcalinamente com os do cimento Portland, pode-se concluir que os cimentos dependem da presença de C-S-H (silicato de cálcio hidratado) para a formação da matriz e obtenção de resistência mecânica. Os AAA utilizam a policondensação dos precursores de sílica e alumina e um alto teor de álcali para formarem o aluminossilicato hidratado, obtendo, portanto, resistência estrutural (KHALE; CHAUDHARY, 2007).

2.3 APLICAÇÕES DOS AGLOMERANTES ATIVADOS ALCALINAMENTE

No ano de 2002, Davidovits publicou em uma conferência sobre geopolímeros, os principais avanços alcançados com a aplicação da tecnologia em 30 anos de estudo. O autor enumerou o avanço alcançado, conforme os itens mostrados a seguir (DAVIDOVITS, 2002).

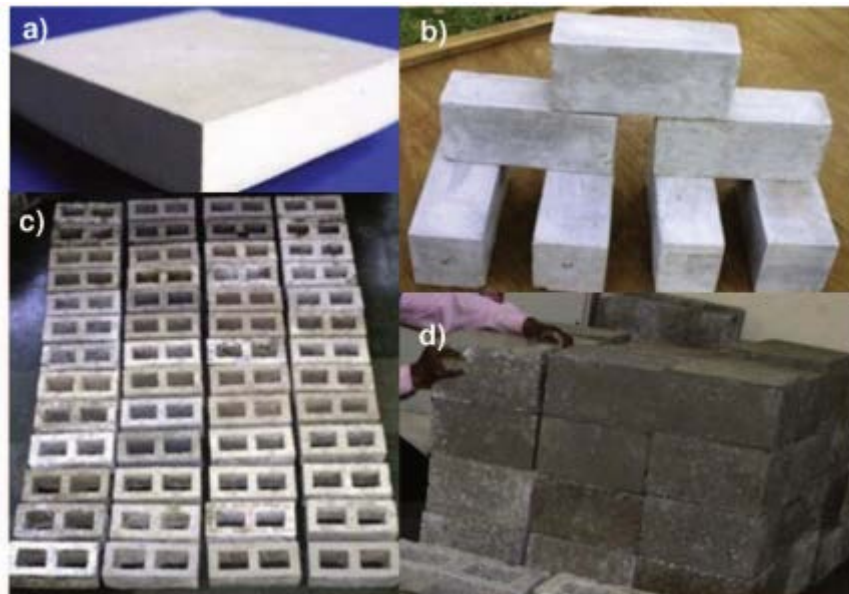
1. painéis de madeira resistentes ao fogo;
2. painéis isolados e paredes;
3. artefatos de pedra decorativa;
4. painéis geopoliméricos espumados (expandidos) para isolamento térmico;
5. materiais de construção de baixa tecnologia;
6. cerâmica de baixa energia;
7. itens refratários;
8. choque térmico refratário;
9. aplicação na fundição de alumínio;
10. cimento geopolimérico e concreto;
11. compósito resistente ao fogo e à prova de fogo para reparação e reforço de infra-estruturas;
12. aplicações de alta tecnologia à prova de fogo, no interior de aeronaves e em automóveis,
13. sistemas de resina de alta tecnologia

De acordo com Sonafrank (2010) na Austrália, Canadá e Europa, o concreto ativado alcalinamente é bastante utilizado em dormentes de ferrovias, painéis pré-fabricados de edificações, blocos, refratários, reparações de rodovias, obras de infraestruturas e em demais locais. Os países em desenvolvimento ainda não utilizam

muito este novo material, mas existem inúmeras pesquisas destinadas ao seu desenvolvimento, uma vez que este material possui várias aplicações.

Singh et al. (2015) citam que os estudos das propriedades das pastas geopoliméricas tornaram possíveis a fabricação de argamassas de concreto, espumas geopoliméricas, tijolos e blocos sólidos (Figura 6).

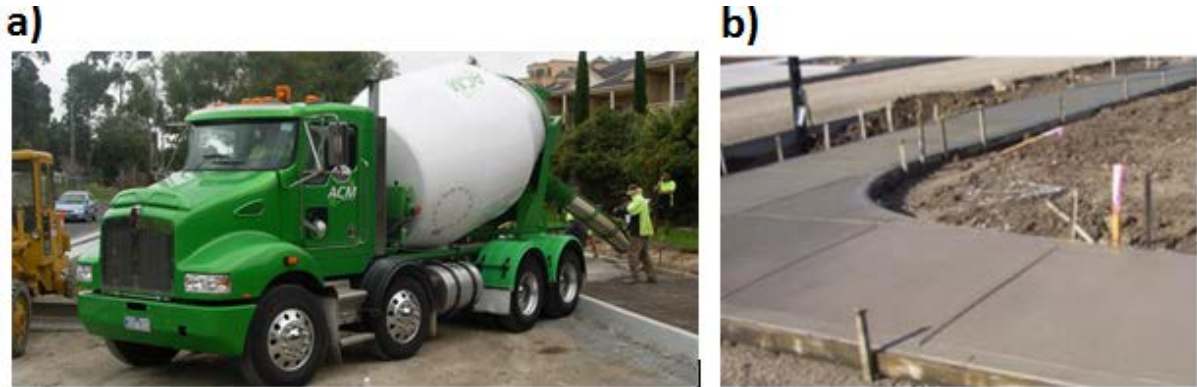
Figura 6 – Materiais produzidos com geopolímero: a) espuma geopolimérica; b) tijolo maciço; c) blocos vazados; d) blocos maciços.



Fonte: Singh et al. (2015)

De acordo com Trindade (2017) uma das primeiras empresas a comercializar produtos geopoliméricos foi a Zeobond na Austrália, criada pelo pesquisador J. Van Deventer. Na Figura 7, são mostradas algumas das aplicações do material comercializado pelo pesquisador. Nota-se que é possível transportar este material em larga escala, assim como ocorre com o concreto convencional.

Figura 7 – Aplicações de geopolímeros na Austrália feitas pela empresa Zeobond: a) Caminhão concretando calçamento em Templestowe; b) Calçamento já finalizado em Lyndarum State.



Fonte: The Zeobond Group (2018)

No dia 28 de setembro de 2014, foi inaugurado em Brisbane, na Austrália, o aeroporto mais ambientalmente correto do mundo (Figura 8). A empresa Wagners EFC forneceu, para a construção deste aeroporto, mais de 30.000 metros cúbicos de concreto geopolimérico. Estima-se uma redução de 6.600 toneladas de emissões de gás carbono na construção do mesmo, que seriam emitidos, se este tivesse sido produzido com cimento Portland (GEOPOLYMER INSTITUTE, 2014).

Figura 8 – Aeroporto de Brisbane, Austrália.



Fonte: Geopolymer Institute (2014)

No Brasil, existe a Uretek, empresa que trabalha com melhoramento de solos para alcançar melhores capacidades de carga de fundação com a injeção de geopolímeros expansivos. O diferencial no caso desta empresa é que o procedimento

utilizado permite aumentar a densificação e compactação do solo logo abaixo de uma edificação, sem escavações, vibrações ou forças mecânicas, ou seja, com maior segurança (ROCHA, 2017).

Este material tem uma vasta gama de aplicações potenciais e apresenta vantagens tecnológicas – particularmente em relação à durabilidade – e também ambientais. Contudo, ainda é necessário aumentar o conhecimento destes materiais para torná-los economicamente viáveis para utilizações generalizadas (SIMÕES, 2012).

2.4 AGLOMERANTES ATIVADOS ALCALINAMENTE PRODUZIDOS COM METACAULIM

2.4.1 Definição de metacaulim

De acordo com Li et al. (2010), o metacaulim é um material aluminossilicato termicamente ativado e que apresenta alta atividade pozolânica. Ele é gerado pela calcinação de argilas cauliníticas em temperaturas entre 600°C e 850°C.

O prefixo “meta” é utilizado para designar mudança, transformação. Já o termo “caulim” é originado do termo chinês “Kauling” (colina alta), que se remete a uma região montanhosa de Jauchau Fu, na China. Tal termo é utilizado para designar um grupo de silicatos hidratados de alumínio, incluindo, principalmente, os mineirais caulinita e haloisita (SILVA 2001; MONTE et al., 2003).

O metacaulim é um material pozolânico amorfo, obtido ao se moer argilas cauliníticas e caulins, e leva-las à ativação térmica em elevadas temperaturas. Tais matérias-primas são constituídas predominantemente por silicato de alumínio hidratado $[Al_2Si_2O_5(OH)_4]$, que perdem hidroxila (OH) de sua estrutura cristalina com a calcinação, e transformam-se em metacaulina $[Al_2Si_2O_7]$, um composto amorfo, com elevado grau de finura (CUNHA et. al., 2010).

Segundo Monte et. al. (2003), os caulins são constituídos com cerca de 45,54% de SiO_2 , 39,50% de Al_2O_3 , 13,96% de H_2O , além de outros elementos menos importantes e em menor quantidade.

Davidovits (1994) alega que o processo de transformação do caulim em metacaulim torna o material bastante reativo, o que aumenta as propriedades

pozolânicas do material. No entanto, o metacaulim obtido pode apresentar diferentes graus de finura, superfície específica e coloração (Figura 9). Tais características dependerão da composição química e mineralógica do caulim utilizado.

Figura 9 – Diferentes tipos de metacaulim produzidos por diferentes empresas: a) Metacaulim do Brasil, b) Advanced Cement Technologies, c) Engelhard.



Fonte: Rocha e Vasconcelos (2006).

2.4.2 Metacaulim ativado alcalinamente

Atualmente existe um grande número de pesquisas relacionadas à ativação alcalina do metacaulim, devido à sua composição química e à sua estrutura amorfa e pulverulenta. Vassalo (2013) estudou a produção de geopolímero a partir da ativação alcalina do metacaulim, utilizando, como meio alcalino, o NaOH, em temperatura ambiente e também em estufa a aproximadamente 85°C. Foram feitos ensaios para verificar as características físico-químicas, mecânicas, microestruturais e mineralógicas do geopolímero obtido. Foi possível constatar o alto poder reativo do geopolímero formado, bem como sua elevada resistência obtida em um curto período de tempo.

Para Duxson et al. (2005), os geopolímeros produzidos com metacaulim apresentam menos impurezas e são materiais de fácil caracterização. São considerados “sistema-modelo”, uma vez que não apresentam as complexidades introduzidas pelo uso de cinzas volantes, escórias ou outras matérias-primas.

Istuque et al. (2016) estudaram a aplicação de cinzas de lodo de esgoto (CLE) na fabricação de argamassas geopoliméricas obtidas através de metacaulim (fonte de aluminossilicato). Os autores realizaram a substituição parcial do metacaulim por CLE nas proporções entre 0 a 20%, obtendo resultados satisfatórios. Os autores observaram que, para uma substituição de 10% e temperatura de cura de 25°C, a

amostra obteve resultados semelhantes à argamassa controle, sem nenhuma substituição.

Muñiz-villarreal et al. (2011) estudaram o efeito de diferentes temperaturas de cura (faixa de 30 a 90°C) na obtenção de geopolímero à base de metacaulim. Foi constatado que os geopolímeros curados a 60°C apresentaram melhores propriedades físicas e mecânicas.

Kong et al. (2007) analisaram os efeitos de aglomerantes geopoliméricos sintetizados com metacaulim e ativados com combinações de silicato de sódio e potássio, ou hidróxido de sódio e potássio, ao serem levados a uma temperatura de 800°C. Os resultados mostraram que as amostras ativadas com silicato de sódio e potássio foram mais resistentes ao calor e que amostras curadas em 800°C possuem resistências maiores que aquelas curadas em temperatura ambiente.

Pelisser et al. (2013) avaliaram o módulo de elasticidade, a dureza, e as resistências à compressão e à flexão de argamassas geopoliméricas de metacaulim, e compararam os resultados obtidos com os de argamassas de cimento Portland de igual resistência à compressão (aproximadamente 64MPa). Os autores concluíram que o geopolímero apresentou melhores resistências à deformação e à tração que a amostra de cimento, o que demonstra a potencialidade de aplicação deste material.

Gao et al. (2014) estudaram a influência da relação molar $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ entre 1,0-2,0, nas propriedades obtidas por geopolímeros à base de metacaulim. Foi constatado que conforme se aumenta a relação molar, aumenta-se também a resistência à compressão das amostras.. Observou-se que, a amostra com relação molar de 1,5 foi a que apresentou menos porosidade; além disto, foi a que apresentou melhor compactação e homogeneidade.

2.5 ATIVADORES ALCALINOS

Segundo Longhi (2015), as matérias-primas necessárias para produção de geopolímeros são basicamente: uma fonte de aluminossilicato, sendo que esta deve possuir uma quantidade considerável de material amorfo, além de uma granulometria adequada; e um ativador alcalino, que deve apresentar pH elevado o bastante para dissolver toda a parte amorfa do material sólido.

De acordo com Criado et al. (2005), os ativadores alcalinos mais utilizados são aqueles que possuem a mistura de silicatos de sódio com hidróxido de sódio ou hidróxido de potássio. Isto devido ao fato de que ativadores à base de silicato promovem uma aceleração na reação geopolimérica, proporcionando uma maior resistência mecânica, uma vez que a sílica presente inicia rapidamente uma reação com a alumina livre na solução.

Os ativadores mais utilizados na obtenção de compósitos geopoliméricos são uma combinação de hidróxido de sódio (NaOH) ou hidróxido de potássio (KOH), com silicato de sódio ($n\text{SiO}_2\text{Na}_2\text{O}$) ou de potássio ($n\text{SiO}_2\text{K}_2\text{O}$) (GRANIZO, 1998; DAVIDOVITS, 1999; FERNANDEZ-JIMENEZ et al., 1999; BARBOSA et al., 2000; BAKHAREV et al., 2002; SWANEPOEL; STRYDOM, 2002; XU et al., 2002; HARDJITO et al., 2002; ESCALANTE-GARCIA et al., 2003; PACHECO-TORGAL; JALALI, 2010).

O tipo de solução utilizada na ativação alcalina é de extrema importância, uma vez que soluções que apresentam silicatos solúveis de sódio ou potássio possuem maior velocidade de reação do que soluções que apresentam apenas hidróxidos. Além disso, reações que ocorrem na presença de silicatos apresentam resistências mecânicas maiores (PALOMO; GRUTZECK; BLANCO 1999).

Rocha (2017) avaliou o comportamento de 4 matrizes geopoliméricas produzidas com diferentes ativadores alcalinos, em dois tipos de temperatura: ambiente e elevada. Usando metacaulim como fonte de aluminossilicato e como ativadores alcalinos, usou sempre a mistura de um silicato (sódio ou potássio), com um hidróxido (sódio ou potássio), sendo possível constatar que geopolímeros produzidos com silicato de potássio possuem poucos vazios ou fissuras, enquanto que os produzidos com silicato de sódio são mais heterogêneos com muitos poros. Além disso, em altas temperaturas, amostras que foram produzidas com silicato de sódio possuíram maior perda de massa e obtiveram resistências menores. A variação de hidróxido não influenciou muito as propriedades das amostras.

2.5.1 Silicato de sódio

O silicato de sódio é um dos elementos mais utilizados como ativador alcalino sendo que, de acordo com Lima Filho (2009), o silicato de sódio é um composto que

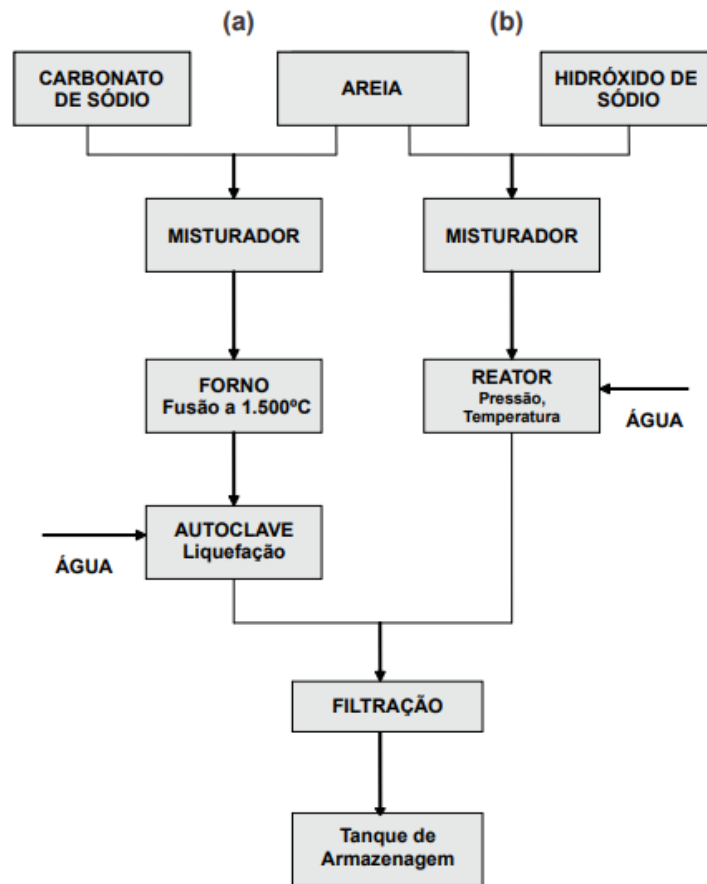
tem a fórmula geral $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, e se encontra disponível tanto em solução aquosa como na forma sólida.

John (1995) cita que existem dois processos mais usuais para obtenção do silicato de sódio. O primeiro consiste na mistura de sílica com carbonato de sódio, ou com sulfato de sódio (menos frequente), que são levados a altas temperaturas, entre 1200°C a 1500°C (processo em forno). O segundo processo é o mais utilizado no Brasil e consiste em dissolver mineral silicatado (areia, opala, calcedônia...) em solução de hidróxido de sódio, também utilizando temperaturas elevadas (processo hidrotérmico).

No processo em forno, a areia e o carbonato de sódio são misturados, colocados no forno e fundidos. Tal mistura é enviada para uma autoclave e misturada com outros ingredientes ou com outros álcalis para produzir o silicato de sódio disponível comercialmente. No processo hidrotérmico, a areia e a soda cáustica são colocadas em autoclave, onde é obtido um licor que é evaporado através de 3 a 4 processos diferentes (GEO-POL GEOPOLYMER SYSTEM, 2018). A figura 10 demonstra o processo de obtenção do silicato de sódio, através dos dois procedimentos citados.

