



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Programa de Pós-Graduação em Engenharia das Construções
Mestrado Profissional em Engenharia das Construções (MECON)



ESTUDO DA ATIVAÇÃO ALCALINA DO RESÍDUO DE CONCRETO RECICLADO

Ouro Preto

2022

EDNA PAULA DA COSTA REIS

**“ESTUDO DA ATIVAÇÃO ALCALINA DO RESÍDUO DE CONCRETO
RECICLADO”**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia das Construções da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos à obtenção do título de Mestre em Engenharia das Construções.

Orientador: Guilherme Jorge Brigolini Silva
Coorientador José Carlos Borba Júnior

Ouro Preto
2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

R375e Reis, Edna Paula da Costa.
Estudo da ativação alcalina do resíduo de concreto reciclado.
[manuscrito] / Edna Paula da Costa Reis. - 2022.
80 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva.
Coorientador: Me. José Carlos Borba Júnior.
Dissertação (Mestrado Profissional). Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia das Construções.
Área de Concentração: Engenharia das Construções.

1. Resíduo de concreto. 2. Concreto - Ativação alcalina. 3. Construção civil. 4. Concreto - Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.). I. Júnior, José Carlos Borba. II. Silva, Guilherme Jorge Brigolini. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Edna Paula da Costa Reis

Estudo da ativação alcalina do resíduo de concreto reciclado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia das Construções da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de mestre

Aprovada em 29 de julho de 2022

Membros da banca

Doutor - Guilherme Jorge Brigolini Silva - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Mestre - José Carlos Borba Júnior - Universidade Federal de São João del-Rei
Doutora - Júlia Castro Mendes - Universidade Federal de Ouro Preto
Doutor - Keoma Defaveri do Carmo e Silva - Universidade Federal de Lavras

Guilherme jorge Brigolini Silva, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 06/12/2022



Documento assinado eletronicamente por **Guilherme Jorge Brigolini Silva, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/12/2022, às 16:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0437955** e o código CRC **50A8F30E**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me sustentar, me capacitar e me guiar, especialmente nos momentos de desespero e angústia.

Aos meus pais Wanda e Vicente e meu irmão Evandro, pelo incentivo, pelas orações e por sempre estarem disponíveis para colaborar para o meu crescimento pessoal e profissional. Em especial minha mãe, minha maior rede de apoio, por cuidar com tanto carinho do meu filho nos vários momentos que precisei me ausentar para me dedicar à pesquisa, sem você não seria possível o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu filho Emanuel, por ser minha inspiração, por trazer leveza à minha vida, por ser minha força, meu suporte e meu maior exemplo de superação.

Ao meu marido Adriano, por estar sempre ao meu lado, me incentivando e encorajando.

Ao meu orientador, Dr. Guilherme Brigolini pelos ensinamentos, disponibilidade, atenção e sugestões valiosas, por ser tão compreensivo e paciente nos momentos difíceis que precisei percorrer até chegar aqui.

Ao meu coorientador, Borba, pela contribuição valiosa à esta pesquisa, contribuição que foi além dos ensinamentos teóricos, sendo meu braço direito e literalmente colocando a mão na massa na realização dos ensaios. Obrigada por toda troca de experiência, a maioria em meio a muitas risadas, tornando tudo mais leve.

Aos meus amigos e familiares, pelas orações e apoio.

À equipe da Prefeitura do Campus, pela compreensão e incentivo.

À equipe do grupo ATIVE e RECICLOS, pelo apoio, aprendizado e disponibilidade. Em especial Bianca, Juninho e Marina.

A todos que de alguma forma contribuíram para realização deste sonho.

RESUMO

A construção civil é um dos setores que mais causam impactos ambientais, seja por meio da extração de recursos não renováveis, do consumo de energia, de emissões de gases responsáveis por efeito de estufa ou pelo grande volume de resíduos sólidos gerados. Estima-se que 57% de todo resíduo sólido gerado no Brasil é proveniente da construção civil sendo 7% das emissões globais de CO₂ advindos do processo de fabricação do cimento Portland. Diante deste cenário é de extrema importância o desenvolvimento de novas tecnologias que contribuam para que a construção civil se torne um setor com menor potencial poluidor. Esta pesquisa apresenta o estudo experimental exploratório para obtenção de um material álcali-ativado (MAA) com propriedades cimentícias utilizando o resíduo de concreto reciclado (RCR) como precursor. Após preparo do resíduo de concreto por meio de moagem e peneiramento, o material precursor foi caracterizado por meio dos ensaios de fluorescência de raios-X, difração de raios-X, granulometria por difração à laser, massa específica real e MEV-SE. Foram experimentados 5 traços diferentes na produção de pastas álcali-ativadas onde utilizou-se diferentes combinações de silicato de sódio nos teores de 3% e 9% e hidróxido de sódio nos teores de 0%, 2% e 8%. Após cura térmica a 100°C as pastas foram caracterizadas aos 7 dias de cura por meio dos ensaios de densidade aparente, índice de absorção de água, difração de raios-X, MEV/ EDS e resistência à compressão. A maior resistência à compressão obtida foi de 14,71MPa e não houve correlação nos resultados de resistência à compressão quando comparados aos ensaios de densidade aparente e absorção de água. No ensaio DRX não houve formação de novas fases cristalinas. Já na análise MEV/ EDS sugere a formação de gel C-A-S-H. Os ensaios de caracterização mostraram a viabilidade do uso do resíduo de concreto reciclado para obtenção de material álcali-ativado.

Palavras-chave: construção civil, cimento Portland, material álcali-ativado, resíduo de concreto reciclado, ativação alcalina.

ABSTRACT

Civil construction is one of the sectors that most cause environmental impacts, whether through the extraction of non-renewable resources, energy consumption, greenhouse gas emissions or the large volume of solid waste generated. It is estimated that 57% of all solid waste generated in Brazil comes from civil construction, with 7% of global CO₂ emissions coming from the Portland cement manufacturing process. Given this scenario, it is extremely important to develop new technologies that contribute to making civil construction a sector with less polluting potential. This research presents the exploratory experimental study to obtain an alkali-activated material (MAA) with cementitious properties using recycled concrete residue (RCR) as a precursor. After preparing the concrete residue by grinding and sieving, the precursor material was characterized by X-ray fluorescence, X-ray diffraction, laser diffraction granulometry, real specific mass and SEM-SE. Five different traces were experimented in the production of alkali-activated pastes where different combinations of sodium silicate in the contents of 3% and 9% and sodium hydroxide in the contents of 0%, 2% and 8% were used. After thermal curing at 100°C, the pastes were characterized after 7 days of curing through tests of apparent density, water absorption index, X-ray diffraction, SEM/EDS and compressive strength. The highest compressive strength obtained was 14.71MPa and there was no correlation in the compressive strength results when compared to the apparent density and water absorption tests. In the XRD assay there was no formation of new crystalline phases. The SEM/EDS analysis suggests the formation of a C-A-S-H gel. The characterization tests showed the feasibility of using recycled concrete residue to obtain alkali-activated material.

Keywords: civil construction, Portland cement, alkali-activated material, recycled concrete residue, alkaline activation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produtos de reação e processo de ativação alcalina de um precursor de aluminossilicato sólido.....	18
Figura 2 - Classificação dos materiais ativados alcalinamente com comparação entre o cimento Portland e os sulfoaluminatos de cálcio.....	19
Figura 3 - Diagrama esquemático do mecanismo de eflorescência nos MAA.	25
Figura 4 - Fluxograma experimental.....	29
Figura 5 - Calçada de concreto demolida Campus Morro do Cruzeiro - UFOP.....	30
Figura 6 - Preparo do Resíduo de Concreto.....	31
Figura 7 - Processo de mistura do RCR e NaOH.....	32
Figura 8 - Preparo das pastas.	32
Figura 9 - Fração brita sem preparo.	34
Figura 10 - Fração brita após limpeza com ácido clorídrico.	35
Figura 11 - Frasco Le Chatellier com RCR.....	36
Figura 12 - Difratograma do RCR.....	41
Figura 13 - Difratograma da brita.	42
Figura 14 - Distribuição granulométrica do RCR-0, RCR-1, RCR-2 e RCR-3.	43
Figura 15 - Micrografia do resíduo de concreto, com aumento de 100x e 500x respectivamente.	44
Figura 16 - Micrografias do Resíduo, 500x (a) adição de 2% de NaOH, (b) adição de 8% de NaOH.....	45
Figura 17 - Resistência à compressão aos 7 dias de cura.....	46
Figura 18 - Corpos de Prova aos 7 dias de cura.....	47
Figura 19 - Resistência à compressão das pastas álcali-ativadas x resistência à compressão mínima para tijolos categoria A, B e C (7170/1983).....	48
Figura 20 - Corpo de Prova H2S3.....	48
Figura 21 - Densidade Aparente das pastas.	50
Figura 22 - Resistência à compressão x densidade aparente.....	51
Figura 23 - Corpo de prova H8S9 apresentando eflorescência.....	52
Figura 24 - Resultado do ensaio de absorção de água.....	53
Figura 25 - Corpos de prova aos 7 dias de cura (a) H0S9 (b) H2S9 (c) H8S9 (d) H2S3 (e) H8S3.....	54

Figura 26 - Ensaio de absorção de água (a) H2S3 (b) H8S3 (c) H8S9 (d) H2S9 (e) H0S9.	54
Figura 27 - Resistência à compressão x Índice de absorção	55
Figura 28 - Índice de absorção de água das amostras x índice de absorção de água máximo estabelecido pela NBR 15270-3 (2005).	56
Figura 29 - Difratoograma do RCR e das pastas com 7 dias de cura.	57
Figura 30 - Micrografia da amostra H2S3, ampliação de 2000x e 5000x.	58
Figura 31 - Micrografia da amostra H8S3, 2000x e 5000x.	58
Figura 32 - Micrografia da amostra H0S9, 2000x e 5000x.	59
Figura 33 - Micrografia da amostra H2S9, 2000x.	60
Figura 34 - Micrografia da amostra H8S9, 2000x.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Traço das pastas.....	33
Tabela 2 - Composição química do RCR.	40
Tabela 3 - Distribuição granulométrica do RCR.	43
Tabela 4 - D10, D30, D60, Cu e CC do RCR-2.	44
Tabela 5 - Análise estatística ANOVA.....	49
Tabela 6 - Método de Tukey.....	49
Tabela 7 - Análise química semiquantitativa da amostra H2S9.	60
Tabela 8 - Análise química semiquantitativa da amostra H8S9.	62

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	- Associação brasileira de normas técnicas
Al	- Alumínio
Ca	- Cálcio
C-A-S-H	- Silico-aluminato de cálcio hidratado
CA(OH) ₂	- Hidróxido de cálcio
CPC	- Cimento Portland Comum
C-S-H	- Silicatos hidratados de Cálcio
CO ₂	- Dióxido de Carbono
DRX	- Difração de raios – X
EDS	- Energia dispersiva de raios – X
Fe	- Ferro
FTIR	- Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier
FRX	- Fluorescência de raios-x
MAA	- Materiais álcali-ativados
MEV	- Microscopia eletrônica de varredura
Mg	- Magnésio
Mn	- Manganês
NaOH	- Hidróxido de sódio
N-A-S-H	- Hidrato de aluminossilicato alcalino
Na ₂ SiO ₃	- Silicato de sódio
RC	- Resíduo de concreto
RCD	- Resíduo de construção e demolição
RCR	- Resíduo de concreto reciclado
SE	- Elétrons secundários
Si	- Silício
UFOP	- Universidade Federal de Ouro Preto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	15
1.1.1	Objetivo geral	15
1.1.2	Objetivos específicos	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Resíduos de Construção e Demolição (RCD)	16
2.2	Materiais álcali-ativados (MAA)	17
2.3	Processo de ativação alcalina	20
2.4	Propriedades dos materiais álcali-ativados (MAA)	21
2.4.1	Tamanho das partículas	22
2.4.2	Temperatura e período de cura	22
2.4.3	Solução ativadora	23
2.4.4	Eflorescência	24
2.5	Ativação alcalina do resíduo de concreto	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1	Materiais	29
3.2	Preparo das pastas	31
3.3	Caracterização do precursor de RCR	33
3.3.1	Fluorescência de raios-X (FRX)	34
3.3.2	Difração de raios-X (DRX)	34
3.3.3	Granulometria por difração à laser	35
3.3.4	Massa específica Real	36
3.3.5	Microscopia Eletrônica de Varredura - elétrons secundários (MEV-SE)	37
3.4	Caracterização das pastas álcali-ativadas	37
3.4.1	Densidade aparente	37
3.4.2	Índice de absorção de água	37
3.4.3	Microscopia eletrônica de varredura associada à espectroscopia de energia dispersiva (MEV /EDS)	38
3.4.4	Difração de raios-X (DRX)	38
3.4.5	Resistência à compressão	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1	Caracterização dos materiais	40
4.1.1	Massa específica real	40
4.1.2	Fluorescência de raios- X	40