De um modo geral, as soluções de silicato de sódio diferem bastante, sendo que podem ser identificadas completamente a partir das seguintes características: densidade, concentração de álcalis, viscosidade e módulo de sílica (WELDES; LANGE, 1969).

Figura 10 – Esquema simplificado da produção do silicato de sódio pelo processo de fusão (a) ou hidrotérmico (b)



Fonte: Lima Filho (2009).

2.5.2 Cinza da Casca de Arroz (CCA) e Hidróxido de Sódio (NaOH)

O beneficiamento do arroz gera como subproduto, a casca do arroz. Tal casca é utilizada pela própria indústria nos processos de secagem dos grãos, uma vez que a mesma possui alto poder calorífico. Gerar energia por meio da casca de arroz é uma alternativa vantajosa, do ponto de vista econômico, tecnológico e ecológico. O fato é que, se a queima for realizada, o ciclo da industrialização do arroz estará fechado, tornando possível todo o aproveitamento da matéria-prima provinda da lavoura, uma vez que o farelo, gérmen e demais partes, já possuem destino no mercado consumidor (SILVA et al., 2006).

A CCA é o material resultante da queima da casca de arroz para a produção de energia calorífica empregada, por exemplo, no processo de secagem e parboilização dos grãos. É utilizada também como fonte de energia elétrica, em usinas

termelétricas, ou ainda, em processos de calcinação para obtenção de sílica com alto teor de pureza (SANTOS, 2006).

Independente do processo de queima da casca de arroz, a cinza obtida possuirá um teor de sílica de 74 a 97%, podendo esta sílica ser cristalina ou amorfa, dependendo do modo como foi obtida (TASHIMA, 2007). O processo de combustão da casca é o responsável pela atividade pozolânica da cinza. A coloração da CCA pode variar de branco rosado até uma tonalidade escura, de cor preta, devido ao teor de carbono contido no material. Esta cinza apresenta-se como sendo uma boa fonte alternativa para a obtenção de sílica amorfa com alto grau de reatividade (TASHIMA, 2006).

É possível verificar que a temperatura e o tipo de forno utilizado na combustão da casca interferem na obtenção de sílica amorfa. De acordo com Chandrasekhar et. al. (2003), uma queima da casca de arroz sem um controle fornece uma CCA rica em sílica cristalina. No entanto, quando submetida à queima controlada, a sílica obtida é amorfa, apresentando alta reatividade.

Segundo Metha (1977), as cinzas obtidas durante a combustão da casca de arroz apresentam formas estruturais variáveis, dependendo do tipo de queima (grelha, fluidizado), bem como do tempo e da temperatura. A Tabela 1 demonstra, de forma simplificada, os efeitos causados nas CCAs dependendo das condições de queima da casca.

Tabela 1 – Efeito das condições de queima nas propriedades da CCA

Condições de queima (°C/tempo)	Ambiente de combustão	Estrutura da sílica
500-600 / 1 min.	Moderada oxidação	Amorfa
500-600 / 30 min.	Moderada oxidação	Amorfa
500-600 / 2 horas	Moderada oxidação	Amorfa
700-800 / 15 min.	Moderada oxidação	Amorfa
700-800 / 15min.	Alta oxidação	Cristalina parcial
>800 / > 1 hora	Alta oxidação	cristalina

Fonte: Adaptado Metha (1977)

Quando a CCA é produzida, a partir da queima controlada, com temperatura inferior à 600°C, esta apresentará ao final da queima, sílica amorfa com alta reatividade. Por outro lado, quando a queima se dá com temperaturas mais elevadas, observa-se sílica cristalina, o que torna a utilização da mesma inviável como material pozolânico (TASHIMA; SILVA; AKASAKI, 2004).

Existem pesquisas relacionadas à utilização de CCA em matrizes geopoliméricas, tanto como material a ser ativado, quanto em material para produção da solução alcalina, embora, neste último caso, as pesquisas serem bem recentes e ainda bastante escassas.

Kim et al. (2014) realizaram o estudo de um concreto geopolimérico, produzido a partir da CCA ativada por uma solução de hidróxido de sódio com silicato de sódio. Foram investigados efeitos sobre o tipo de cura e concentração de NaOH na resistência à compressão. Foi possível verificar que existe um ganho de resistência à compressão, com o passar do tempo de cura, bem como com o aumento da quantidade de ativador alcalino; além disso, aos 28 dias se obteve uma resistência de 45MPa, o que demonstrou potencial do material em ser utilizado como substituto do concreto convencional, produzido com cimento Portland.

Kaur, Singh e Kaur (2018) avaliaram o efeito da concentração do ativador alcalino em geopolímeros de CCA, utilizando soluções de 12 a 16M de hidróxido de sódio. Constataram que a resistência à compressão é diretamente proporcional à molalidade da solução ativadora alcalina. Com o aumento da molalidade, a microestrutura se torna mais densa, o que pode ser atribuído ao alto grau de geopolimerização da mesma.

Longhi (2015) avaliou a utilização de um ativador alcalino baseado na dissolução da sílica amorfa presente na CCA, na produção de geopolímero de metacaulim. Para comparativo realizou ensaios com silicato de sódio comercial e hidróxido de sódio como ativadores. De um modo geral, o ativador alternativo apresentou resultados com elevado desempenho mecânico, embora 17% inferiores àqueles ativados com silicato de sódio comercial.

Tchakouté et al. (2016) realizaram um estudo com base na utilização de resíduos de vidro (Solução 1) e cinza da casca de arroz (Solução 2) para produção de soluções alcalinas alternativas na confecção de geopolímeros à base de metacaulim. Os resultados mostraram que as amostras ativadas com a Solução 1 apresentarem

maiores resistências à compressão, independentemente do tempo de cura analisado, além de possuir uma microestrutura mais compacta. No geral, ambas apresentaram potencial para serem utilizadas como ativadoras alcalinas alternativas, uma vez que, mesmo a amostra com CCA apresentando resultados inferiores, ela ainda proporcionou valores satisfatórios, obtendo resistência à compressão aos 28 dias de 32,8MPa.

Bernal et al. (2012) elaboraram uma mistura de CCA com NaOH a fim de ativar amostras de metacaulim com escória de alto forno. As amostras produzidas com CCA obtiveram resultados de resistência a compressão semelhantes àsquelas produzidas com silicato de sódio comercial, exceto nos casos em que havia grande quantidade de escória. Foi constatada a eficiência na utilização de CCA para ativação alcalina de aglomerantes à base de metacaulim.

Gutiérrez, Mejía e Puertas (2013) produziram 2 soluções alcalinas com CCA e NaOH. A primeira solução com CCA apresentou 94,7% de sílica amorfa; já a segunda 27,7%. Tais soluções foram utilizadas na ativação de 3 diferentes materiais, sendo o primeiro somente composto por cinza volante (CV), o segundo, composto por escória de alta forno (EAF), e o terceiro, composto por 50% de CV e 50% de EAF. Os autores constataram que as amostras com apenas escória apresentaram melhores resultados à compressão; ambas as CCAs apresentaram resultados próximos a 42 MPa, possuindo pouca variação de resistências de 1 para 7 dias. Com isso, constatou-se que mesmo a CCA com pouca sílica amorfa apresenta potencial para substituir o silicato de sódio comercial na produção de geopolímeros.

Mejía, Gutiérrez e Montes (2016) avaliaram a utilização da mistura de CCA com hidróxido de sódio (NaOH) como ativadora alcalina na produção de aglomerantes alcalinos à base de cinza volante (CV) e metacaulim (MK), com relação CV/MK de 70/30 em massa. A mistura foi mantida em ambiente térmico por 24 horas, para a dissolução da sílica do CCA. Os ensaios demonstraram valores de resistência na ordem de 26 MPa aos 28 dias, o que demonstra a potencialidade de atuar como fonte alternativa de sílica, substituindo o silicato de sódio comercial.

Villaquirán-caicedo, Gutiérrez e Gallego (2017) analisaram a produção de geopolímeros de metacaulim ativados com uma solução de CCA+KOH, sendo os resultados comparados com um geopolímero feito com silicato de potássio comercial. Para produção da solução estudada, o material CCA+KOH e água foram mantidos em

recipientes plásticos selados, com agitação magnética, por um período de 20 horas, para que ocorresse a dissolução da CCA. Constataram que, tanto o geopolímero de estudo, quando o comparativo, apresentaram boas resistências mecânicas, baixa condutividade térmica e baixa porosidade. Com isso, foi constatada a possibilidade da utilização de CCA para ativação alcalina.

Bouzón et al. (2014) estudaram a utilização do resíduo catalisador de unidade de craqueamento catalítico (FCC) como material fonte de aluminossilicato e a mistura de CCA+NaOH como ativador alcalino, na produção de um aglomerante ativado alcalinamente. A mistura CCA+NaOH e água foi mantida em ambiente termostático por 24 horas. Foi possível encontrar resistências de até 41MPa, o que torna possível a utilização de dois resíduos na produção de aglomerantes ativados alcalinamente: CCA como ativador alcalino e FCC como material cimentício e, com isso, reduzindo os custos econômicos e ambientais na produção de geopolímeros.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O desenvolvimento do projeto contou com toda a estrutura do Laboratório Central de Engenharia Civil e do Núcleo de Ensino e Pesquisa em Alvenaria Estrutural (NEPAE), que forneceram todos os equipamentos necessários à execução dos trabalhos para a confecção, adensamento, cura e ruptura dos corpos de prova. Também foram utilizados equipamentos do Laboratório de FTIR e do Laboratório de MEV do Departamento de Física e Química, todos vinculados à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.

3.1 MATERIAIS

Inicialmente foram determinados os materiais necessários para a execução do programa experimental.

3.1.1 Metacaulim

O metacaulim utilizado na pesquisa foi o Metacaulim HP Ultra, fornecido pela empresa Metacaulim do Brasil, Indústria e Comércio Ltda. De acordo com o fabricante (Metacaulim do Brasil, 2017), o metacaulim é composto predominantemente de silicato de alumínio. A Tabela 2 fornece os valores típicos determinados pelo fabricante.

Tabela 2 – Propriedades físico-químicas do metacaulim

Propriedades Físico-Químicas	Valores típicos
SiO ₂	57%
Al ₂ O ₃	34%
CaO + MgO	< 0,1%
SO ₃	< 0,1%
Na ₂ O	< 0,1%
Eq.Alcalino Na ₂ O	< 1,5%
Fe ₂ O ₃	2%
TiO ₂	1,5%
Umidade	0,5%
Perda ao Fogo	3%
Resíduo #325	6%
Massa Específica	2,56kg/dm ³

Fonte: Metacaulim do Brasil (2017)

3.1.2 Agregado Miúdo

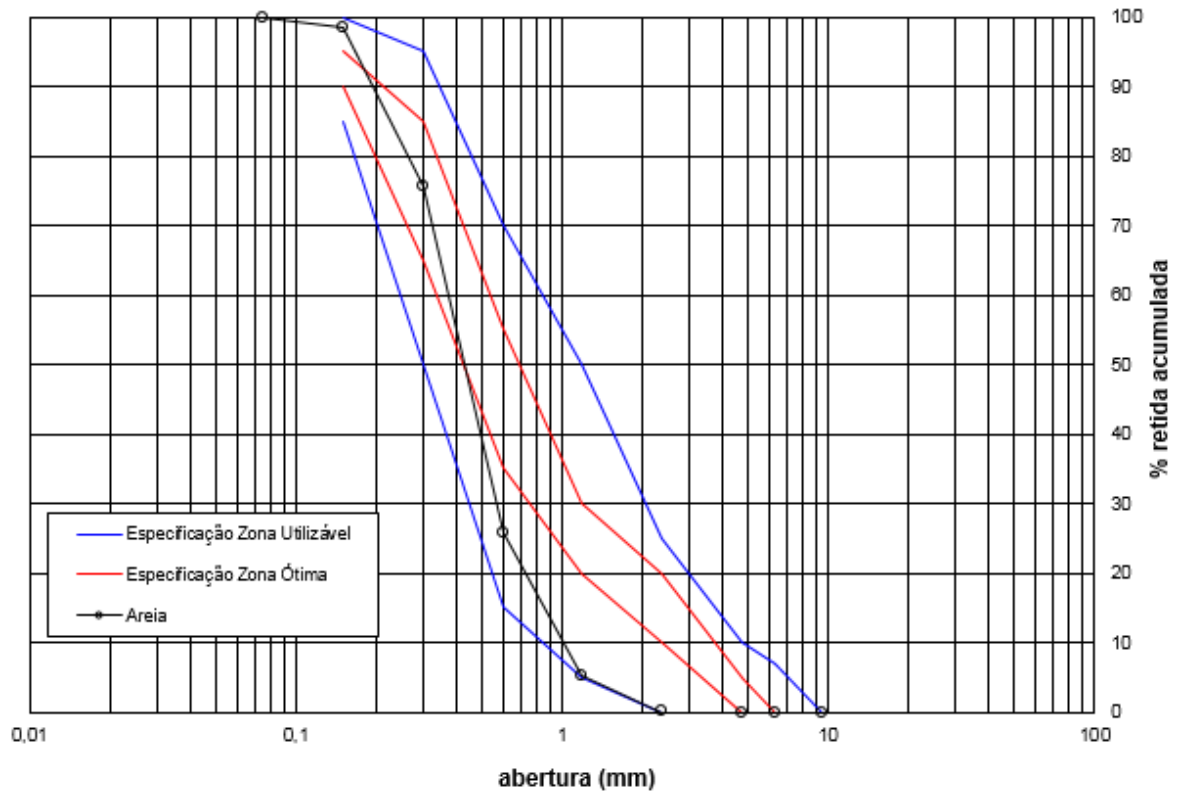
O agregado miúdo utilizado foi a areia natural média disponibilizada pelo Laboratório Central de Engenharia Civil da UNESP, campus de Ilha Solteira. A caracterização deste material foi feita conforme as recomendações da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) e teve como base os ensaios de: análise granulométrica (NM 248/2003), absorção de água (NM 30/2001), massa específica e massa específica aparente (NM 52/2009), massa unitária (NM 45/2006). A Tabela 3 mostra as características físicas da areia, e a Figura 11 ilustra a sua curva granulométrica.

Tabela 3 – Características físicas da areia

Massa unitária	1,623 g/cm ³
Diâmetro máximo	2,36 mm
Módulo de finura	2,12
Massa específica aparente	2,39 g/cm ³
Massa específica seca	2,36 g/cm ³
Massa específica SSS	2,63 g/cm ³
Absorção	0,34%

Fonte: Próprio autor

Figura 11 – Curva granulométrica da areia



Fonte: Próprio autor

3.1.3 Cinza da casca de arroz (CCA)

A cinza cristalina foi proveniente da empresa beneficiadora de arroz Josapar S. A., da região de Pelotas/RS. De acordo com Silva (2009), nesta empresa, a casca é utilizada como combustível no processo de parboilização dos grãos de arroz. A queima da casca de arroz se processa de maneira instantânea em fornalhas com grelhas. Após a queima, a CCA é transportada para depósito a céu aberto, sendo posteriormente levada para aterros sanitários.

De acordo com o fabricante, a CCA possui composição química conforme estipulada pela norma NBR 12653/2015 (tabela 4), o que a torna um material potencialmente pozzolânico. Além disso, a CCA é rica em sílica e apresenta estrutura amorfa, sendo obtida por combustão controlada, com teor de óxidos acima de 95%. Devido a tais características, Pereira (2014) alega que a CCA apresenta elevado potencial para ser utilizada na produção de aglomerantes ativado alcalinamente.

Tabela 4 – Composição química da cinza da casca de arroz

Composição química	% (em massa)
CaO	1,55
SiO ₂	92,79
Al ₂ O ₃	2,52
Fe ₂ O ₃	0,09
SO ₃	n.d.
MgO	0,61
K ₂ O	1,98
Na ₂ O	0,32
PF	0,1

PF - Perda ao fogo

Fonte: ABCP (2002)

3.1.4 Hidróxido de sódio

Na preparação de soluções alcalinas para a produção de aglomerantes ativadas alcalinamente, foram utilizadas pastilhas de hidróxido de sódio obtidas comercialmente pela empresa UNIPAR CARBOCLOORO. De acordo com as especificações do fabricante, o produto possui um grau de pureza de 98%.

3.1.5 Silicato de sódio

O silicato de sódio utilizado para ativação alcalina das amostras de comparação foi fornecido pela empresa Dinâmica Química e apresenta 8,910% de Na₂O e 29,664% de SiO₂, de acordo com o fabricante.

3.1.6 Água de amassamento

A água de amassamento utilizada na preparação das pastas e argamassas foi a proveniente da rede de distribuição de água pública da cidade de Ilha Solteira-SP.

3.2 EQUIPAMENTOS

3.2.1 Recipiente termostático

Para produzir as amostras feitas com CCA+NaOH foram utilizados recipientes termostáticos com capacidade de 1litro. A manutenção da temperatura elevada, gerada pelas reações químicas, por período de tempo maior, permitiu ao ativador alcalino uma maior eficiência, conforme ensaio realizado.

3.2.2 Argamassadeira industrial

A argamassadeira utilizada nesta pesquisa possui capacidade máxima de produzir até 3 kg de material por vez.

3.2.3 Fôrmas de aço

Cada fôrma de aço utilizada apresentou a capacidade de produzir 3 corpos de prova cúbicos de 5cm de arestas.

3.2.4 Mesa vibratória

O adensamento dos materiais produzidos foi realizado por meio de mesa vibratória por aproximadamente 60 segundos.

3.2.5 Máquina universal de ensaios

Foi utilizada uma Máquina Universal de Ensaio para a execução de ensaios de resistência à compressão axial. A Máquina Universal utilizada nesta pesquisa foi da EMIC modelo PC200, com limite de carga de 200 toneladas (Figura 12). Os ensaios foram realizados no Laboratório Central de Engenharia Civil da UNESP, Campus de Ilha Solteira – SP.