4.1.3	Difração de raios-X.....	41
4.1.4	Granulometria por Difração à laser.....	42
4.1.5	Microscopia eletrônica de varredura associada à espectroscopia de energia dispersiva (MEV/EDS)	44
4.2	Caracterização das pastas álcali-ativadas	45
4.2.1	Resistência à compressão.....	45
4.2.2	Densidade Aparente	50
4.2.3	Relação $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$	51
4.2.4	Índice de absorção de água	52
4.2.5	Difração de Raios-X (DRX).....	56
4.2.6	Microscopia eletrônica de varredura associada à espectroscopia de energia dispersiva (MEV/EDS)	57
5	CONCLUSÕES	63
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	65
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é um dos setores que mais causam impactos ambientais, seja por meio da extração de recursos não renováveis, do consumo de energia, de emissões de gases responsáveis pelo efeito estufa ou pelo grande volume de resíduos sólidos gerados (TORGAL; JALALI, 2010).

Atualmente, os Resíduos de Construção e Demolição (RCD) são os resíduos mais gerados em todo o mundo (VILLAQUIRÁN-CAICEDO e ROBAYO-SALAZAR *et al.*, 2022). Os RCD, são definidos pela Resolução CONAMA 307 (2002) como sendo os resíduos gerados em atividades de construção, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, além dos resíduos resultantes da preparação e da escavação de terrenos.

No ano de 2020, cerca de 57% de todo o resíduo sólido urbano (RSU) gerado no Brasil, teve como origem as atividades de construção e de demolição, o que equivale a aproximadamente, 47 milhões de toneladas de RCD (ABRELPE, 2021).

De Melo (2021) relata que o concreto é o material mais abundante nos RCD e juntamente com alvenaria correspondem a aproximadamente 31,3% de todo resíduo de construção gerado. O grande volume de RCD que são gerados e conseqüentemente sua deposição inadequada são fatores que potencializam a degradação ambiental (BESSA *et al.*, 2019).

Diante deste cenário, é de extrema importância o desenvolvimento de novas tecnologias que contribuam para que a construção civil se torne um setor com menor potencial poluidor. O emprego de resíduos na fabricação de materiais de construção civil, apresenta-se como uma solução ambientalmente correta para a destinação dos mesmos.

Existe uma variedade de subprodutos e resíduos industriais, bem como uma série de aluminossilicatos que têm sido utilizados no desenvolvimento e produção de materiais álcali-ativados (MAA) em substituição ao cimento Portland (SHI *et al.*, 2011).

O processo de fabricação do cimento tem um considerável impacto ambiental, sendo responsável por cerca de 7% das emissões globais do dióxido de carbono (CO₂) (CSI, 2019). A produção mundial de cimento Portland em 2020 foi estimada em 4,1 bilhões

de toneladas (STATISTA, 2021). De maneira simplificada, durante a produção de uma tonelada de cimento, se produz, igualmente, uma tonelada de CO₂ (TORGAL, 2007). Segundo a IEA (2009), a produção de cimento crescerá de 12% a 23% até 2050, o que traz maior preocupação e provoca reflexões tanto sobre seu ciclo de vida, quanto dos produtos com ele produzidos.

A utilização dos MAA, vem se tornando uma alternativa promissora, visto que podem ser produzidos com uma vasta diversidade de precursores aluminossilicatos (PROVIS, 2018). Essa variabilidade torna viável o aproveitamento de uma gama de materiais descartados em todo o mundo.

A produção dos MAA, se dá por meio da ativação alcalina. A ativação alcalina é definida como um processo químico que permite a transformação de certas estruturas, parcial ou totalmente amorfo, em materiais cimentícios compactos. Provis (2018) define a ativação alcalina como uma reação de aluminossilicatos sólidos (precursores) sob condição alcalina (induzida por um ativador alcalino) para produzir uma pasta endurecida. Severo *et al.* (2013) define o processo de ativação alcalina como uma reação de hidratação de aluminossilicatos com materiais alcalinos e alcalinos terrosos.

Segundo Provis *et al.* (2009) a ativação alcalina de resíduos pode ser considerada uma importante área de pesquisa já que é possível usar esses materiais para desenvolver aglomerantes semelhantes ao cimento, a um baixo custo e ecologicamente correto. No entanto, ainda existem poucos estudos que utilizam os RCD em MAA. O emprego da técnica de ativação alcalina em RCD já mostrou alguns resultados promissores, quando utilizado altos teores de ativador alcalino, porém ainda não há na literatura estudos que avaliam a ativação alcalina do RC (Resíduo de concreto) com utilização de valores reduzidos de ativador. Embora o potencial de reaproveitamento desses resíduos tenha despertado muito interesse, os respectivos princípios e métodos de tratamento têm sido relatados apenas de forma discreta e, às vezes, inconclusiva.

A reciclagem eficaz e o uso de produtos químicos em resíduos de concreto podem permitir o desenvolvimento de uma indústria circular sustentável de cimento e concreto e ajudar a resolver vários problemas ambientais (HO *et al.*, 2021).

Assim, frente a larga utilização do cimento Portland na construção civil e o grande volume de RCD gerado, esse trabalho foi focado no aproveitamento do RC que após passar pelo processo de moagem e peneiramento, será denominado Resíduo de Concreto Reciclado (RCR), para produção de pastas álcali-ativadas com ativador alcalino simples e composto.

1.1 Objetivos

Na sequência serão apresentados objetivo geral e objetivos específicos do presente estudo.

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar a utilização do resíduo de concreto reciclado (RCR) no desenvolvimento de pastas álcali-ativadas com adição de hidróxido de sódio e silicato de sódio curadas à 100°C.

1.1.2 Objetivos específicos

Também, pretende-se com esta pesquisa:

- a) Estudar a viabilidade da utilização do RCR como precursor em materiais álcali-ativados;
- b) Estudar as propriedades físicas, químicas e mineralógicas do RCR e das pastas produzidas;
- c) Avaliar o efeito da adição de diferentes teores de silicato de sódio e hidróxido de sódio no material álcali-ativado produzido.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Resíduos de Construção e Demolição (RCD)

A indústria da construção civil é considerada uma das maiores produtoras de resíduos sólidos do mundo. Essa enorme quantidade de resíduos, tem sido gerada a partir do aumento da construção de novas estruturas, renovação, reconstrução, reparo, obras de demolição e projetos de desenvolvimento de infraestrutura (MARZOUK, 2014).

De acordo com Kabirifar *et al.* (2020) cerca de 35% do RCD global foi aterrado. O despejo ilegal, (descarte de resíduos sem nenhum pré-tratamento no aterro , como a separação de componentes perigosos nos resíduos) é um método comum e convencional de descarte destes resíduos (WANG, 2021).

A composição do RCD depende de tecnologias e componentes de construção, mas em geral a composição média em diferentes países mostra que 90% dos resíduos são compostos por concreto, tijolo e argamassa (GÁLVEZ-MARTOS, 2018).

Uma abordagem alternativa para minimizar os efeitos ambientais prejudiciais dos RCD é a reciclagem destes. A reciclagem de RCD pode reduzir o consumo de energia, de extração de recursos naturais e também pode reduzir a necessidade de construção de aterros (ALLAHVERDI; KANI, 2009).

O potencial de reciclagem do RCD é alto, e as aplicações mais populares nas últimas décadas incluem como agregados reciclados na produção de concretos e argamassas (TRAN *et al.*, 2022 e KOL *et al.*, 2013), em concreto pré-moldado (JUAN-VALDÉS, 2018), em aplicações geotécnicas (bases e sub-bases) (REIS, 2015), em aterros sanitários (CORREIA, 2020), em pavimentação asfáltica (GEDIK, 2020) e recentemente na síntese de geopolímeros e materiais álcali-ativados (DADSETAN *et al.*, 2019).

O reaproveitamento desses resíduos na produção de agregados reciclados (finos e graúdos) é a aplicação mais comum e tem sido amplamente estudada. No entanto, em algumas regiões, a produção de agregados reciclados não consegue competir economicamente com agregados naturais, além de ser relatado pela maioria dos pesquisadores um produto final de qualidade inferior (AKHTAR, 2018). Assim, torna-

se necessário propor aplicações (produtos) com maior valor comercial que possam conquistar o interesse da indústria.

A reciclagem e a reutilização de RCD como precursores em MAA podem oferecer uma solução sustentável para reduzir seu impacto ecológico e diminuir a demanda do Cimento Portland Comum (CPC). Saedi *et al.* (2020) relatam que a baixa reatividade destes resíduos é o principal motivo que limita sua aplicação como materiais cimentícios, sendo a utilização de métodos de ativação alcalina uma alternativa de forma a auxiliar na melhoria de suas propriedades.

Robayo-Salazar (2022) e Vásquez *et al.* (2016) consideram viável a utilização de tecnologia de ativação alcalina para o reaproveitamento de RC na produção de materiais ligantes com uso em baixo desempenho mecânico.

2.2 Materiais álcali-ativados (MAA)

Os MAA são uma excelente opção em substituição CPC. Além de colaborar para diminuição dos impactos ambientais provenientes da produção do CPC podem ainda utilizar resíduos em sua constituição (FRARE; LUZ, 2020). Resíduo este que, na maioria das vezes não tem destinação correta ou valorização comercial. Em termos de desempenho, os MAA apresentam elevada resistência mecânica à compressão, à flexão e ao ataque dos ácidos, quando comparados ao CPC (TORRALBA *et al.*, 2007).

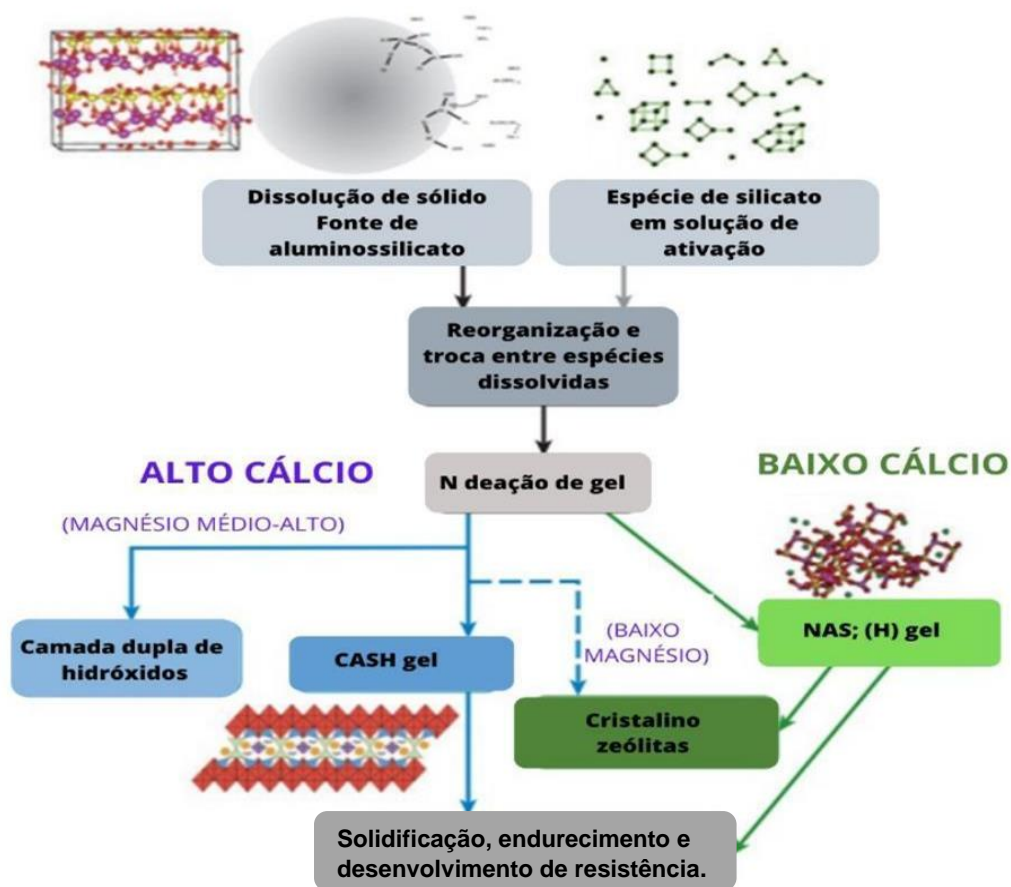
A principal diferença entre um MAA e o CPC é que o endurecimento do CPC é induzido simplesmente pela mistura com água, enquanto o MAA requer a adição de um componente alcalino (PROVIS; BERNAL, 2014).

A ativação alcalina é definida como sendo uma reação de um aluminossilicato sólido (denominado precursor) sob condições alcalinas (induzidas pelo ativador alcalino), para produzir um ligante endurecido, baseado em uma combinação de álcali hidratado fases-aluminossilicato e/ou alcalino-terroso-aluminossilicato (PROVIS, 2018).