Figura 12 – Máquina Universal de ensaios

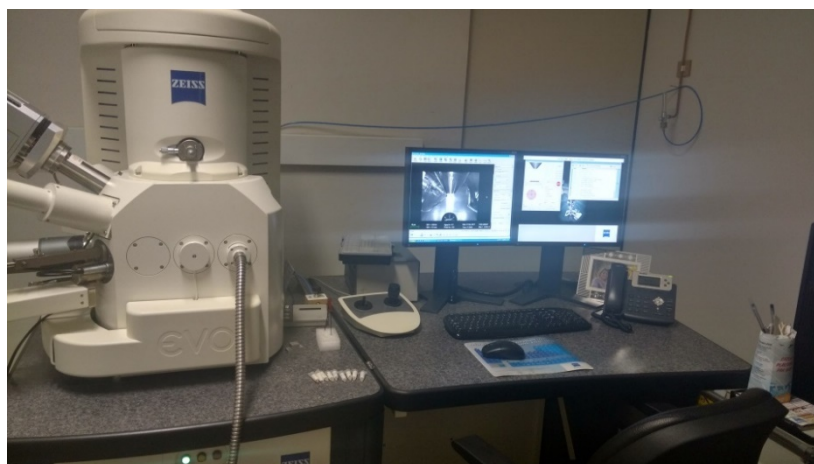


Fonte: Próprio autor

3.2.6 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

Para análise dos compostos formados nas pastas após a reação de geopolimerização, foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura. Tal equipamento encontra-se no Departamento de Física e Química da Unesp, Campus de Ilha Solteira – SP. A figura 13 mostra o equipamento utilizado para realização dos ensaios.

Figura 13 – Equipamentos para ensaio MEV

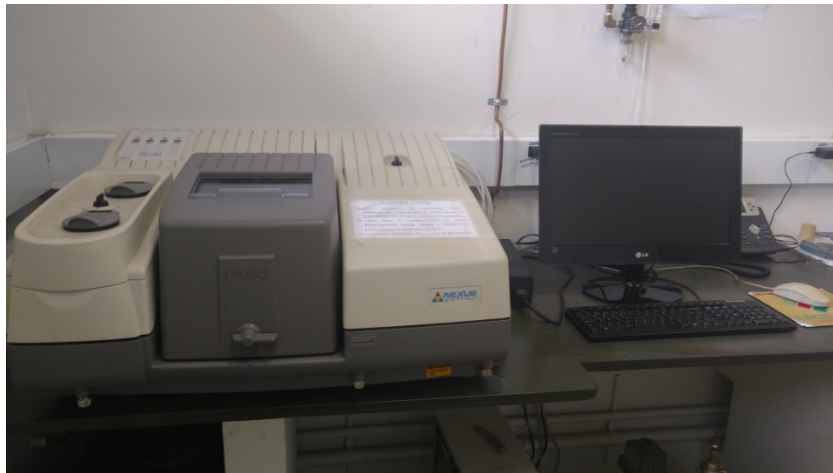


Fonte: Próprio autor

3.2.7 Espectroscopia Infravermelha por Transformada de Fourier (FTIR)

Para caracterizar qualitativamente as pastas, foram realizados ensaios num equipamento Thermo NEXUS 670 FTIR (figura 14), onde a frequência compreendida pelo aparelho está entre 4000 cm^{-1} a 400 cm^{-1} . O equipamento encontra-se no Departamento de Física e Química da Unesp, Campus de Ilha Solteira – SP.

Figura 14 – Equipamentos para ensaio FTIR



Fonte: Próprio autor

3.3 METODOLOGIA

3.3.1 Confeção das argamassas

Para a produção do ativador alcalino das amostras de estudo (traços CCA+NaOH), foi confeccionada uma mistura de cinza da casca de arroz (CCA) com hidróxido de sódio e água, que permaneceu por aproximadamente 24 horas dentro de um recipiente termostático. O uso do recipiente permitiu que o calor produzido na reação exotérmica proporcionasse uma melhor dissolução da sílica da CCA. Tais condições de obtenção da sílica é observada nos estudos de Bouzón (2015) e Villaquirán-caicedo, Gutiérrez e Gallego (2017).

No caso da argamassa produzida com silicato comercial, utilizada como referência (traços Ref.), não houve a necessidade de produzir uma solução com 24 horas de antecedência. Foram feitos 5 tipos diferentes de solução, tanto para os traços

CCA+NaOH, quanto para os traços Ref., sempre mantendo-se a quantidade de NaOH constante e aumentando-se a porção de CCA. As relações molares SiO_2/NaOH são apresentadas nas tabelas 5 e 6. Convém ressaltar que traços com relação molar SiO_2/NaOH superiores a 1,6 apresentaram baixa trabalhabilidade e dificuldade para desfôrma; devido a isto, tais traços não foram ensaiados.

Em virtude de pesquisas já realizadas pelo grupo MAC, foi adotado um traço relação aglomerante/agregado igual a 1:2 e relação água/aglomerante igual a 0,6. Este foi o traço que apresentou melhor trabalhabilidade e resistência mecânica em outros ensaios.

A fabricação dos corpos de prova foi realizada do seguinte modo: o ativador alcalino foi colocado juntamente com o metacaulim na argamassadeira e tais materiais foram misturados por 1 min; acrescentou-se a areia, e bateu-se por mais 4 min; em seguida, os corpos de prova foram moldados e vibrados. Os corpos de prova obtidos foram então envolvidos por um plástico-filme e mantidos em câmara úmida até a data de ensaio. A Figura 15 mostra alguns dos corpos de prova após terem sido desmoldados.

Tabela 5 – Traços CCA+NaOH

Relação molar SiO_2/NaOH	0,0	0,4	0,8	1,2	1,6
Areia (g)	1000	1000	1000	1000	1000
Metacaulim (g)	500	500	500	500	500
CCA (g)	0,0	32,08	64,16	96,25	128,33
NaOH (g)	96	96	96	96	96
Água (g)	300	300	300	300	300

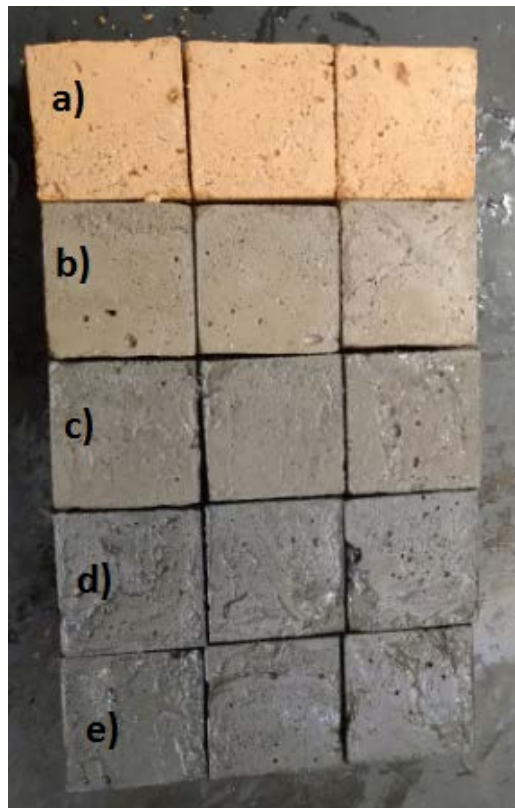
Fonte: Próprio autor

Tabela 6 – Traços Ref.

Relação molar SiO_2/NaOH	0,0	0,4	0,8	1,2	1,6
Areia (g)	1000	1000	1000	1000	1000
Metacaulim (g)	500	500	500	500	500
Silicato de Sódio (g)	0,0	97,09	194,17	291,26	388,35
NaOH (g)	96	84,84	73,68	62,51	51,35
Água (g)	300	240,36	180,73	121,09	61,45

Fonte: Próprio autor

Figura 15 – Corpos de prova 5cm x 5cm x 5cm produzidos com CCA, sendo a relação molar: a) 0,0; b) 0.4; c) 0.8; d) 1.2; e) 1.6



Fonte: Próprio autor

3.3.2 Ensaio para comprovar a necessidade dos recipientes termostáticos

Para comprovar a necessidade da utilização recipientes termostáticos, na produção de ativadores alcalinos com CCA+NaOH, foram preparadas duas amostras, com mesma dosagem de material, conforme mostrado na tabela 7. Uma dessas amostras foi armazenada por 24 horas num recipiente termostático; já a outra amostra foi armazenada num recipiente plástico transparente, também por um período de 24 horas. Posteriormente, foram produzidos corpos de prova 5cm x 5cm x 5cm, com metacaulim e areia. Foram realizados ensaios de compressão após 3 e 7 dias de cura.

Tabela 7 – Traço utilizado na produção das argamassas para validação da necessidade de utilização de recipientes termostáticos

	CCA	NaOH	Água	Areia	Metacaulim
Traço-teste	64,16g	96g	300g	1000g	500g

Fonte: Próprio autor

3.3.3 Ensaio para demonstrar reatividade da CCA

Para provar a reatividade de CCA utilizada, foi produzida uma amostra de estudo de relação molar 0.8, conforme a tabela 5. Posteriormente, foi produzida uma amostra, substituindo-se a CCA por areia de granulometria similar à CCA, e foram produzidos então, corpos de prova. Por meio de ensaio qualitativo, foi realizado um comparativo de resistência aos 3 e 7 dias.

3.3.4 Amostra para ensaio MEV

Para o ensaio microestrutural MEV foram confeccionadas pastas, com traços similares aos das argamassas, sendo mantidas também em câmara úmida. Foi retirada uma pequena partícula do interior da pasta, aos 28 dias, e tal material foi imerso em acetona por 30 minutos para interromper o processo de hidratação. Em seguida, a amostra foi inserida em uma estufa à temperatura de 65°C, por um período

de 30 minutos. Tais amostras receberam uma camada extrafina de ouro, para que o MEV conseguisse efetuar a reprodução da imagem das mesmas.

O ensaio funciona a partir de varredura de feixes de elétrons na amostra, uma vez que, ao efetuar a varredura da superfície das amostras com energia elevada, sinais são formados. A partir de tais sinais, imagens são produzidas num computador.

3.3.5 Amostra para ensaio FTIR

Para o ensaio micro estrutural FTIR, também foram confeccionadas pastas, com o mesmo traço das argamassas. As pastas foram mantidas em câmara úmida de maneira análoga às argamassas. Para o ensaio de espectroscopia infravermelha, nas datas de 1,3, 7 e 28 dias, uma parcela da pasta foi transformada em amostra pulverulenta e imergida em acetona para que o processo de hidratação fosse interrompido; posteriormente, a parte sólida foi colocada numa estufa a 65°C por um período de 30 minutos. Por fim, as amostras passantes pela Peneira #200 (75 µm) foram misturadas com KBr, na proporção 1:200 (amostra: KBr), sendo produzidas pastilhas com estas, e feita a leitura na máquina. O funcionamento de tal equipamento consiste na absorção em nível molecular, de radiação na zona de espectro infravermelho, produzindo vibrações e rotações das moléculas, sendo tais vibrações transformadas em picos num gráfico de absorbância.

3.3.6 Determinação de resistência à compressão

Para cada amostra de argamassa foram confeccionados 3 corpos de prova prismáticos (5cm x 5cm x 5cm), conforme a Figura 15. Convém ressaltar que, na Figura 15, são apresentados corpos de prova de diferentes colorações, uma vez que os de coloração avermelhada foram produzidos com metacaulim e Hidróxido de sódio, e os corpos de prova com coloração acinzentada apresentam, além dos materiais citados acima, a CCA em sua composição. Observou-se que conforme a quantidade de CCA era aumentada, os corpos de prova tornavam-se mais escuros.

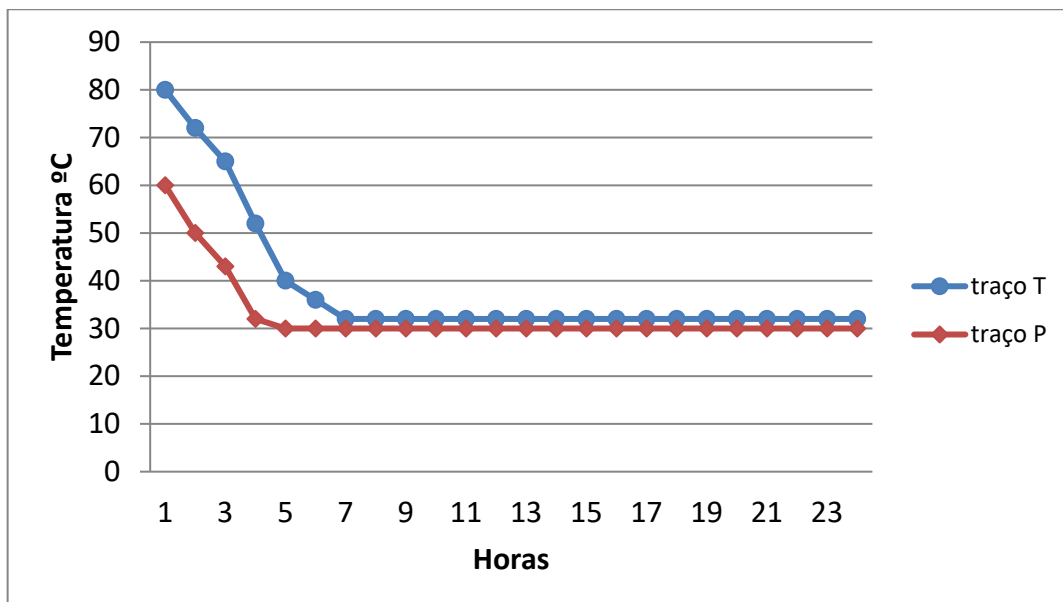
Tais amostras, após serem vibradas, foram envoltas em um papel filme e então armazenadas numa câmara úmida até o dia de realização dos ensaios. Os ensaios de resistência à compressão foram feitos com 1, 3, 7 e 28 dias, seguindo-se as recomendações da NBR 7215 (1997).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 VERIFICAÇÃO DA NECESSIDADE DO RECIPIENTE TERMOSTÁTICO

Foi medida a temperatura por 24 horas, tanto do material que ficou no recipiente termostático (traço T), quanto para o material que ficou em recipiente plástico (traço P), conforme mostrado no gráfico 1.

Gráfico 1 – Comparativo da temperatura ao longo do tempo



Fonte: Próprio autor

Após deixar as misturas em descanso pelo período de 24 horas, foram produzidos os traços com os materiais dos recipientes. Foram confeccionados corpos de prova cúbicos, de arestas iguais a 5cm, que foram rompidos à compressão aos 3 e 7 dias. Os resultados obtidos são mostrados na tabela 8.

Tabela 8 – Resistência à compressão dos traços T (recipiente termostáticos) e P (recipiente plástico), em MPa

	3 DIAS	7 DIAS
TRAÇO P (recipiente plástico)	1,7 ± 0,7	2,0 ± 0,4
TRAÇO T (recipiente termostático)	11,2 ± 0,2	18,9 ± 0,6

Fonte: Próprio autor

Conforme os resultados obtidos verificaram-se que a diferença de temperatura inicial, e o maior tempo gasto para se chegar à temperatura ambiente tornaram a solução mais reativa. De tal modo, torna-se necessário a utilização do recipiente termostático para produção da solução alcalina.

4.2 VERIFICAÇÃO DA REATIVIDADE DA CCA

Para a verificação da reatividade da CCA, foram produzidos 2 traços: um deles com CCA (traço 1), e o outro com areia substituindo a CCA (traço 2). As resistências à compressão dos traços obtidos aos 3 e 7 dias são mostradas na tabela 9.

Tabela 9 – Resultado do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova dos traços 1 e 2, em MPa

	3 DIAS	7 DIAS
TRAÇO 1 (CCA)	11,2 ± 0,2	18,9 ± 0,3
TRAÇO 2 (areia)	0,8 ± 0,5	1,4 ± 0,6

Fonte: Próprio autor

Com os resultados obtidos é possível verificar que a CCA agrega muito mais resistência às argamassas do que a areia. Devido a isto, conclui-se que a CCA utilizada é reativa.

4.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

As tabelas 10 e 11 mostram a média e o desvio padrão da resistência à compressão dos corpos de prova em função do tempo de cura. Os gráficos 2 a 5

demonstram a resistência em MPa, comparando-se, para cada idade, os valores da resistência à compressão do traço utilizado como referência com silicato de sódio comercial (traço Ref.), com o traço elaborado a partir de CCA e do hidróxido de sódio (traço CCA+NaOH).

Nos Apêndices de A a Z, é possível verificar os resultados obtidos por meio de análise de variância (ANOVA) e ensaio Tukey, sendo este realizado por meio do software PAST, onde apenas as colunas coloridas demonstram diferenças significativas entre as amostras analisadas.

Como primeira observação é possível verificar que conforme se aumenta o tempo de cura, as amostras apresentam ganho na resistência à compressão. Além disto, quanto maior a relação molar da amostra, maior a resistência para uma mesma idade.

Com apenas 1 dia de tempo de cura, para a relação molar de 1.6, tanto a amostra Ref. quanto a amostra CCA+NaOH apresentaram resistências equivalentes e próximas a 30MPa, (tabelas 10 e 11, e APÊNDICE U).

Vale ressaltar que as amostras com relação molar 0,0 apresentaram ganho de resistência, mesmo não tendo silicato de sódio ou CCA, tal fato ocorre uma vez que o hidróxido de sódio, presente nessas amostras, atua como meio alcalino de baixa reatividade.

Tabela 10 – Resultado do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova dos traços Ref. (em MPa)

Relação molar/Idade	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
0,0	2,4±0,7	2,9±0,4	4,8±0,3	5,7±0,9
0,4	3,3±0,1	5,2±0,4	4,3±0,5	6,9±0,4
0,8	19,7±1,2	22,3±2,5	27,4±1,4	26,8±3,9
1,2	22,3±0,4	34,3±1,5	41,4±2,2	41,0±2,6
1,6	29,8±1,5	45,2±2,2	45,6±0,9	51,0±1,4

Fonte: Próprio autor

Tabela 11 – Resultado do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova dos traços CCA+NaOH (em MPa)

Relação molar/Idade	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
0,0	2,4±0,7	2,9±0,4	4,8±0,3	5,7±0,9
0,4	3,8±0,3	3,7±0,4	5,9±0,3	6,4±0,7
0,8	17,9±0,7	19,5±0,8	25,1±0,4	24,8±0,3
1,2	24,8±1,8	22,6±1,9	41,6±1,7	40,7±1,5
1,6	32,1±3,2	29,7±0,8	48,0±1,2	47,9±1,3

Fonte: Próprio autor

É possível verificar que as amostras de referência apresentaram inicialmente, um ganho de resistência mais rápido, uma vez que, aos 3 dias as amostras Ref. possuíam resistências similares ou superiores aos dos traços CCA+NaOH.