Krivenko (2017) relata que há uma grande variedade de nomenclaturas sendo utilizadas para definir MAA e que dependendo do tipo de constituinte inicial dos

materiais e composição dos produtos resultantes foram chamados: Geopolímeros, Cimentos ativados por álcali, F-cimento, Cimento Portland sem gesso, SKJ-binder, geocimento, cimentos alcalinos. Palomo *et al.* (1999) classificam esses materiais álcali- ativados em dois modelos distintos, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Produtos de reação e processo de ativação alcalina de um precursor de aluminossilicato sólido.



Fonte: Adaptado PROVIS e BERNAL (2014)

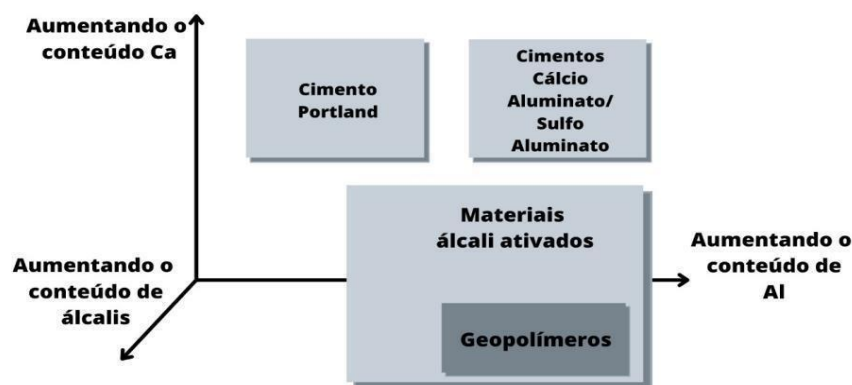
No primeiro modelo se encontram os materiais com elevada porcentagem de óxido de cálcio, que ao ser ativado com soluções alcalinas de baixa ou média concentração, originam produtos de reação do tipo silico-aluminato de cálcio hidratado (gel C-A-S-H) com nanoestrutura semelhante à tobermorita (PROVIS, 2014).

No segundo modelo, o material é composto quase que exclusivamente por sílica e alumina, que ao ser ativado por soluções alcalinas concentradas origina uma reação de polimerização de hidrato de aluminossilicato alcalino (gel N-A-S-H) (TORGAL *et al.*, 2015) com nanoestrutura semelhante a zeolíticas cristalinas (PROVIS, 2014).

O gel N-A-S-H possui estrutura desordenada, de natureza amorfa ou semi-cristalina, o gel C-A-S-H possui ligações curtas de estrutura ordenada (FERNANDEZ-JIMENEZ; PALOMO, 2009). Davidovits (1982) patenteou os cimentos de base alcalina (gel N-A-S-H) como geopolímeros. O geopolímero é considerado o cimento de terceira geração depois da cal e do CPC (HOUNSI, 2013).

Conforme esquematizado na Figura 2, os geopolímeros podem ser considerados um subconjunto dos materiais ativados alcalinamente e se caracterizam por possuir alto teor de alumínio e baixo teor de cálcio. Em contrapartida, o CPC tem alta concentração de cálcio e baixa concentração de alumínio (PROVIS; VAN DEVENTER, 2013 e VAN DEVENTER *et al.*, 2010). O MAA é a classificação mais ampla, abrange qualquer material ligante que derive de uma reação com um metal alcalino e um silicato (SHI; KRIVENKO; ROY, 2006).

Figura 2 - Classificação dos materiais ativados alcalinamente com comparação entre o cimento Portland e os sulfoaluminatos de cálcio.



Fonte: Adaptado de Provis; Van Deventer (2014) e Van Deventer *et al.* (2010).

Um terceiro modelo de ativação alcalina que seria uma combinação dos dois anteriores, pode também ser descrito. O produto seria um novo tipo de aglomerante

chamado cimento alcalino misturado ou híbrido, resultado da ativação alcalina de materiais com teores de CaO, SiO₂ e Al₂O₃ > 20% (TORGAL *et al.*, 2014).

Há duas formas pelas quais os MAA podem ser produzidos: pelo método *one-part* (uma parte), que se caracteriza pela mistura dos materiais precursores e ativadores em pó secos (monocomponentes), com posterior adição de água; e o método *two-part* (duas partes) que é caracterizado pela mistura dos materiais precursores com uma solução ativadora.

Atualmente, os MAA produzidos pelo método *one part*, são considerados especialmente promissores para aplicações “*in situ*” onde o manuseio de soluções alcalinas pode ser difícil, enquanto as misturas de duas partes parecem adequadas para trabalhos pré-moldados, onde o manuseio de produtos químicos e regimes de cura podem ser controlados de forma precisa (PROVIS, 2018).

No método *two-part* a natureza corrosiva da solução alcalina utilizada na ativação dos aluminossilicatos é considerada como uma das principais desvantagens que dificultam a viabilidade comercial e a produção em massa dos MAA (ABDEL-GAWWAD *et al.*, 2016; DAVIDOVITS, 2015).

2.3 Processo de ativação alcalina

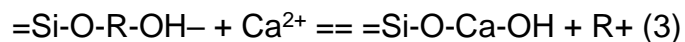
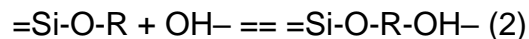
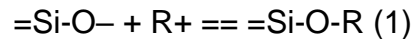
No processo de ativação alcalina estruturas parcialmente vítreas ou totalmente amorfas e/ou metaestáveis são transformadas em um compósito compacto com propriedades cimentantes (PALOMO *et al.*, 1999).

Para formação e estabilização de uma nova estrutura é necessário um meio fortemente alcalino que tem a função de dissolver certa quantidade de silício (Si) e alumínio (Al), assim como hidrolisar a superfície das partículas das matérias primas atuando no balanceamento de carga através dos cátions (SEVERO *et al.*, 2013).

Segundo Provis (2014) podem ser utilizados como ativadores alcalinos os hidróxidos, silicatos, carbonatos, sulfatos, aluminatos, óxidos ou qualquer substância solúvel com capacidade de fornecer cátions de metal alcalino, aumentar o pH da mistura de reação e acelerar a dissolução do precursor sólido. Os ativadores alcalinos mais comumente usados são os hidróxidos e silicatos. Os ativadores hidróxidos não possuem sílica em

sua composição, enquanto os ativadores silicatos adicionam sílica ao sistema (WENG, 2007).

Glukhovsky (1994) propôs um modelo que explica ativação alcalina dos materiais com alto teor de cálcio, esse modelo é resumido nas equações (1), (2) e (3)



O cátion alcalino (R+) atua como um catalisador nas fases iniciais de hidratação, via troca catiônica com os íons Ca^{2+} e com o avanço das reações, esses cátions alcalinos são absorvidos pela estrutura (TORGAL *et al.*, 2007).

Pinto (2006) classifica os ativadores como simples quando são constituídos somente por uma base alcalina (hidróxido de sódio ou de potássio), ou compostos quando formados pela associação de uma base alcalina com um silicato de sódio ou de potássio. Ainda segundo o mesmo autor nas reações com ativadores simples, em cuja constituição não entra a sílica dissolvida, o fenômeno reativo será mais demorado, sendo necessária uma primeira fase de dissolução da sílica (mais facilitada quando ela se encontra em estado amorfo ou semi-cristalino).

2.4 Propriedades dos materiais álcali-ativados (MAA)

A estrutura e as propriedades mecânicas dos MAA são afetadas por diversos parâmetros, como composição química, tamanho das partículas das matérias-primas, natureza e concentração da solução ativadora, temperatura e período de cura (KOMNITSAS *et al.*, 2015).

2.4.1 Tamanho das partículas

Tchadjie (2018) relata que partículas mais finas exibem melhor solubilidade resultando em maior reatividade, enquanto partículas mais grossas se comportam como “agregados” no MAA. O tempo de moagem prolongado aumenta a resistência à compressão tornando a microestrutura dos produtos álcali-ativados mais compactos e densos (HEAH *et al.*, 2013).

Assi *et al.* (2018) ao utilizarem a ativação alcalina em cinzas volantes para produção de concreto constatou que a densidade dos corpos de prova aumentou quando o tamanho médio das partículas no precursor foi reduzido, fato que foi atribuído ao preenchimento de vazios por pequenas partículas de cinzas volantes disponíveis no material e/ou pela formação de produtos de geopolimerização.

Hounsi *et al.* (2013) observaram a amorfização parcial do caulim durante a ativação mecânica, indicada pela redução da intensidade nos principais picos característicos dos padrões de DRX para as amostras moídas.

De acordo com Hoe *et al.* (2021), apenas partículas menores que 125 µm podem ser álcali-ativadas 14 devido à sua maior reatividade, enquanto outros autores (HASSAN, 2019; AHMARI, 2012; VAF AEI e ALLAHVERDI, 2019) recomendam que o tamanho da partícula dos materiais à base de RCD seja mais fino que 75 µm para ser usado como precursores.

As variações de resistência à compressão podem, portanto, ser previstas e controladas pela compreensão da distribuição do tamanho das partículas. Azevedo (2019) enfatiza que o processo de moagem demanda um relevante gasto energético não sendo sensato aumentar indiscriminadamente este consumo de forma a melhorar a resistência.

2.4.2 Temperatura e período de cura

O aumento da temperatura pode acelerar a velocidade da reação, resultando em maior resistência à compressão (HARDJITO *et al.*, 2006). Van Jaarsveld *et al.* (2002) provaram que a cura por longo período de tempo em temperaturas elevadas parece

enfraquecer a estrutura, sugerindo assim que pequenas quantidades de água estrutural precisam ser retidas para eliminar fissuras e manter a integridade estrutural.

Najafi e Allahverdi (2009) relatam que uma pré-cura à temperatura ambiente, antes da aplicação de calor, é benéfica para um melhor desenvolvimento de resistência.

Komnitsas *et al.* (2015) ressaltam a necessidade de aplicar energia térmica para aumentar a resistência mecânica do RCD ativado por álcali, devido à sua natureza predominantemente cristalina.

As condições de cura também afetam as propriedades dos MAA. Um estudo comparativo com cura aquecida seca e com vapor concluiu que a resistência à compressão do concreto álcali-ativado curado a seco é aproximadamente 15% maior que o do concreto álcali-ativado curado com vapor nas mesmas temperaturas (LLOYD; RANGAN, 2010).

2.4.3 Solução ativadora

Diferentes parâmetros influenciam os mecanismos de formação e propriedades dos ligantes álcali-ativados, entre os quais a concentração do ativador é um dos mais importantes, pois determina essencialmente a extensão da reação e a densificação da microestrutura (LLOYD; RANGAN, 2010).

Criado *et al.* (2005) e Xu *et al.* (2000) relatam que os ativadores de silicato promovem uma aceleração na reação e o silicato favorece o processo de polimerização, levando a um produto de reação com mais sílica e maior resistência mecânica. Kaps e Buchwald (2002) mostraram que a adição de solução de silicato de sódio no MAA à base de caulinita aumentou a resistência à compressão de 13 MPa para 38 MPa. Porém a produção de silicato de sódio envolve a calcinação de carbonato de sódio (Na_2CO_3) e quartzo (SiO_2) em temperaturas entre 1400 °C e 1500 °C, produzindo grande quantidade de CO_2 como produto secundário (TURNER; COLLINS, 2013)

Wang *et al.* (2005) demonstraram experimentalmente que as propriedades mecânicas dos geopolímeros estão relacionadas à concentração da solução de NaOH (Hidróxido de Sódio) nos materiais ativados por essa solução. O mesmo autor concluiu que a

resistência à compressão, bem como a densidade aparente, aumentam à medida que a concentração de NaOH é acrescida, dentro do intervalo de 4 mol/L a 12 mol/L.

Em geral, são necessários hidróxidos e silicatos alcalinos com valores de pH superiores a 13 para ativar aluminossilicatos para síntese dos MAA (KHALE; CHAUDHARY, 2007). Precursores também podem ser ativados por carbonato de sódio, silicato de potássio e hidróxido de potássio (PROVIS, 2014). Em geral, os ativadores alcalinos baseados em sódio são comumente utilizados devido à sua grande disponibilidade, baixo custo e alta reatividade (PROVIS *et al.*, 2014), mas para aplicações em alta temperatura, o hidróxido e silicato de potássio são preferíveis (BARBOSA; MACKENZIE, 2003 e LIZCANO *et al.*, 2012).

2.4.4 Eflorescência

Mesmo com o rápido desenvolvimento da tecnologia do cimento álcali-ativado nos últimos anos, alguns fenômenos ainda precisam ser melhor compreendidos, que podem alterar a durabilidade do material. Em muitos usos industriais e pesquisas de laboratório observou-se a formação de sais na superfície de cimentos do tipo alcalino-ativados, o que foi identificado como eflorescência (LONGHI, 2019).