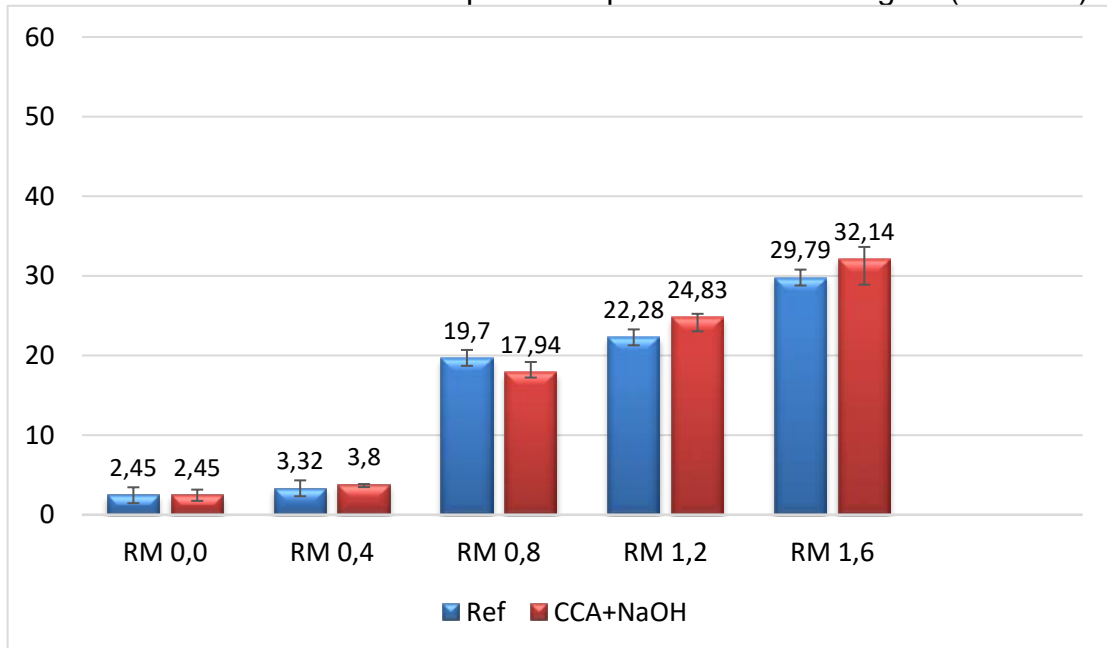
No entanto, de 3 para 7 dias, as amostras CCA+NaOH tiveram as suas resistências aumentadas tornaram-se similares às do traço Ref., com exceção apenas do traço com relação molar 0,4.

Já de 7 para 28 dias, houve pouca alteração nos valores de resistência, sendo ainda que os traços Ref. e os traços CCA+NaOH apresentaram valores relativamente próximos, principalmente para relações molares superiores a 0,4. Tal fato foi observado também por Mejía, Gutiérrez e Montes (2016), que utilizaram, como aglomerantes a escória de alto forno granulada e as cinzas volantes, que foram ativadas por uma solução de CCA+NaOH, obtendo-se resistências da ordem de 35MPa, que sofreram pouca variação de 7 para 360 dias.

Analisando-se os dados por análise de variância (ANOVA) e Tukey, é possível verificar que, em todas as situações, os traços com relação molar 0,4 apresenta pouca diferença com a amostra 0,0. Devido a estas considerações, o traço 0,4 torna-se pouco viável, uma vez que não demonstra grandes ganhos de resistência se comparados a traços sem CCA. Ainda analisando os ensaios ANOVA e Tukey, podemos notar que os teores de CCA nas amostras influenciam de forma significativa nos resultados finais.

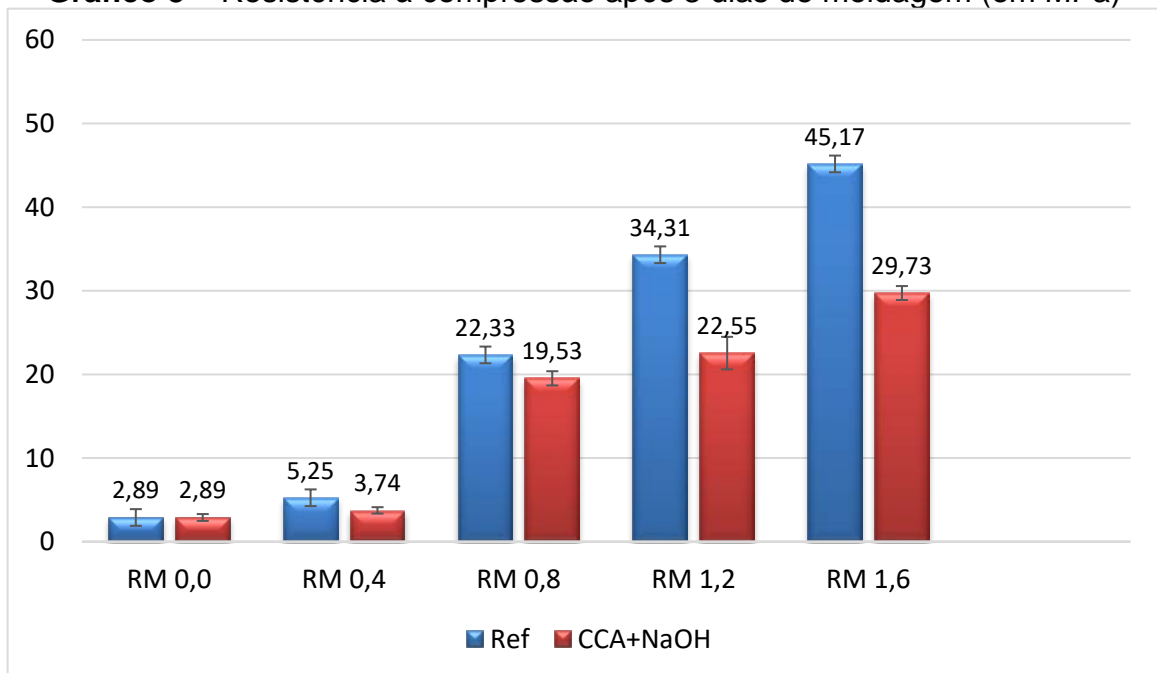
De modo geral, os resultados obtidos são bastante satisfatórios, uma vez que as amostras com CCA+NaOH apresentaram resultados próximos aos dos traços Ref. a partir de 7 dias, o que condiz com os resultados obtidos por Tchakoute et al. (2015; 2016), Villaquirán-caicedo, Gutiérrez e Gallego (2017) e Bernal et al. (2012).

Gráfico 2 – Resistência à compressão após 1 dia de moldagem (em MPa)

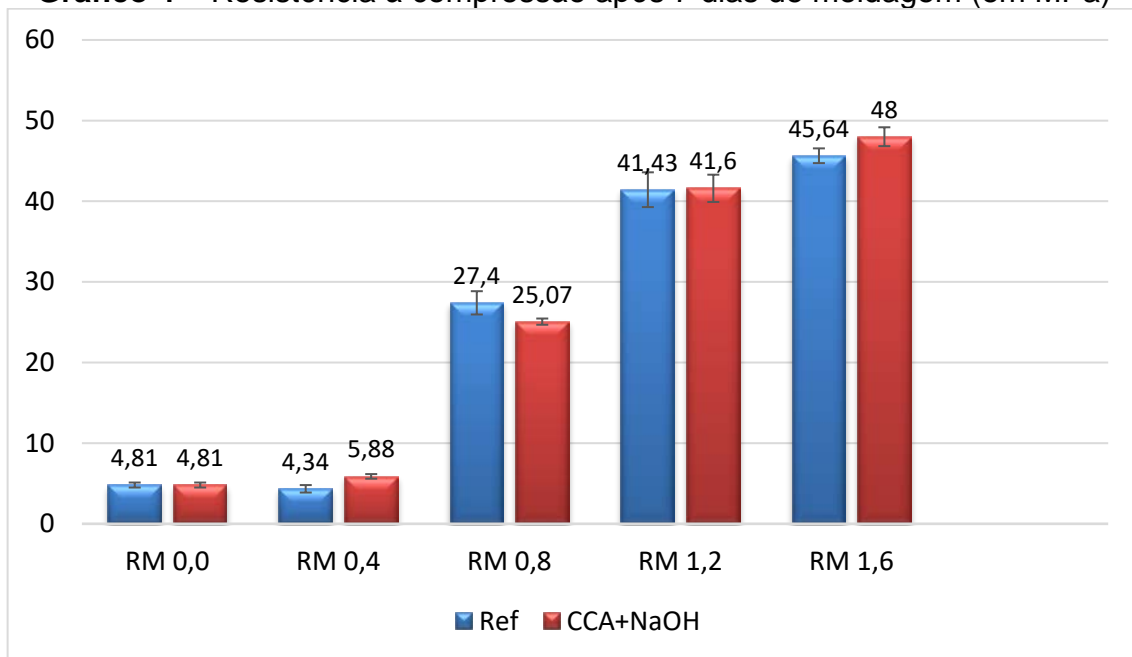


Fonte: Próprio autor

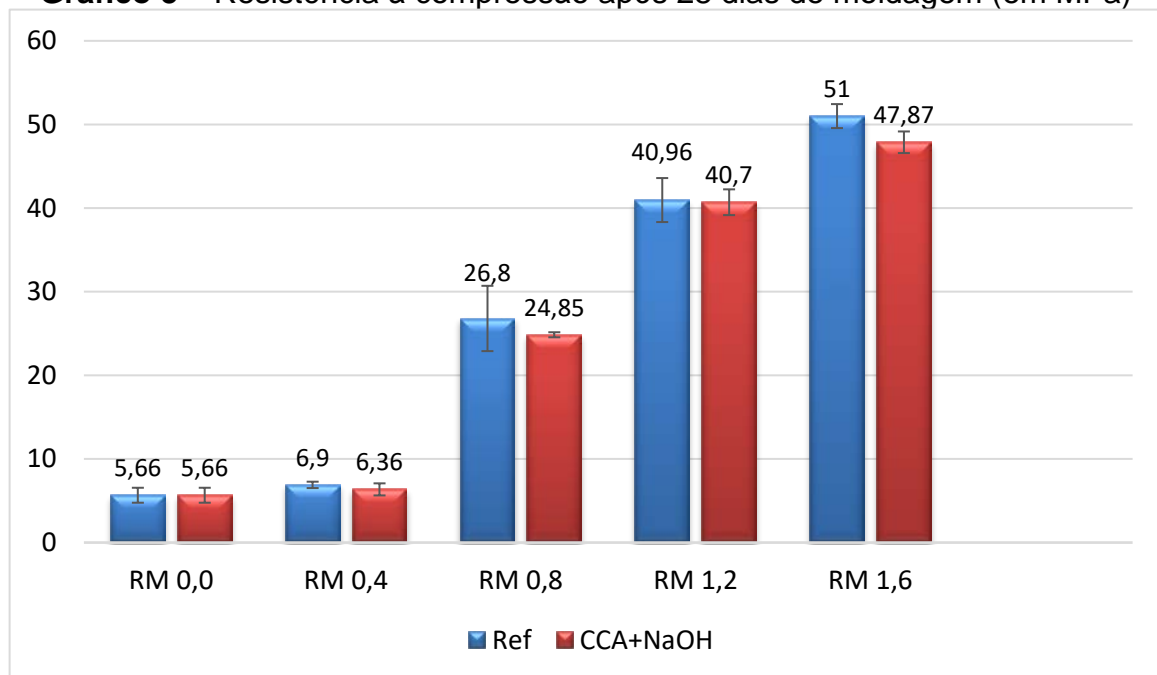
Gráfico 3 – Resistência à compressão após 3 dias de moldagem (em MPa)



Fonte: Próprio autor

Gráfico 4 – Resistência à compressão após 7 dias de moldagem (em MPa)

Fonte: Próprio autor

Gráfico 5 – Resistência à compressão após 28 dias de moldagem (em MPa)

Fonte: Próprio autor

4.4 MEV

O ensaio de microscopia eletrônica de varredura permite a análise do material de forma microestrutural. A Figura 16 ilustra a microestrutura da amostra com relação

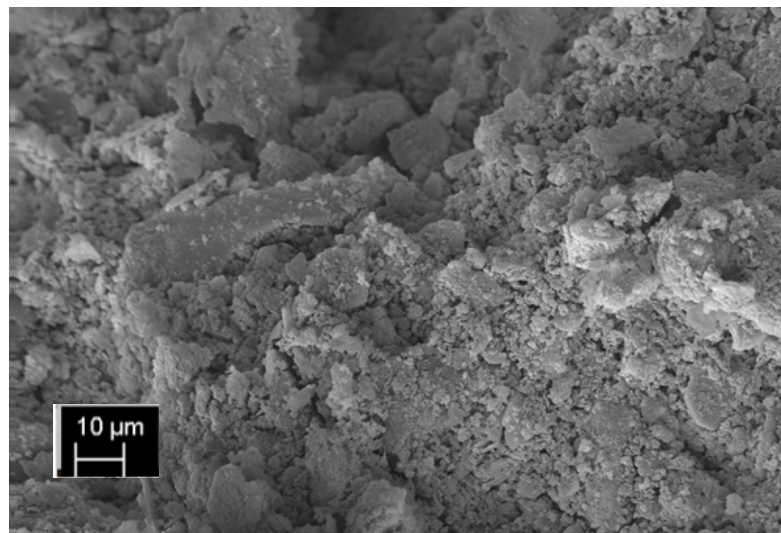
molar 0,0; já as Figuras 17 e 18 ilustram a imagem das amostras dos traços Ref. e traços CCA+NaOH, respectivamente.

É possível verificar que conforme se aumenta a relação molar da amostra, a estrutura apresenta-se mais coesa.

Quando se comparam as amostras dos traços Ref. com as dos traços CCA+NaOH, pode-se verificar que as de traço Ref. apresentam uma maior densidade; porém ambas são amorfas. Além disso, todas as imagens demonstram que as estruturas possuem certa similaridade, possuindo pouca diferença entre elas.

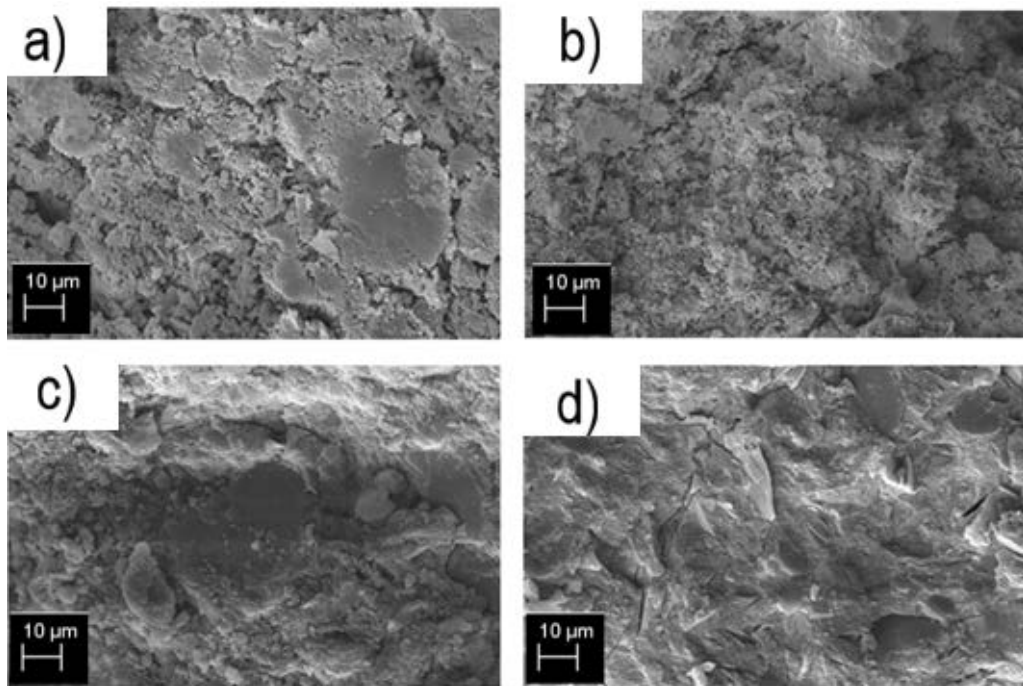
Comparando-se os resultados das amostras CCA+NaOH com os encontrados por Mejía, Gutiérrez e Montes (2016), pode-se verificar certa similaridade, uma vez que os autores também obtiveram um material com microestrutura porosa e não homogênea, o que sugerem ser devido a uma menor formação de produtos de reação.