Segundo Arbi *et al.* (2016), eflorescência é uma formação superficial decorrente de deposição de sal, proveniente da carbonatação dos álcalis lixiviados. A taxa de eflorescência é influenciada pela interação química entre o CO₂, os produtos da reação, a solução de poros e o transporte de massa de CO₂ para a estrutura porosa (ZIVICA; BAJZA, 2001).

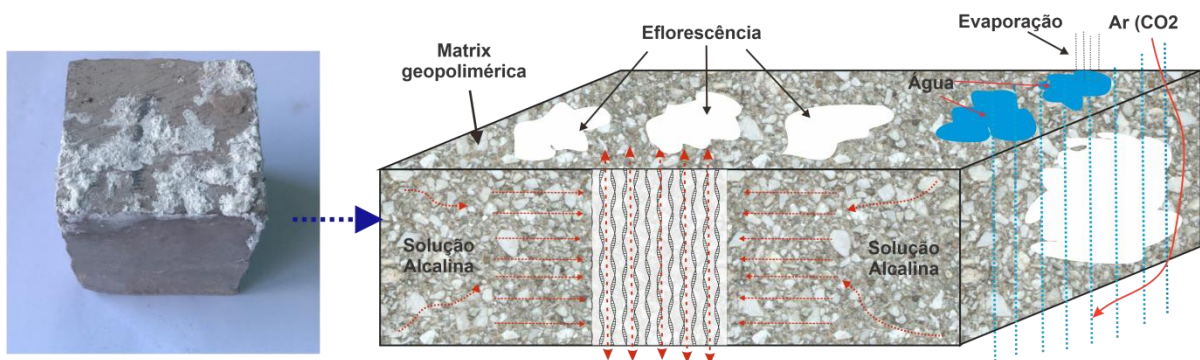
Um teor mais alto de álcali leva à carbonatação, assim a eflorescência do MAA aumenta gradualmente com o aumento do conteúdo alcalino, o que também contribui para a perda de resistência mecânica. O aparecimento da eflorescência é devido à lixiviação do hidróxido de sódio não reagido, que em uma reação secundária reage com o CO₂ atmosférico, produzindo carbonato de sódio (ALLAHVERDI, 2009). Para os MAA, a eflorescência pode ser um problema significativo quando os produtos são expostos ao ar úmido ou em contato com a água (ŠKVÁRA *et al.*, 2009).

Diversos fatores compõem a durabilidade dos MAA e muitos deles ainda carecem de entendimento. A formação de eflorescência, é constantemente observada durante o desenvolvimento de pesquisas em MAA, afetando a resistência e durabilidade dos geopolímeros, no entanto ainda é pouco reportada e compreendida. Segundo Bernal *et al.* (2013) a eflorescência é um dos aspectos de durabilidade mais prejudiciais aos MAA. O fenômeno mais comum de eflorescência é a formação de pó branco, flóculo ou nodular na superfície do material, podendo essa substância branca, conhecida como produtos de eflorescência, ser carbonato de sódio, bicarbonato, ou outros carbonatos alcalinos hidratados.

A cura térmica em temperaturas superiores a 45°C proporciona uma redução significativa na eflorescência, e também aumenta os níveis de resistência mecânica (ALLAHVERDI *et al.*, 2015). Kani *et al.* (2012) relatam que eflorescências podem ser reduzidas por cura com elevação de temperatura e vapor (diferente de cura em estufa). Wang *et al.* (2020) relatam que a eflorescência no MAA não está relacionada apenas à sua própria estrutura, mas também às suas condições de preparo e ambiente externo.

Na Figura 3 é demonstrado como ocorre a eflorescência nos MAA, onde o excesso de solução alcalina na matriz álcali-ativada é transferido para a superfície por evaporação através de suas estruturas porosas e reage com o CO₂ do ar para formar carbonato.

Figura 3 - Diagrama esquemático do mecanismo de eflorescência nos MAA.



Fonte: Adaptado (WANG, 2020).

2.5 Ativação alcalina do resíduo de concreto

Abdel-Gawwad *et al.* (2018) estudaram MAA produzido por meio da ativação térmica do RC na presença de hidróxido de sódio em temperaturas elevadas (1100 °C e 1200°C) onde obteve como resultado um MAA com resistência à compressão de até 79 MPa aos 28 dias de cura, os autores relatam que devido a cor branca do material produzido há vantagens de utilização em projetos de construção com fins decorativos.

Abdel-Gawwad *et al.* (2018) utilizou resíduos de concreto e lodos perigosos contendo chumbo na produção de materiais cimentícios ativados por álcalis. Concluindo que a incorporação de 10% em peso do lodo na mistura NaOH–RC resultou na obtenção de um material endurecido com propriedades mecânicas superiores à mistura Na₂SiO₃ – RC. A resistência à compressão máxima obtida foi de ~18 Mpa aos 180 dias de cura.

Ahmary *et al.* (2012) produziram aglomerante geopolimérico a partir de resíduo de pó de concreto de corpos de prova moídos misturado com cinza volante concluindo que a adição de até 50% de cinza volante ao MAA ajuda a melhorar a resistência à compressão, teores acima disso causam um decréscimo na resistência.

A maioria das investigações disponíveis utilizaram altas dosagens de ativadores químicos, tratamento de cura térmica ou ambos para produzir MAA baseados em RCD com propriedades comparáveis aos do CPC (ALHAWAT *et al.*, 2022) limitando suas aplicações à produção de elementos estruturais pré-moldados. A combinação de silicato de sódio e hidróxido de sódio parece ser a forma mais eficaz que pode ser utilizada para ativar misturas álcali-ativadas derivadas de RCD; no entanto, a adoção de ativadores alternativos produzidos a partir de materiais residuais ricos em sílica pode ser altamente benéfico para economia de custos e energia (ALHAWAT, 2022).

Allahverdi; Kani (2009) investigaram a possibilidade de utilização resíduos de tijolo e concreto em diferentes proporções para produzir material geopolimérico. Seus resultados indicam que os resíduos de tijolos são mais adequados do que os resíduos de concreto para reações geopoliméricas, obtendo resistência à compressão máxima em 28 dias de 40 MPa para o sistema composto apenas de tijolos.

Das *et al.* (2021) utilizaram altas porcentagens de solução de NaOH (18% a 32%) e Na₂SiO₃ (49% a 63%) para produção de argamassa álcali-ativada utilizando RC como

precursor, onde obteve resistência máxima de 20,55 MPa aos 90 dias de cura em temperatura ambiente. Com base nos resultados experimentais, Das *et al.* (2021) relata que é possível utilizar RC como um único precursor para a fabricação de MAA em cura à temperatura ambiente.