Figura 16 – Imagem do MEV da amostra de relação molar 0,0 aos 28 dias de cura



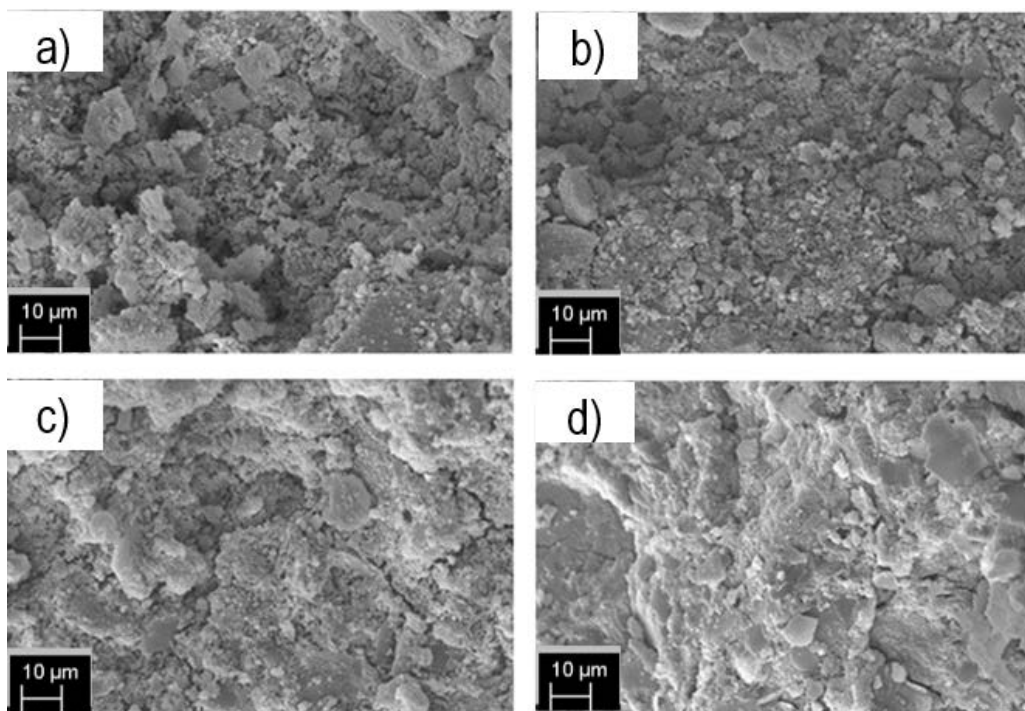
Fonte: Próprio autor

Figura 17 – Imagem do MEV das amostras de traço Ref. aos 28 dias, sendo a relação molar: a) 0,4; b) 0,8; c) 1,2; d) 1,6



Fonte: Próprio autor

Figura 18 – Imagem do MEV das amostras de traço CCA+NaOH feitas aos 28 dias, sendo a relação molar: a) 0,4; b) 0,8; c) 1,2; d) 1,6

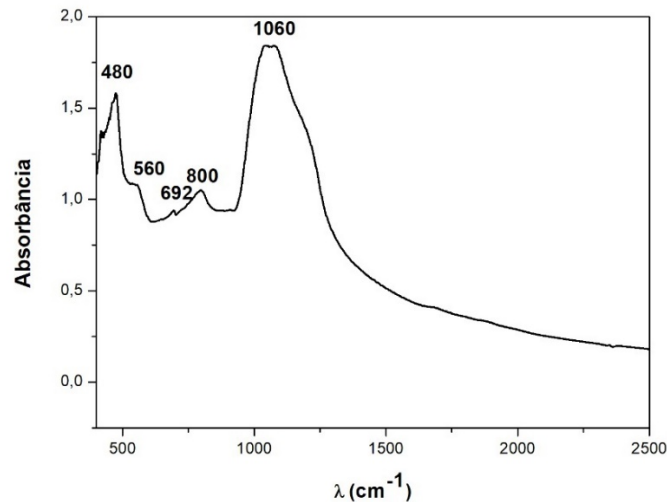


Fonte: Próprio autor

4.5 FTIR

A Figura 19 apresenta o espectro de infravermelho do metacaulim. As bandas 480, 692 e 800 cm^{-1} podem demonstrar a presença de quartzo, ou seja, sílica na sua forma cristalina, representado por Si-O. O pico de 560 cm^{-1} pode indicar a presença de vibrações de Al-O em vibrações do Al, provavelmente devido à presença de ilite. O pico de 1080 cm^{-1} representa a ligação Si-O-Al e Si-O-Si assimétricos. Por fim, a pequena banda que ocorre em torno de 1700 cm^{-1} é atribuída ao alongamento da molécula O-H e às vibrações de moléculas de água (TCHAKOUTE et al., 2015; 2016).

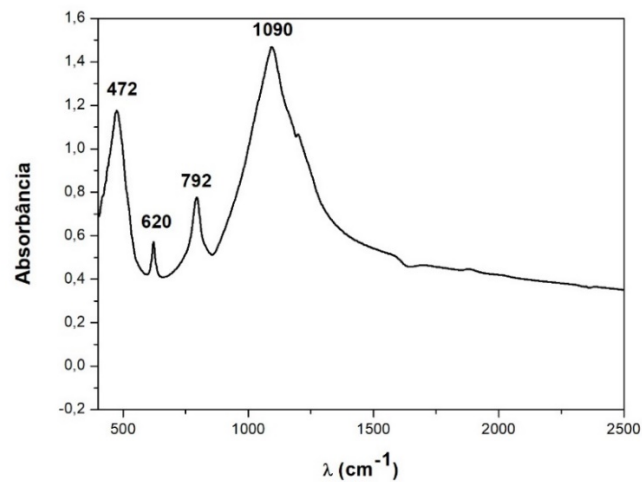
Figura 19 – Espectroscopia do metacaulim



Fonte: Próprio autor

A Figura 20 apresenta o espectro da CCA, sendo que a banda 472 cm^{-1} é atribuída à vibração das moléculas Si-O-Si. A banda 620 cm^{-1} representa a vibração Si-O e Al-O. A absorção na banda 792 cm^{-1} corresponde à ligação Si-O-Si que ocorre na molécula SiO_4 . A banda 1090 cm^{-1} demonstra ligações de silicato, sendo que, de acordo com Rees et.al. (2007), tal pico indica a presença de sílica amorfa. A espectroscopia da CCA observada, assemelha-se àquela estudada por Bouzón (2015).

Figura 20 – Espectroscopia da CCA



Fonte: Próprio autor

Analisando-se as figuras de 21 a 24 pode-se verificar que as bandas com 450cm^{-1} representam as vibrações planas de Si-O-Si, moléculas presentes em todas as amostras. Os picos em 550cm^{-1} indicam a presença de moléculas Si-O-Al, o que demonstra a ocorrência de metacaulim não reagido no sistema, sendo que também foi observada a diminuição desses picos ao longo do tempo; além disto, as amostras com CCA+NaOH apresentaram picos levemente menores do que os encontrados nas amostras com silicato.

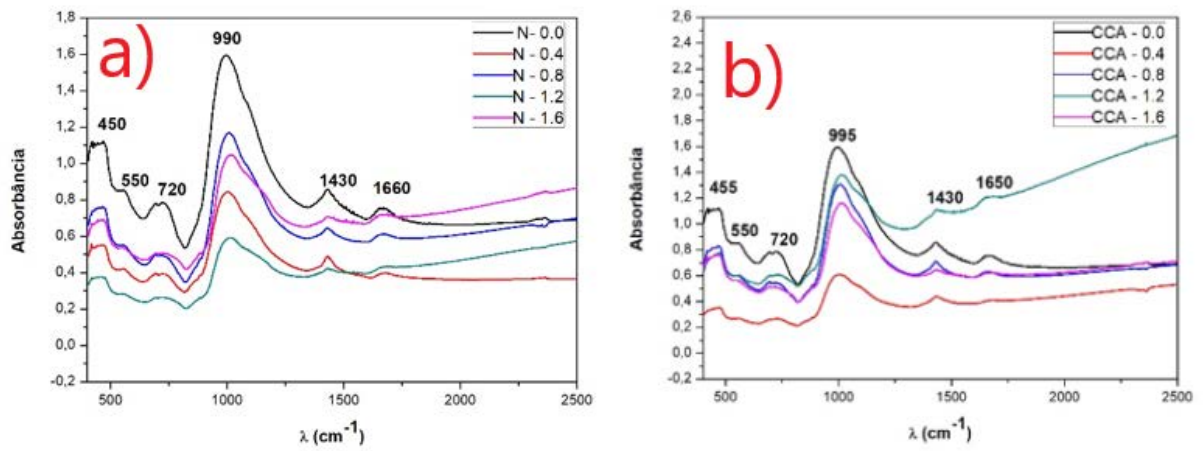
As bandas entre 700 e 720cm^{-1} são provenientes das ligações de Si-O-Al, gerando novos aluminossilicatos, sendo que quanto maior a absorbância, maior a resistência à compressão.

As bandas de 990 - 1010cm^{-1} indicam o grau de policondensação, mostrando a dissolução do metacaulim, sendo que, quanto maior tal absorbância, menor será a dissolução de metacaulim.

Por fim, bandas entre 1380 e 1656cm^{-1} indicam vibrações de OH, características de moléculas de água, absorvidas na superfície ou capturadas nas cavidades da estrutura.

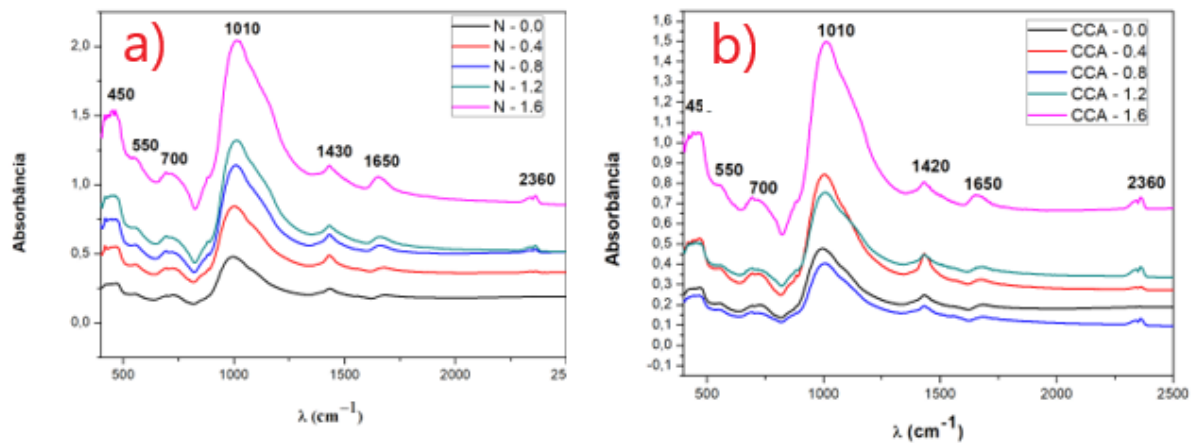
Em uma análise geral, é possível verificar que as amostras de traços CCA+NaOH apresentam grande similaridade com as amostras de traço Ref.

Figura 21 – Espectroscopia realizada após 1 dia: a) Traço Ref.; b) Traço CCA+NaOH



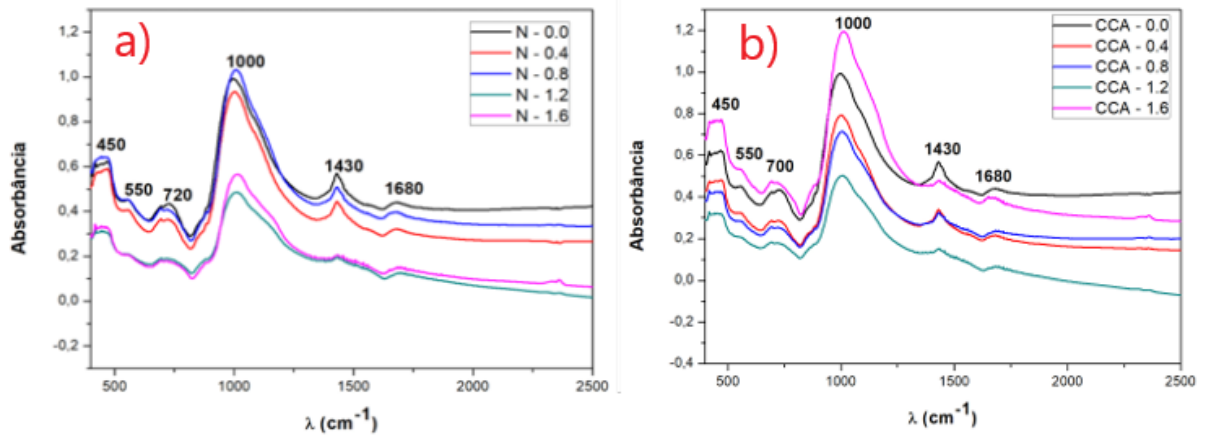
Fonte: Próprio autor

Figura 22 – Espectroscopia realizada após 3 dias: a) Traço Ref.; b) Traço CCA+NaOH



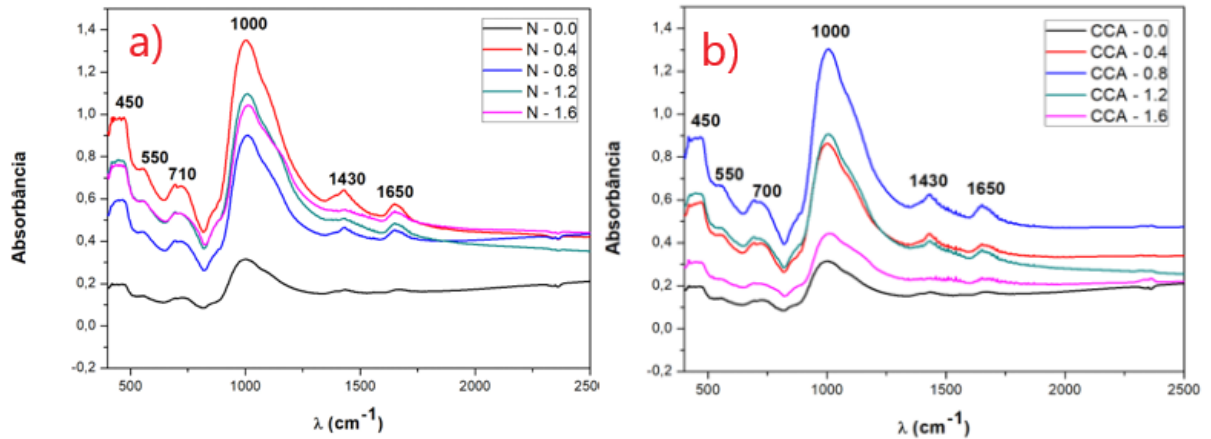
Fonte: Próprio autor

Figura 23 – Espectroscopia realizada após 7 dias: a) Traço Ref.; b) Traço CCA+NaOH



Fonte: Próprio autor

Figura 24 – Espectroscopia realizada após 28 dias: a) Traço Ref.; e b) Traço CCA+NaOH



Fonte: Próprio autor

5 CONCLUSÕES

Inicialmente foi possível provar a eficiência da utilização de recipientes termostáticos para a obtenção de um ativador alcalino adequado à preparação de aglomerantes ativados alcalinamente.

A CCA utilizada na preparação das amostras mostrou-se reativa e de grande importância, uma vez que ensaios realizados com areia substituindo a CCA mostraram resultados insatisfatórios.

Com o objetivo de provar a eficiência da substituição do silicato de sódio comercial pelo produto da mistura de CCA com hidróxido de sódio, foram realizados ensaios de compressão. A argamassa ativada com CCA+NaOH apresentou resistência mecânica bastante satisfatória, uma vez que, aos 7 dias, foram obtidos traços com resistências acima de 40 MPa.

Pode-se verificar que, conforme se aumenta a relação molar da amostra, a resistência mecânica também aumenta, tanto para a amostra referência (silicato de sódio comercial), quanto para a amostra estudada (CCA+NaOH).

Nos ensaios de microscopia eletrônica de varredura, foi possível verificar que argamassas produzidas com CCA+NaOH apresentaram menor densidade do que as amostras produzidas com silicato de sódio (Ref). No entanto, ambas demonstraram ser amorfas. Embora haja uma diferença, pode-se verificar que a resistência à compressão não sofreu quaisquer interferências.

Nos ensaios de FTIR, foi possível verificar a formação de materiais silicosos. Foi possível verificar ainda a formação de aluminossilicatos, sendo que, com o passar do tempo, observou-se uma maior quantidade de tal material, aumentando, com isso, a resistência à compressão do material de estudo. As amostras de estudo apresentaram resultados bem similares às amostras utilizadas como referência.

De um modo geral, os resultados obtidos nos ensaios foram bastante satisfatórios, sendo que as argamassas produzidas com CCA+NaOH demonstraram ter propriedades similares às aquelas produzidas com silicato de sódio comercial. Com isso, as argamassas com traço CCA+NaOH podem vir a ser utilizadas, contribuindo com o meio ambiente em função do aproveitamento de resíduos e reduzindo tanto a necessidade de extração de matéria-prima como a quantidade de energia utilizada para sua obtenção.

Como sugestão para trabalhos futuros, podem ser citados: estudo da interferência da temperatura no tempo de cura das argamassas; estudo de outros materiais pozolânicos no lugar do metacaulim, como, por exemplo, escória de alto forno e cinza de bagaço de cana-de-açúcar; preparação de concretos, e não apenas de argamassas, com a utilização da mistura de CCA+NaOH.

REFERÊNCIAS

- ALBITAR, M.; MOHAMED, A. M.; VISINTIN, P.; DRECHESLER, M. Durability evaluation of geopolymer and conventional concretes. **Construction And Building Materials**, Guildford, v. 136, p. 374-385, abr. 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.056>>. Acesso em: 21 maio 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. 7. ed. São Paulo, 2002. 28 p. (BT-106)
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7215**: cimento portland - determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 12653**: materiais pozolânicos: requisitos. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NM 30**: agregado miúdo: determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NM 45**: agregados: determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NM 52**: agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NM 248**: agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- BARRETO, I. M. C. B. do N. **Gestão de resíduos na construção civil**. Aracajú: Sinduscon, 2005. Disponível em: <http://www.sinduscon-se.com.br/sinduscon/arquivos/GESTO%20DE%20RESDUOS%20NA%20CONSTRUO%20CIVIL%20-%20Barreto_%20Ismeralda%20Maria%20Castelo%20Branco.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2018.
- BERNAL, S. A.; RODRIGUEZ, E. D.; GUTIERREZ, R. M.; PROVIS, J. L.; DELVASTO, S. Activation of Metakaolin/Slag Blends Using Alkaline Solutions Based on Chemically Modified Silica Fume and Rice Husk Ash. **Waste And Biomass Valorization**, [S. l.], v. 3, n. 1, p.99-108, 7 out. 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s12649-011-9093-3>>. Acesso em: 06 dez. 2018.
- BUCHWALD, A.; DOMBROWSKI, K.; WEIL, M. Development of geopolymer concrete supported by system analytical tools. In: SYNPOSIUM OF NON-TRADITION CEMENT AND CONCRETE, 2nd., 2005, [S. l.]. **Proceedings...** [S. l.: s. n.], 2005.

BOUZÓN, N.; PAYÁ, J. M.; BORRACHERO, L. S.; TASHIMA, M. M.; MONZÓ, J. Refluxed rice husk ash/NaOH suspension for preparing alkali activated binders. **Materials Letters**, Amsterdam, v. 115, p.72-74, jan. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2013.10.001>

BOUZÓN, N. **Activadores alcalinos alternativos a partir de la ceniza de cáscara de arroz para la fabricación de geopolímeros**. 2015. 409 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universitat Politècnica Devalència, Valencia, 2015. Disponível em: <<https://www.tdx.cat/handle/10251/54126>>. Acesso em: 21 jun. 2018.

CHANDRASEKHAR, S., SATYANARAYANA, K. G., PRAMADA, P. N. RAGHAVAN, P. Processing, properties and applications of reactive sílica from rice husk: na overview. **Journal of Materials Science**, Norwell, v. 38, p. 3159-3168, 2003.

CORTÊS, R. G.; FRANÇA, S. L. B.; QUELHAS, O. L. G.; MOREIRA, M. M.; MEIRINO, M. J. Contribuições para a sustentabilidade na construção civil. **Revista Eletrônica Sistema e Gestão**, [S. l.], v. 6, n. 3, p. 384-397, 2011.

CRIADO, M.; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. Alkali activation of fly ashes. part i: effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products. **Journal of Cement and Concrete Composition**, [S. l.], v. 84, p. 2048-2054, 2005.

CUNHA M. F.; FORTI B. A.; SILVA B. I. Tendências da normalização de metacaulim para uso em concretos. In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON, 52., 2010, Fortaleza. **Anais...** [S. l.]: Ibracon, 2010. p. 46.

DAVIDOVITS, J.; DAVIDOVICS, M. Geopolymer: ultra-high temperature tooling material for the manufacture of advanced composites. In: INTERNATIONAL SAMPE SYMPOSIUM AND EXHIBITION, 36th., 1991, [S. l.]. **Proceedings...** [S. l.: s. n.], 1991.

DAVIDOVITS J. Properties of geopolymer cements. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALINE CEMENTS AND CONCRETES, SCIENTIFIC RESEARCH INSTITUTE ON BINDERS AND MATERIALS, 1994, Kiev. **Proceedings...** [S. l.: s. n.], 1994.

DAVIDOVITS, Joseph. 30 years of successes and failures in geopolymer applications. market trends and potential breakthroughs. In: GEOPOLYMER CONFERENCE, 2002, [S. l.]. **Proceedings...** [S. l.: s. n.], 2002. Disponível em: <https://www.geopolymer.org/fichiers_pdf/30YearsGEOP.pdf>. Acesso em: 28 out. 2017.

DIAS, D. P.; THAUMATURGO, C. Avaliação da Aderência entre Barras Lisas de Aço e Concretos Geopoliméricos. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 5, n. 1, p. 1-15, 2001.

DUXSON, P.; PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; MALLICOAT, S. W.; KRIVEN, W.M.; VAN DEVENTER, J. S. J. Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. **Journal of Colloid and Interface Science. A: Physicochemical Engineering Aspects**, New York, v. 269, p. 47-58, 2005.

ECYCLE. **O que é energia solar e como funciona o processo de geração de eletricidade via radiação solar?** [S. l.: s. n.], 2016. Disponível em: <<http://www.ecycle.com.br/>> Acesso em: 30 ago. 2016.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Mid-infrared spectroscopic studies of alkali-activated fly ash structure. **Microporous And Mesoporous Materials**, [S. l.], v. 86, n. 1-3, p.207-214, nov. 2005. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.micromeso.2005.05.057>>. Acesso em:08 dez. 2018.

GAO, K.; LIN, K. L.; WANG, D. Y.; HWANG, C. L.; SHIU, H. S.; CHANG, Y. M.; CHENG, T.W. Effects SiO₂/Na₂O molar ratio on mechanical properties and the microstructure of nano-SiO₂ metakaolin-based geopolymers. **Construction And Building Materials**, Guildford, v. 53, p. 503-510, fev. 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.003>>. Acesso em: 21 mar. 2018.

GEOPOLYMER INSTITUTE. **70,000 tonnes Geopolymer Concrete for airport.** [S. l.], 2014. Disponível em: <<https://www.geopolymer.org/news/70000-tonnes-geopolymer-concrete-airport/>>. Acesso em: 06 abr. 2018.

GEO-POL GEOPOLYMER SYSTEM. **Estrutura macromolecular do silicato solúvel, polissiloxonato.** Disponível em: <<http://www.geopolymer.com.br/PDF/topico5.pdf>>. Acesso em: 14 abr. 2018.

GLUKHOVSKY, V. D., ROSTOVSKAJA, G. S., RUMYNA, G. V. High strength slag-alkaline cements. In: INTERNATIONAL CONGRESS CHEMICAL CEMENT, v. 3, Paris, p. 164-168, 1980.

GUTIÉRREZ, R. M.; MEJÍA, J. M.; PUERTAS, F.. Ceniza de cascarilla de arroz como fuente de sílice en sistemas cementicios de ceniza volante y escoria activados alcalinamente. **Materiales de Construcción**, Madrid, v. 63, n. 311, p. 361-375, 20 set. 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3989/mc.2013.04712>>. Acesso em:13 mar. 2018.

ISTUQUE, D. B.; REÍG, L.; MORAES, J. C. B.; AKASAKI, J. L.; BORRACHERO, M. V.; SORIANO, L.; PAYÁ, J.; MALMONGE, J. A.; TASHIMA, M. M. Behaviour of metakaolin-based geopolymers incorporating sewage sludge ash (SSA). **Materials Letters**, Amsterdam, v. 180, p. 192-195, 2016.

JOHN, V. M. **Cimentos com escória ativada de silicatos de sódio.** 1995. 199 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

LI, C.; SUN, H.; LI, L. A review: the comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements. **Cem. Conc. Res.**, Elmsford, v. 40, p. 1341–1349, 2010.

LIMA FILHO, O. F. **História e uso do silicato de sódio na agricultura.** Dourados: Eliete do Nascimento Ferreira, 2009. p. 1-115. Disponível em:

<<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/125220/1/LIVRO-SILICATO-2009-online.pdf>>. Acesso em: 14 abr. 2018.

LONGHI, M. A. **Álcali-ativação do lodo de caulim calcinado e cinza pesada com ativadores convencionais e silicato de sódio alternativo**. 2015. 184 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

KAUR, K.; SINGH, J.; KAUR, M. Compressive strength of rice husk ash based geopolymer: The effect of alkaline activator. **Construction And Building Materials**, Guildford, v. 169, p. 188-192, abr. 2018. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.200>>. Acesso em: 15 fev. 2018.

KHALE, D.; CHAUDHARY, R. Mechanism of Geopolymerization and Factors Influencing its Development: a review. **Journal of Materials Science**, Norwell, v. 42, p. 729- 746, 2007.

K., Y. Y.; LEE, B. J.; SARASWATHY, V.; KWON, S. J. Strength and durability performance of alkali-activated rice husk ash geopolymer mortar. **The Scientific World Journal**, [S. l.], v. 2014, p.1-10, 2014. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1155/2014/209584>>. Acesso em: 25 jan. 2018.

KONG, D. L. Y.; SANJAYAN, J. G.; SAGOE-CRENTSIL, K. Factors affecting the performance of metakaolin geopolymers exposed to elevated temperatures. **Journal of Materials Science**, Norwell, v. 43, n. 3, p. 824-831, 31 out. 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s10853-007-2205-6>>. Acesso em: 13 dez. 2018.

KRIVENKO, P. Y. Development of alkaline cements supported by theory and practice. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON GEOPOLYMER CEMENTS AND CONCRETES, 2005, Perth. **Proceedings...** [S. l.: s. n.], 2005.

MCLELLAN, B. C.; WILLIAMS, R. P.; LAY, J.; VAN RIESSEN, A.; CORDER, G. D. Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement. **Journal of Cleaner Production**,

Amsterdam, v. 19, n. 9-10, p. 1080-1090, jun. 2011. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.02.010>>. Acesso em: 07 dez. 2018.

MENDES, H. **A construção civil e seu impacto no meio ambiente**. [S. l.], 2017.

Disponível em: <<http://greendomus.com.br/a-construcao-civil-e-seu-impacto-no-meio-ambiente/>>. Acesso em: 15 nov. 2017.

METACAULIM DO BRASIL. **Metacaulim HP Ultra**: ficha técnica. [S. l.], 2017.

Disponível em: <<http://www.metacaulim.com.br/impermeabilizantes-metacaulim-hp-ultra.html>>. Acesso em: 10 mar. 2017.

MEHTA, P. K.; Properties of Blended cements Made From Rice Husks Ash. **ACI Journal Sci.**, Detroit, v. 74, n. 40, p. 440-442, 1977.

MEJÍA, J. M.; GUTIÉRREZ, MEJÍA R.; MONTES, C. Rice husk ash and spent diatomaceous earth as a source of silica to fabricate a geopolymeric binary binder. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 118, p. 133-139, abr. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.057>>. Acesso em:18 fev. 2018.

MONTE, M. B. M.; PAIVA, P. R. P.; TRIGUEIRO, F. E. **Técnicas alternativas para modificação do caulim**. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), 2003. 50 p. (Série Rochas e Minerais Industriais, v. 8)

MOZGAWA, W.; DEJA, J.. Spectroscopic studies of alkaline activated slag geopolymers. **Journal of Molecular Structure**, Amsterdam, v. 924-926, p. 434-441, abr. 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.molstruc.2008.12.026>>. Acesso em:12 mai. 2018.

MUÑIZ-VILLARREAL, M. S.; MANZANO, R. A.; SAMPIERI-BULBARELA, S.; GASCA-TIRADO, J. R.; REYES-ARAIZA, J. L.; RUBIO-ÁVALOS, J. C.; PÉREZ, J. J. B. The effect of temperature on the geopolymerization process of a metakaolin-based geopolymer. **Materials Letters**, Amsterdam, v. 65, n. 6, p. 995-998, mar. 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2010.12.049>>. Acesso em:12 mai. 2018.

NOVAIS, R. M.; ASCENSÃO, G.; BURUBERRI, L. H.; SENFF, L.; LABRINCHA, J. A. Influence of blowing agent on the fresh- and hardened-state properties of lightweight geopolymers. **Materials & Design**, Surrey, v. 108, p. 551-559, out. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.07.039>>. Acesso em:08 abr. 2018.

PACHECO-TORGAL, F.; CASTRO-GOMES, J.; JALALI, S. Alkali-activated binders: A review. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 22, n. 7, p. 1305-1314, jul. 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.015>>. Acesso em:08 abr. 2018.

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. **A sustentabilidade dos materiais de construção**. Guimarães: TecMinho, 2010. ISBN 978-972-8600-22-8

PALOMO, A.; GRUTZECK, M. W.; BLANCO, M.T.. Alkali-activated fly ashes A cement for the future. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 29, p.1323-1329, mar. 1999.

PELISSER, F.; GUERRINO, E. L.; MENGER, M; MICHEL, M. D. LABRINCHA, J. A. Micromechanical characterization of metakaolin-based geopolymers. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 49, p. 547-553, dez. 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.081>>. Acesso em:07 mar. 2018.

PEREIRA, A. M. **Análise da viabilidade da utilização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como aglomerante para a produção de matrizes cimentantes**. 2014. 207 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2014.

POUHET, R.; CYR, M.. Formulation and performance of flash metakaolin geopolymer concretes. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 120, p.150-160, set. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.061>>. Acesso em:03 mar. 2018.

REES, C. A.; PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; VAN-DEVENTER, J. S. J. In Situ ATR-FTIR Study of the Early Stages of Fly Ash Geopolymer Gel Formation. **Langmuir**, Washington, v. 23, n. 17, p. 9076-9082, ago. 2007.

ROCHA, G. G. N.; VASCONCELOS, W. L. Caracterização Microestrutural do Metacaulim de Alta Resistência. **Revista Concreto**, [S. l.], n. 42, p. 98-106, 2006.

ROCHA, T. S. **Argamassas geopoliméricas com diferentes ativadores e seus comportamentos frente à elevação da temperatura**. 2017. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Curso de, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2017.

ROTH, C. G.; GARCIAS, C. M. Construção Civil e a Degradação Ambiental. **Desenvolvimento em Questão**, Ijuí, v. 7, n. 13, p. 111-128, out. 2011. ISSN 2237-6453.

SANTOS, S. **Produção e avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho**. 2006. 288 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SILVA, S. P. **Geologia do caulim**. 2. ed. Belém: DNPM 5° DS/DNPM, 2001. 18 p. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/paginas/balanco-mineral/arquivos/balanco-mineral-brasileiro-2001-caulim>>. Acesso em: 20 jun. 2018.

SILVA, E. J. **Contribuição para utilização de cinza de casca de arroz na construção civi**. 2009. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

SILVA, E. J.; TASHIMA, M. M.; AKASAKI, J. L. Estudo de reações expansivas em argamassas de cimento portland com cinza de casca de arroz (CCA). **Holos Environment**, Rio Claro, v. 7, n. 1, p. 72-86, 31 maio 2006. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.14295/holos.v7i1.974>>. Acesso em:17 dez. 2017.

SEVERO, C. G. S.; COSTA, D. L.; BEZERRA, I. M. T.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A. Características, particularidades e princípios científicos dos materiais ativados alcalinamente. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, [S. l.], v. 8, n. 2, p. 55-67, fev. 2013.

SHI, C.; JIMÉNEZ, A. F.; PALOMO, A. New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 41, n. 7, p. 750–763, jul. 2011.

SIMÕES, A. **Ciência e engenharia de materiais de construção**. São Paulo: IST Press, 2012. 1057 p.

SINDICATO NACIONAL DA INDUSTRIA DO CIMENTO – SNIC (Brasil). **Produção nacional de cimento por regiões e estados**. [S. l.], 2016. Disponível em: <<http://snic.org.br/assets/pdf/numeros/1510167640.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2017.

SINGH B.; ISHWARYA G.; GUPTA M.; BHATTACHARYYA S.K. Geopolymer concrete: a review of some recent developments. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 85, p. 78-90, 2015.

SKVÁRA, F.; KOPECKÝ, L.; SMILAUER, V.; BITTNAR, Z. 2009. Material and structural characterization of alkali activated low-calcium brown coal fly ash. **Journal of Hazardous Materials**, v. 168, n. 2-3, p. 711-720. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.02.089>>. Acesso em: 20 ma. 2018.

SONAFRANK, G. H. C. Investigating 21 century cement production: cold climate. **Housing Research Center (CCHRC)**, Alaska, p. 114, 2010.

SONGPIRIYAKIJ, S.; PULNGERN, T.; PUNGPREMTRAKUL, P. JATURAPITAKKUL, C. Anchorage of steel bars in concrete by geopolymer paste. **Materials & Design**, Surrey, v. 32, n. 5, p.3021-3028, maio 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2011.01.048>>. Acesso em: 20 maio 2018.

TASHIMA, M. M., SILVA, C. A. R. L., AKASAKI, J. L. Concreto com adição de cinza de casca de arroz (CCA) obtida através de um processo de combustão não controlada. In: JORNADA SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 31., 2004, Mendoza. **Anais...** [S. l.: s. n.], 2004.

TASHIMA, M. M. **Cinza de casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland**. 2006. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006.

TASHIMA, M. M.; SILVA, E. J.; AKASAKI, J. L. Estudo de reações expansivas em argamassa de cimento portland com cinza de casca de arroz (CCA). **Holos Environment**, Rio Claro, v. 7, p. 72- 86, 2007.

TCHAKOUTE, H.K.; RUSCHER, C. H.; DJOBO, J. N. Y.; KENNE, B. B. D.; NJOPWOUO, D. Influence of gibbsite and quartz in kaolin on the properties of metakaolin-based geopolymer cements. **Applied Clay Science**, Amsterdam, v. 107, p.188-194, abr. 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2015.01.023>>. Acesso em: 06 abr. 2018.

TCHAKOUTÉ, H. K.; RUSCHER, C. H.; KONG, S.; KAMSEU, E. LEONELLI, C. Geopolymer binders from metakaolin using sodium waterglass from waste glass and rice husk ash as alternative activators: A comparative study. **Construction And Building Materials**, Guildford, v. 114, p. 276-289, jul. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.184>>. Acesso em: 04 abr. 2018.

THE ZEOBOND GROUP (Austrália) (Org.). **R&D E-Crete™ Plant E-Crete™ Pre-mixed Concrete**. [S. l.], 2018. Disponível em: <<http://zeobond.com/projects-templestowe.html>>. Acesso em: 06 abr. 2018.

TORGAL, F. P.; GOMES, J. P. C.; JALALI, S. **Cimento portland versus ligantes geopoliméricos**: considerações económicas sobre as implicações do mercado do carbono no custo dos betões. [S. l.: s. n.], 2005. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1822/4763>>. Acesso em: 13 set. 2016.

TORGAL, F. P., JALALI, S. Construção sustentável, os casos dos materiais de construção. In: CONGRESSO CONSTRUÇÃO, 3., 2007, Coimbra. **Anais...** Coimbra: Universidade de Coimbra, 2007.

TRINDADE, A. C. C. **Desenvolvimento e comportamento mecânico de compósitos geopoliméricos têxteis reforçados com fibra de juta**. 2017. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2017.

VASSALO, E. A. S. **Obtenção de geopolímero a partir de metacaulim ativado**. 2013. 104 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

VILLAQUIRÁN-CAICEDO, M. A.; GUTIÉRREZ, R. M.; GALLEGO, N. C.. A Novel MK-based Geopolymer Composite Activated with Rice Husk Ash and KOH: Performance at High Temperature. **Materiales de Construcción**, Madrid, v. 67, n. 326, p. 117-130, 14 fev. 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3989/mc.2017.02316>>. Acesso em: 28 dez. 2017.

WELDES, H. H.; LANGE, K. R.. Properties of soluble silicates. **Industrial & Engineering Chemistry**, Washington, v. 61, n. 4, p. 29-44, abr. 1969. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1021/ie50712a008>>. Acesso em: 07 fev. 2018.

WILLIAMS, R. P. **Optimising geopolymer formation**. 2015. 275 f. Tese (Doutorado) - Curso de Physics And Astronomy, Curtin University, Australia, 2015.

XU, H.; VAN DEVENTER, J.S.J.. The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. **International Journal Of Mineral Processing**, Amsterdam, v. 59, n. 3, p. 247-266, jun. 2000. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/s0301-7516\(99\)00074-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0301-7516(99)00074-5)>. Acesso em: 05 jan. 2018.

APÊNDICE A – Análise de variância amostra Ref. 1 dia

Resultado do ensaio de análise de variância (ANOVA) e do ensaio Tukey da amostra de referência após 1 dia de cura.

Tabela A.1 – Resultado do ensaio de resistência à compressão de todos os corpos de prova dos traços Ref. após 1 dia de cura (em MPa)

1 dia	Relação molar				
	0,0	0,4	0,8	1,2	1,6
Resistência	3,27	3,38	21,13	22,22	30,34
	2,02	3,27	19,12	21,9	28,1
	2,07	3,32	18,85	22,71	30,94

Fonte: Próprio autor

Tabela A.2 – Resumo do ensaio ANOVA dos traços Ref. após 1 dia de cura

RESUMO ANOVA				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
0	3	7,36	2,453333	0,500833
0,4	3	9,97	3,323333	0,003033
0,8	3	59,1	19,7	1,5519
1,2	3	66,83	22,27667	0,166433
1,6	3	89,38	29,79333	2,240533

Fonte: Próprio autor

Tabela A.3 – Resultado do ensaio ANOVA dos traços Ref. após 1 dia de cura

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1759,047	4	439,7617	492,7044	1,96E-11	3,47805
Dentro dos grupos	8,925467	10	0,892547			
Total	1767,972	14				

Fonte: Próprio autor

Tabela A.4 – Resultado do ensaio Tukey dos traços Ref. após 1 dia de cura

TUKEY	0,0	0,4	0,8	1,2	1,6
0		0,7891	4,51E-09	8,34E-10	1,01E-10
0,4	1,595		8,56E-09	1,38E-09	1,24E-10
0,8	31,62	30,02		0,04632	1,00E-06
1,2	36,34	34,75	4,724		1,55E-05
1,6	50,12	48,53	18,5	13,78	

Fonte: Próprio autor

APÊNDICE B – Análise de variância amostra Ref. 3 dias

Resultado do ensaio de análise de variância (ANOVA) e do ensaio Tukey da amostra de referência após 3 dias de cura.

Tabela B.1 – Resultado do ensaio de resistência à compressão de todos os corpos de prova dos traços Ref. após 3 dias de cura (em MPa)

3 dias	Relação molar				
	0,0	0,4	0,8	1,2	1,6
Resistência	3,32	5,61	24,56	35,73	45,21
	2,51	4,79	22,77	32,79	42,97
	2,83	5,34	19,66	34,42	47,33

Fonte: Próprio autor

Tabela B.2 – Resumo do ensaio ANOVA dos traços Ref. após 3 dias de cura

RESUMO ANOVA				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
0	3	8,66	2,886667	0,166433
0,4	3	15,74	5,246667	0,174633
0,8	3	66,99	22,33	6,1477
1,2	3	102,94	34,31333	2,169433
1,6	3	135,51	45,17	4,7536

Fonte: Próprio autor

Tabela B.3 – Resultado do ensaio ANOVA dos traços Ref. após 3 dias de cura

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	4003,707	4	1000,927	373,1516	7,79E-11	3,47805
Dentro dos grupos	26,8236	10	2,68236			
Total	4030,531	14				

Fonte: Próprio autor

Tabela B.4 – Resultado do ensaio Tukey dos traços Ref. após 3 dias de cura

TUKEY	0,0	0,4	0,8	1,2	1,6
0		0,4415	3,72E-07	2,39E-09	1,99E-10
0,4	2,496		1,26E-06	6,42E-09	2,72E-10
0,8	20,56	18,07		3,30E-05	8,46E-08
1,2	33,24	30,74	12,67		7,87E-05
1,6	44,72	42,22	24,15	11,48	

Fonte: Próprio autor

APÊNDICE C – Análise de variância amostra Ref. 7 dias

Resultado do ensaio de análise de variância (ANOVA) e do ensaio Tukey da amostra de referência após 7 dias de cura.

Tabela C.1 – Resultado do ensaio de resistência à compressão de todos os corpos de prova dos traços Ref. após 7 dias de cura (em MPa)

7 dias	Relação molar				
	0,0	0,4	0,8	1,2	1,6
Resistência	4,9	4,68	28,43	42,7	44,61
	4,47	4,52	25,76	42,65	46,35
	5,07	3,81	28,05	38,94	45,97

Fonte: Próprio autor

Tabela C.2 – Resumo do ensaio ANOVA dos traços Ref. após 3 dias de cura

RESUMO ANOVA				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
0	3	14,44	4,8133333	0,0956333
0,4	3	13,01	4,3366667	0,2144333
0,8	3	82,24	27,413333	2,0862333
1,2	3	124,29	41,43	4,6507
1,6	3	136,93	45,643333	0,8369333

Fonte: Próprio autor

Tabela C.3 – Resultado do ensaio ANOVA dos traços Ref. após 7 dias de cura

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	4608,0582	4	1152,0146	730,60902	2,759E-12	3,47805
Dentro dos grupos	15,767867	10	1,5767867			
Total	4623,8261	14				

Fonte: Próprio autor

Tabela C.4 – Resultado do ensaio Tukey dos traços Ref. após 7 dias de cura

TUKEY	0,0	0,4	0,8	1,2	1,6
0		0,9889	5,39E-09	9,56E-11	4,17E-11
0,4	0,6575		4,14E-09	8,75E-11	3,77E-11
0,8	31,17	31,83		6,63E-07	5,78E-08
1,2	50,51	51,16	19,33		0,01414
1,6	56,32	56,98	25,15	5,812	

Fonte: Próprio autor

APÊNDICE D – Análise de variância amostra Ref. 28 dias

Resultado do ensaio de análise de variância (ANOVA) e do ensaio Tukey da amostra de referência após 28 dias de cura.

Tabela D.1 – Resultado do ensaio de resistência à compressão de todos os corpos de prova dos traços Ref. após 28 dias de cura (em MPa)

28 dias	Relação molar				
	0,0	0,4	0,8	1,2	1,6
Resistência	4,63	7,3	31,05	41,29	51,03
	6,15	6,54	23,37	43,41	52,43
	6,21	6,86	25,98	38,18	49,56

Fonte: Próprio autor

Tabela D.2 – Resumo do ensaio ANOVA dos traços Ref. após 28 dias de cura

RESUMO ANOVA				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
4,63	2	12,36	6,18	0,0018
7,3	2	13,4	6,7	0,0512
31,05	2	49,35	24,675	3,40605
41,29	2	81,59	40,795	13,67645
51,03	2	101,99	50,995	4,11845

Fonte: Próprio autor

Tabela D.3 – Resultado do ensaio ANOVA dos traços Ref. após 28 dias de cura

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	3221,269	4	805,3171	189,4512	1,21E-05	5,192168
Dentro dos grupos	21,25395	5	4,25079			
Total	3242,522	9				

Fonte: Próprio autor

Tabela D.4 – Resultado do ensaio Tukey dos traços Ref. após 28 dias de cura

TUKEY	0,0	0,4	0,8	1,2	1,6
0		0,9575	3,29E-06	2,58E-08	1,27E-09
0,4	0,9545		5,75E-06	3,73E-08	1,77E-09
0,8	16,31	15,36		0,00012	9,15E-07
1,2	27,24	26,29	10,93		0,00193
1,6	35	34,04	18,68	7,755	

Fonte: Próprio autor

APÊNDICE E – Análise de variância amostra CCA+NaOH 1 dia

Resultado do ensaio de análise de variância (ANOVA) e do ensaio Tukey da amostra de CCA+NaOH após 1 dia de cura.

Tabela E.1 – Resultado do ensaio de resistência à compressão de todos os corpos de prova dos traços CCA+NaOH após 1 dia de cura (em MPa)

1 DIA	Relação molar				
	0,0	0,4	0,8	1,2	1,6
Resistência	2,02	3,49	18,2	25,87	35,46
	2,07	4,14	18,82	22,77	28,98

Fonte: Próprio autor

Tabela E.2 – Resumo do ensaio ANOVA dos traços CCA+NaOH após 1 dia de cura

RESUMO ANOVA				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
0	3	7,36	2,453333	0,500833
0,4	3	11,39	3,796667	0,106633
0,8	3	53,67	17,89	1,2493
1,2	3	74,51	24,83667	3,203333
1,6	3	96,41	32,13667	10,51843

Fonte: Próprio autor

Tabela E.3 – Resultado do ensaio ANOVA dos traços CCA+NaOH após 1 dia de cura

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	2022,709	4	505,6773	162,2994	4,76E-09	3,47805
Dentro dos grupos	31,15707	10	3,115707			
Total	2053,866	14				

Fonte: Próprio autor

Tabela E.4 – Resultado do ensaio Tukey dos traços CCA+NaOH após 1 dia de cura

TUKEY	0,0	0,4	0,8	1,2	1,6
0		0,8781	6,55E-06	2,03E-07	1,23E-08
0,4	1,318		1,51E-05	3,59E-07	2,07E-08
0,8	15,15	13,83		0,004918	1,37E-05
1,2	21,96	20,65	6,816		0,00346
1,6	29,13	27,81	13,98	7,163	

Fonte: Próprio autor

APÊNDICE F – Análise de variância amostra CCA+NaOH 3 dias

Resultado do ensaio de análise de variância (ANOVA) e do ensaio Tukey da amostra de CCA+NaOH após 3 dias de cura.

Tabela F.1 – Resultado do ensaio de resistência à compressão de todos os corpos de prova dos traços CCA+NaOH após 3 dias de cura (em MPa)

3 DIAS	Relação molar				
	0,0	0,4	0,8	1,2	1,6
Resistência	2,51	3,38	20,32	21,62	29,05
	2,83	3,7	18,29	21,28	29,47

Fonte: Próprio autor

Tabela F.2 – Resumo do ensaio ANOVA dos traços CCA+NaOH após 3 dias de cura

RESUMO ANOVA				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
0	3	8,66	2,886667	0,166433
0,4	3	11,22	3,74	0,1456
0,8	3	58,48	19,49333	1,136633
1,2	3	67,68	22,56	3,7252
1,6	3	89,18	29,72667	0,697433

Fonte: Próprio autor

Tabela F.3 – Resultado do ensaio ANOVA dos traços CCA+NaOH após 3 dias de cura

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1696,253	4	424,0633	361,1324	9,16E-11	3,47805
Dentro dos grupos	11,7426	10	1,17426			
Total	1707,996	14				

Fonte: Próprio autor

Tabela F.4 – Resultado do ensaio Tukey dos traços CCA+NaOH após 3 dias de cura

TUKEY	0,0	0,4	0,8	1,2	1,6
0		0,8649	3,38E-08	4,83E-09	2,49E-10
0,4	1,364		5,71E-08	8,36E-09	2,98E-10
0,8	26,54	25,18		0,03811	3,21E-06
1,2	31,45	30,08	4,902		8,03E-05
1,6	42,9	41,54	16,36	11,46	

Fonte: Próprio autor

APÊNDICE G – Análise de variância amostra CCA+NaOH 7 dias

Resultado do ensaio de análise de variância (ANOVA) e do ensaio Tukey da amostra de CCA+NaOH após 7 dias de cura.

Tabela G.1 – Resultado do ensaio de resistência à compressão de todos os corpos de prova dos traços CCA+NaOH após 7 dias de cura (em MPa)

7 DIAS	Relação molar				
	0,0	0,4	0,8	1,2	1,6
Resistência	4,47	5,99	25,14	39,79	49,18
	5,07	6,1	25,12	43,14	47,98

Fonte: Próprio autor

Tabela G.2 – Resumo do ensaio ANOVA dos traços CCA+NaOH após 7 dias de cura

RESUMO ANOVA				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
4,9	2	9,54	4,77	0,18
5,56	2	12,09	6,045	0,00605
25,14	2	50,26	25,13	0,0002
41,88	2	82,93	41,465	5,61125
46,84	2	97,16	48,58	0,72

Fonte: Próprio autor

Tabela G.3 – Resultado do ensaio ANOVA dos traços CCA+NaOH após 7 dias de cura

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	3190,957	4	797,7392	611,9979	6,56E-07	5,192168
Dentro dos grupos	6,5175	5	1,3035			
Total	3197,474	9				

Fonte: Próprio autor

Tabela G.4 – Resultado do ensaio Tukey dos traços CCA+NaOH após 7 dias de cura

TUKEY	0,0	0,4	0,8	1,2	1,6
0		0,6437	6,18E-10	5,95E-12	5,71E-13
0,4	1,974		1,07E-09	8,53E-12	8,59E-13
0,8	37,48	35,5		7,42E-09	2,73E-10
1,2	67,86	65,88	30,38		6,21E-05
1,6	79,65	77,68	42,18	11,8	

Fonte: Próprio autor

APÊNDICE H – Análise de variância amostra CCA+NaOH 28 dias

Resultado do ensaio de análise de variância (ANOVA) e do ensaio Tukey da amostra de CCA+NaOH após 28 dias de cura.

Tabela H.1 – Resultado do ensaio de resistência à compressão de todos os corpos de prova dos traços CCA+NaOH após 28 dias de cura (em MPa)

28 DIAS	Relação molar				
	0,0	0,4	0,8	1,2	1,6
Resistência	6,15	5,56	24,65	40,96	49,32
	6,21	6,97	24,71	39,05	47,44

Fonte: Próprio autor

Tabela H.2 – Resumo do ensaio ANOVA dos traços CCA+NaOH após 28 dias de cura

RESUMO ANOVA					
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância	
0	3	16,99	5,663333	0,801733	
0,4	3	19,07	6,356667	0,522233	
0,8	3	74,56	24,85333	0,091033	
1,2	3	122,11	40,70333	2,375033	
1,6	3	143,6	47,86667	1,674133	

Fonte: Próprio autor

Tabela H.3 – Resultado do ensaio ANOVA dos traços CCA+NaOH após 28 dias de cura

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	4472,826	4	1118,206	1023,218	5,15E-13	3,47805
Dentro dos grupos	10,92833	10	1,092833			
Total	4483,754	14				

Fonte: Próprio autor

Tabela H.4 – Resultado do ensaio Tukey dos traços CCA+NaOH após 28 dias de cura

TUKEY	0,0	0,4	0,8	1,2	1,6
0		0,9209	4,20E-09	3,19E-11	4,03E-12
0,4	1,149		6,66E-09	3,81E-11	5,01E-12
0,8	31,79	30,65		3,77E-08	5,33E-10
1,2	58,06	56,91	26,26		5,89E-05
1,6	69,92	68,78	38,13	11,87	

Fonte: Próprio autor

APÊNDICE I – Análise de variância amostra de relação molar 0,4 após 1 dia

Resultado do ensaio de análise de variância (ANOVA) e do ensaio Tukey da amostra de relação molar 0,4 após 1 dia de cura.

Tabela I.1 – Resultado do ensaio de resistência à compressão de todos os corpos de prova de relação molar 0,4 após 1 dia de cura (em MPa)

RM 0,4 - 1 dia	Ref.	CCA+NaOH
Resistência	3,38	3,76
	3,27	3,49
	3,32	4,14

Fonte: Próprio autor

Tabela I.2 – Resumo do ensaio ANOVA dos traços de relação molar 0,4 após 1 dia de cura

RESUMO ANOVA				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Ref.	3	9,97	3,323333	0,003033
CCA+NaOH	3	11,39	3,796667	0,106633

Fonte: Próprio autor

Tabela I.3 – Resultado do ensaio ANOVA dos traços de relação molar 0,4 após 1 dia de cura

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,336067	1	0,336067	6,128875	0,06853	7,708647
Dentro dos grupos	0,219333	4	0,054833			
Total	0,5554	5				

Fonte: Próprio autor

Tabela I.4 – Resultado do ensaio Tukey dos traços de relação molar 0,4 após 1 dia de cura

Tukey	Ref.	CCA+NaOH
Ref.		0,06853
CCA+NaOH	3,501	

Fonte: Próprio autor

APÊNDICE J – Análise de variância amostra de relação molar 0,4 após 3 dias

Resultado do ensaio de análise de variância (ANOVA) e do ensaio Tukey da amostra de relação molar 0,4 após 3 dias de cura.

Tabela J.1 – Resultado do ensaio de resistência à compressão de todos os corpos de prova de relação molar 0,4 após 3 dias de cura (em MPa)

RM 0,4 - 3 dias	Ref.	CCA+NaOH
Resistência	5,61	4,14
	4,79	3,38
	5,34	3,7

Fonte: Próprio autor

Tabela J.2 – Resumo do ensaio ANOVA dos traços de relação molar 0,4 após 3 dias de cura

RESUMO ANOVA				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Ref.	3	15,74	5,246667	0,174633
CCA+NaOH	3	11,22	3,74	0,1456

Fonte: Próprio autor

Tabela J.3 – Resultado do ensaio ANOVA dos traços de relação molar 0,4 após 3 dias de cura

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	3,405067	1	3,405067	21,26616	0,009944	7,708647
Dentro dos grupos	0,640467	4	0,160117			
Total	4,045533	5				

Fonte: Próprio autor

Tabela J.4 – Resultado do ensaio Tukey dos traços de relação molar 0,4 após 3 dias de cura

Tukey	Ref.	CCA+NaOH
Ref.		0,009945
CCA+NaOH	6,522	

Fonte: Próprio autor

APÊNDICE K – Análise de variância amostra de relação molar 0,4 após 7 dias

Resultado do ensaio de análise de variância (ANOVA) e do ensaio Tukey da amostra de relação molar 0,4 após 7 dias de cura.

Tabela K.1 – Resultado do ensaio de resistência à compressão de todos os corpos de prova de relação molar 0,4 após 7 dias de cura (em MPa)

RM 0,4 - 7 dias	Ref.	CCA+NaOH
Resistência	4,68	5,56
	4,52	5,99
	3,81	6,1

Fonte: Próprio autor

Tabela K.2 – Resumo do ensaio ANOVA dos traços de relação molar 0,4 após 7 dias de cura

RESUMO ANOVA				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Ref.	3	13,01	4,336667	0,214433
CCA+NaOH	3	17,65	5,883333	0,081433

Fonte: Próprio autor

Tabela K.3 – Resultado do ensaio ANOVA dos traços de relação molar 0,4 após 7 dias de cura

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	3,588267	1	3,588267	24,25597	0,007901	7,708647
Dentro dos grupos	0,591733	4	0,147933			
Total	4,18	5				

Fonte: Próprio autor

Tabela K.4 – Resultado do ensaio Tukey dos traços de relação molar 0,4 após 7 dias de cura

Tukey	Ref.	CCA+NaOH
Ref.		0,007902
CCA+NaOH	6,965	

Fonte: Próprio autor

APÊNDICE L – Análise de variância amostra de relação molar 0,4 após 28 dias

Resultado do ensaio de análise de variância (ANOVA) e do ensaio Tukey da amostra de relação molar 0,4 após 28 dias de cura.

Tabela L.1 – Resultado do ensaio de resistência à compressão de todos os corpos de prova de relação molar 0,4 após 28 dias de cura (em MPa)

RM 0,4 - 28 dias	Ref.	CCA+NaOH
Resistência	7,3	6,54
	6,54	5,56
	6,86	6,97

Fonte: Próprio autor

Tabela L.2 – Resumo do ensaio ANOVA dos traços de relação molar 0,4 após 28 dias de cura

RESUMO ANOVA				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Ref.	3	20,7	6,9	0,1456
CCA+NaOH	3	19,07	6,356667	0,522233

Fonte: Próprio autor

Tabela L.3 – Resultado do ensaio ANOVA dos traços de relação molar 0,4 após 28 dias de cura

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,442817	1	0,442817	1,326129	0,313643	7,708647
Dentro dos grupos	1,335667	4	0,333917			
Total	1,778483	5				

Fonte: Próprio autor

Tabela L.4 – Resultado do ensaio Tukey dos traços de relação molar 0,4 após 28 dias de cura

Tukey	Ref.	CCA+NaOH
Ref.		0,3136
CCA+NaOH	1,629	

Fonte: Próprio autor

APÊNDICE M – Análise de variância amostra de relação molar 0,8 após 1 dia

Resultado do ensaio de análise de variância (ANOVA) e do ensaio Tukey da amostra de relação molar 0,8 após 1 dia de cura.

Tabela M.1 – Resultado do ensaio de resistência à compressão de todos os corpos de prova de relação molar 0,8 após 1 dia de cura (em MPa)

RM 0,8 - 1 dia	Ref.	CCA+NaOH
Resistência	21,13	16,65
	19,12	18,2
	18,85	18,82

Fonte: Próprio autor

Tabela M.2 – Resumo do ensaio ANOVA dos traços de relação molar 0,8 após 1 dia de cura

RESUMO ANOVA				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Ref.	3	59,1	19,7	1,5519
CCA+NaOH	3	53,67	17,89	1,2493

Fonte: Próprio autor

Tabela M.3 – Resultado do ensaio ANOVA dos traços de relação molar 0,8 após 1 dia de cura

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	4,91415	1	4,91415	3,508603	0,134344	7,708647
Dentro dos grupos	5,6024	4	1,4006			
Total	10,51655	5				

Fonte: Próprio autor

Tabela M.4 – Resultado do ensaio Tukey dos traços de relação molar 0,8 após 1 dia de cura

Tukey	Ref.	CCA+NaOH
Ref.		0,1343
CCA+NaOH	2,649	

Fonte: Próprio autor

APÊNDICE N – Análise de variância amostra de relação molar 0,8 após 3 dias

Resultado do ensaio de análise de variância (ANOVA) e do ensaio Tukey da amostra de relação molar 0,8 após 3 dias de cura.

Tabela N.1 – Resultado do ensaio de resistência à compressão de todos os corpos de prova de relação molar 0,8 após 3 dias de cura (em MPa)

RM 0,8 - 3 dias	Ref.	CCA+NaOH
Resistência	24,56	19,87
	22,77	20,32
	19,66	18,29

Fonte: Próprio autor

Tabela N.2 – Resumo do ensaio ANOVA dos traços de relação molar 0,8 após 3 dias de cura

RESUMO ANOVA				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Ref.	3	66,99	22,33	6,1477
CCA+NaOH	3	58,48	19,49333	1,136633

Fonte: Próprio autor

Tabela N.3 – Resultado do ensaio ANOVA dos traços de relação molar 0,8 após 3 dias de cura

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	12,07002	1	12,07002	3,313966	0,142806	7,708647
Dentro dos grupos	14,56867	4	3,642167			
Total	26,63868	5				

Fonte: Próprio autor

Tabela N.4 – Resultado do ensaio Tukey dos traços de relação molar 0,8 após 3 dias de cura

Tukey	Ref.	CCA+NaOH
Ref.		0,1428
CCA+NaOH	2,574	

Fonte: Próprio autor

APÊNDICE O – Análise de variância amostra de relação molar 0,8 após 7 dias

Resultado do ensaio de análise de variância (ANOVA) e do ensaio Tukey da amostra de relação molar 0,8 após 7 dias de cura.

Tabela O.1 – Resultado do ensaio de resistência à compressão de todos os corpos de prova de relação molar 0,8 após 7 dias de cura (em MPa)

RM 0,8 - 7 dias	Ref.	CCA+NaOH
Resistência	28,43	25,14
	25,76	25,14
	28,05	25,12

Fonte: Próprio autor

Tabela O.2 – Resumo do ensaio ANOVA dos traços de relação molar 0,8 após 7 dias de cura

RESUMO ANOVA				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Ref.	3	82,24	27,41333	2,086233
CCA+NaOH	3	75,4	25,13333	0,000133

Fonte: Próprio autor

Tabela O.3 – Resultado do ensaio ANOVA dos traços de relação molar 0,8 após 7 dias de cura

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	7,7976	1	7,7976	7,474813	0,052227	7,708647
Dentro dos grupos	4,172733	4	1,043183			
Total	11,97033	5				

Fonte: Próprio autor

Tabela O.4 – Resultado do ensaio Tukey dos traços de relação molar 0,8 após 7 dias de cura

Tukey	Ref.	CCA+NaOH
Ref.		0,05223
CCA+NaOH	3,866	

Fonte: Próprio autor

APÊNDICE P – Análise de variância amostra de relação molar 0,8 após 28 dias

Resultado do ensaio de análise de variância (ANOVA) e do ensaio Tukey da amostra de relação molar 0,8 após 28 dias de cura.

Tabela P.1 – Resultado do ensaio de resistência à compressão de todos os corpos de prova de relação molar 0,8 após 28 dias de cura (em MPa)

RM 0,8 - 28 dias	Ref.	CCA+NaOH
Resistência	31,05	25,2
	23,37	24,65
	25,98	24,71

Fonte: Próprio autor

Tabela P.2 – Resumo do ensaio ANOVA dos traços de relação molar 0,8 após 28 dias de cura

RESUMO ANOVA				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Ref.	3	80,4	26,8	15,2499
CCA+NaOH	3	74,56	24,85333	0,091033

Fonte: Próprio autor

Tabela P.3 – Resultado do ensaio ANOVA dos traços de relação molar 0,8 após 28 dias de cura

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	5,684267	1	5,684267	0,741059	0,437864	7,708647
Dentro dos grupos	30,68187	4	7,670467			
Total	36,36613	5				

Fonte: Próprio autor

Tabela P.4 – Resultado do ensaio Tukey dos traços de relação molar 0,8 após 28 dias de cura

Tukey	Ref.	CCA+NaOH
Ref.		0,4379
CCA+NaOH	1,217	

Fonte: Próprio autor

APÊNDICE Q – Análise de variância amostra de relação molar 1,2 após 1 dia

Resultado do ensaio de análise de variância (ANOVA) e do ensaio Tukey da amostra de relação molar 1,2 após 1 dia de cura.

Tabela Q.1 – Resultado do ensaio de resistência à compressão de todos os corpos de prova de relação molar 1,2 após 1 dia de cura (em MPa)

RM 1,2 - 1 dia	Ref	CCA+NaOH
Resistência	22,22	25,87
	21,9	25,87
	22,71	22,77

Fonte: Próprio autor

Tabela Q.2 – Resumo do ensaio ANOVA dos traços de relação molar 1,2 após 1 dia de cura

RESUMO				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Ref.	3	66,83	22,27667	0,166433
CCA+NaOH	3	74,51	24,83667	3,203333

Fonte: Próprio autor

Tabela Q.3 – Resultado do ensaio ANOVA dos traços de relação molar 1,2 após 1 dia de cura

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	9,8304	1	9,8304	5,834469	0,073121	7,708647
Dentro dos grupos	6,739533	4	1,684883			
Total	16,56993	5				

Fonte: Próprio autor

Tabela Q.4 – Resultado do ensaio Tukey dos traços de relação molar 1,2 após 1 dia de cura

Tukey	Ref.	CCA+NaOH
Ref.		0,07312
CCA+NaOH	3,416	

Fonte: Próprio autor

APÊNDICE R – Análise de variância amostra de relação molar 1,2 após 3 dias

Resultado do ensaio de análise de variância (ANOVA) e do ensaio Tukey da amostra de relação molar 1,2 após 3 dias de cura.

Tabela R.1 – Resultado do ensaio de resistência à compressão de todos os corpos de prova de relação molar 1,2 após 3 dias de cura (em MPa)

RM 1,2 - 3 dias	Ref	CCA+NaOH
Resistência	35,73	24,78
	32,79	21,62
	34,42	21,28

Fonte: Próprio autor

Tabela R.2 – Resumo do ensaio ANOVA dos traços de relação molar 1,2 após 3 dias de cura

RESUMO				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Ref.	3	102,94	34,31333	2,169433
CCA+NaOH	3	67,68	22,56	3,7252

Fonte: Próprio autor

Tabela R.3 – Resultado do ensaio ANOVA dos traços de relação molar 1,2 após 3 dias de cura

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	207,2113	1	207,2113	70,30506	0,001107	7,708647
Dentro dos grupos	11,78927	4	2,947317			
Total	219,0005	5				

Fonte: Próprio autor

Tabela R.4 – Resultado do ensaio Tukey dos traços de relação molar 1,2 após 3 dias de cura

Tukey	Ref.	CCA+NaOH
Ref.		0,001109
CCA+NaOH	11,86	

Fonte: Próprio autor

APÊNDICE S – Análise de variância amostra de relação molar 1,2 após 7 dias

Resultado do ensaio de análise de variância (ANOVA) e do ensaio Tukey da amostra de relação molar 1,2 após 7 dias de cura.

Tabela S.1 – Resultado do ensaio de resistência à compressão de todos os corpos de prova de relação molar 1,2 após 7 dias de cura (em MPa)

RM 1,2 - 7 dias	Ref	CCA+NaOH
Resistência	42,7	41,88
	42,65	39,79
	38,94	43,14

Fonte: Próprio autor

Tabela S.2 – Resumo do ensaio ANOVA dos traços de relação molar 1,2 após 7 dias de cura

RESUMO				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Ref.	3	124,29	41,43	4,6507
CCA+NaOH	3	124,81	41,60333	2,863033

Fonte: Próprio autor

Tabela S.3 – Resultado do ensaio ANOVA dos traços de relação molar 1,2 após 7 dias de cura

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,045067	1	0,045067	0,011996	0,918061	7,708647
Dentro dos grupos	15,02747	4	3,756867			
Total	15,07253	5				

Fonte: Próprio autor

Tabela S.4 – Resultado do ensaio Tukey dos traços de relação molar 1,2 após 7 dias de cura

Tukey	Ref.	CCA+NaOH
Ref.		0,9181
CCA+NaOH	0,1549	

Fonte: Próprio autor

APÊNDICE T – Análise de variância amostra de relação molar 1,2 após 28 dias

Resultado do ensaio de análise de variância (ANOVA) e do ensaio Tukey da amostra de relação molar 1,2 após 28 dias de cura.

Tabela T.1 – Resultado do ensaio de resistência à compressão de todos os corpos de prova de relação molar 1,2 após 28 dias de cura (em MPa)

RM 1,2 - 28 dias	Ref	CCA+NaOH
Resistência	41,29	42,1
	43,41	40,96
	38,18	39,05

Fonte: Próprio autor

Tabela T.2 – Resumo do ensaio ANOVA dos traços de relação molar 1,2 após 28 dias de cura

RESUMO				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Ref.	3	122,88	40,96	6,9199
CCA+NaOH	3	122,11	40,70333	2,375033

Fonte: Próprio autor

Tabela T.3 – Resultado do ensaio ANOVA dos traços de relação molar 1,2 após 28 dias de cura

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,098817	1	0,098817	0,021262	0,891119	7,708647
Dentro dos grupos	18,58987	4	4,647467			
Total	18,68868	5				

Fonte: Próprio autor

Tabela T.4 – Resultado do ensaio Tukey dos traços de relação molar 1,2 após 28 dias de cura

Tukey	Ref.	CCA+NaOH
Ref.		0,8911
CCA+NaOH	0,2062	

Fonte: Próprio autor

APÊNDICE U – Análise de variância amostra de relação molar 1,6 após 1 dia

Resultado do ensaio de análise de variância (ANOVA) e do ensaio Tukey da amostra de relação molar 1,6 após 1 dia de cura.

Tabela U.1 – Resultado do ensaio de resistência à compressão de todos os corpos de prova de relação molar 1,6 após 1 dia de cura (em MPa)

RM 1,6 - 1 dia	Ref	CCA+NaOH
Resistência	30,34	31,97
	28,1	35,46
	30,94	28,98

Fonte: Próprio autor

Tabela U.2 – Resumo do ensaio ANOVA dos traços de relação molar 1,6 após 1 dia de cura

RESUMO				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Ref.	3	89,38	29,79333	2,240533
CCA+NaOH	3	96,41	32,13667	10,51843

Fonte: Próprio autor

Tabela U.3 – Resultado do ensaio ANOVA dos traços de relação molar 1,6 após 1 dia de cura

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	8,236817	1	8,236817	1,291142	0,319296	7,708647
Dentro dos grupos	25,51793	4	6,379483			
Total	33,75475	5				

Fonte: Próprio autor

Tabela U.4 – Resultado do ensaio Tukey dos traços de relação molar 1,6 após 1 dia de cura

Tukey	Ref.	CCA+NaOH
Ref.		0,3193
CCA+NaOH	1,607	

Fonte: Próprio autor

APÊNDICE V – Análise de variância amostra de relação molar 1,6 após 3 dias

Resultado do ensaio de análise de variância (ANOVA) e do ensaio Tukey da amostra de relação molar 1,6 após 3 dias de cura.

Tabela V.1 – Resultado do ensaio de resistência à compressão de todos os corpos de prova de relação molar 1,6 após 3 dias de cura (em MPa)

RM 1,6 - 3 dias	Ref	CCA+NaOH
Resistência	45,21	30,66
	42,97	29,05
	47,33	29,47

Fonte: Próprio autor

Tabela V.2 – Resumo do ensaio ANOVA dos traços de relação molar 1,6 após 3 dias de cura

RESUMO				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Ref.	3	135,51	45,17	4,7536
CCA+NaOH	3	89,18	29,72667	0,697433

Fonte: Próprio autor

Tabela V.3 – Resultado do ensaio ANOVA dos traços de relação molar 1,6 após 3 dias de cura

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	357,7448	1	357,7448	131,2576	0,000331	7,708647
Dentro dos grupos	10,90207	4	2,725517			
Total	368,6469	5				

Fonte: Próprio autor

Tabela V.4 – Resultado do ensaio Tukey dos traços de relação molar 1,6 após 3 dias de cura

Tukey	Ref.	CCA+NaOH
Ref.		0,0003344
CCA+NaOH	16,2	

Fonte: Próprio autor

APÊNDICE X – Análise de variância amostra de relação molar 1,6 após 7 dias

Resultado do ensaio de análise de variância (ANOVA) e do ensaio Tukey da amostra de relação molar 1,6 após 7 dias de cura.

Tabela X.1 – Resultado do ensaio de resistência à compressão de todos os corpos de prova de relação molar 1,6 após 7 dias de cura (em MPa)

RM 1,6 - 7 dias	Ref	CCA+NaOH
Resistência	44,61	46,84
	46,35	49,18
	45,97	47,98

Fonte: Próprio autor

Tabela X.2 – Resumo do ensaio ANOVA dos traços de relação molar 1,6 após 7 dias de cura

RESUMO				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Ref.	3	136,93	45,64333	0,836933
CCA+NaOH	3	144	48	1,3692

Fonte: Próprio autor

Tabela X.3 – Resultado do ensaio ANOVA dos traços de relação molar 1,6 após 7 dias de cura

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	8,330817	1	8,330817	7,552414	0,051471	7,708647
Dentro dos grupos	4,412267	4	1,103067			
Total	12,74308	5				

Fonte: Próprio autor

Tabela X.4 – Resultado do ensaio Tukey dos traços de relação molar 1,6 após 7 dias de cura

Tukey	Ref.	CCA+NaOH
Ref.		0,05147
CCA+NaOH	3,886	

Fonte: Próprio autor

APÊNDICE Z – Análise de variância amostra de relação molar 1,6 após 28 dias

Resultado do ensaio de análise de variância (ANOVA) e do ensaio Tukey da amostra de relação molar 1,6 após 28 dias de cura.

Tabela Z.1 – Resultado do ensaio de resistência à compressão de todos os corpos de prova de relação molar 1,6 após 28 dias de cura (em MPa)

RM 1,6 - 28 dias	Ref	CCA+NaOH
Resistência	51,03	46,84
	52,43	49,32
	49,56	47,44

Fonte: Próprio autor

Tabela Z.2 – Resumo do ensaio ANOVA dos traços de relação molar 1,6 após 28 dias de cura

RESUMO				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Ref.	3	153,02	51,00667	2,059633
CCA+NaOH	3	143,6	47,86667	1,674133

Fonte: Próprio autor

Tabela Z.3 – Resultado do ensaio ANOVA dos traços de relação molar 1,6 após 28 dias de cura

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	14,7894	1	14,7894	7,921973	0,048091	7,708647
Dentro dos grupos	7,467533	4	1,866883			
Total	22,25693	5				

Fonte: Próprio autor

Tabela Z.4 – Resultado do ensaio Tukey dos traços de relação molar 1,6 após 28 dias de cura

Tukey	Ref.	CCA+NaOH
Ref.		0,04809
CCA+NaOH	3,98	

Fonte: Próprio autor