Komnitsas *et al.* (2015) produziram MAA utilizando RC, telha e tijolo com adição de altas concentrações de hidróxido de sódio (8, 10, 12 e 14M) e silicato de sódio (6%) atingindo resultados de resistência à compressão aos 7 dias de de até 13,0 MPa para RC, 49,5 MPa para a telha e 57,8 MPa para o tijolo. Komnitsas *et al.* (2015) relataram ainda que o tamanho da partícula da matéria-prima provou ser um dos fatores mais importantes que afetam a resistência à compressão do MAA produzido a partir de RCD e que quando $D_{50} < 15 \mu\text{m}$ a resistência à compressão dos MAA aumenta substancialmente. Komnitsas *et al.* (2015) ainda ressaltam a necessidade de aplicar energia térmica para aumentar a resistência mecânica do RCD ativado por álcali, devido à sua natureza predominantemente cristalina.

Zaharaki *et al.* (2016) investigaram a ativação alcalina de mistura de precursores em diferentes traços utilizando RCD e resíduos industriais de escória de ferro níquel e lama vermelha, constatando que os valores mais altos de resistência à compressão foram obtidos para corpos de prova contendo menores porcentagens de RC, ou seja, 10% e 15%. Apesar da resistência dos corpos de prova diminuir gradualmente quando a temperatura aumentou de 400 °C a 800 °C ainda assim permaneceu em valores aceitáveis para materiais estruturais quando submetidos a aquecimento térmico demonstrando que os produtos finais obtidos podem ser usados para proteção contra incêndio.

Lampris *et al.* (2009) utilizaram misturas de resíduos finos provenientes da lavagem de agregados, cinza combustível e metacaulim para produzir MAA, onde obteve resistência à compressão de 18,7 MPa aos 7 dias de cura com adição de hidróxido de sódio nas concentrações de 4mol/L a 10 mol/L. Os mesmos autores relataram que um tratamento de cura de 24 h a 105 °C e a adição de 20% de metacaulim como fonte de alumina solúvel aumentou a resistência mecânica do geopolímero em 112% e 63%, respectivamente. As amostras curadas a 60 °C exibiram maior resistência à compressão em comparação com as amostras curadas à temperatura ambiente.

Robayo-salazar *et al.* (2017) produziram MAA utilizando cimentos híbridos com adição de 10% CPC utilizando como precursor: 90% RC, 90% cerâmica e/ou 90% de alvenaria atingindo valores máximos de resistência à compressão aos 90 dias com cura a 25 °C de 16,9, 36,5 e 25,2 MPa, respectivamente.

Sui *et al.* (2020) utilizaram o tratamento térmico para otimizar as propriedades do RC e sua aplicação em argamassa, e os resultados mostraram que mais elementos ativos podem ser capturados do RCR após o tratamento térmico.

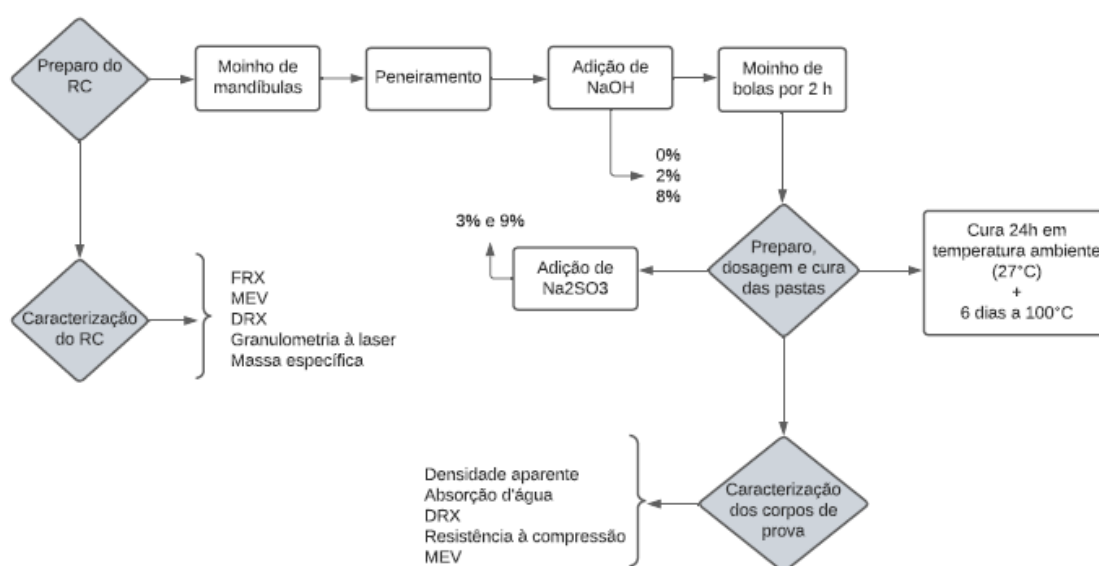
Vásquez *et al.* (2016) avaliaram a síntese de geopolímeros baseados na ativação alcalina de resíduos de demolição de concreto (RCD) utilizando hidróxido de sódio e silicato de sódio como ativadores alcalinos para produzir geopolímeros com 100%RCD, obtendo resistência de até 11,64 MPa. Ao adicionar metacaulim a resistência à compressão aumentou 76%.

Xie *et al.* (2020) produziram concreto geopolimérico baseado em uma mistura binária de resíduos de concreto e metacaulim (5–25%) com 40% de agregados reciclados e igualmente avaliados a adição de sílica ativa à mistura. Os autores concluíram que o aumento no teor de metacaulim e de sílica ativa, bem como a maior alcalinidade, aumentam significativamente a força final do geopolímero.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia a ser seguida nesta pesquisa se constituiu de quatro etapas principais: Preparo dos materiais, Caracterização dos materiais, Preparo das Pastas e Caracterização das pastas, conforme esquematizado na Figura 4.

Figura 4 - Fluxograma experimental.



3.1 Materiais

a) Resíduo de concreto reciclado (RCR)

O precursor a ser utilizado neste trabalho é o Resíduo de concreto reciclado (RCR). O resíduo de concreto (RC) a ser reciclado (Figura 5), é proveniente da obra de adequação dos passeios para acessibilidade externa do Campus Morro do Cruzeiro – UFOP, que teve início em 2019. Esta obra foi executada de forma a adequar a área externa do Campus à locomoção de pessoas com deficiência visual e locomotiva.

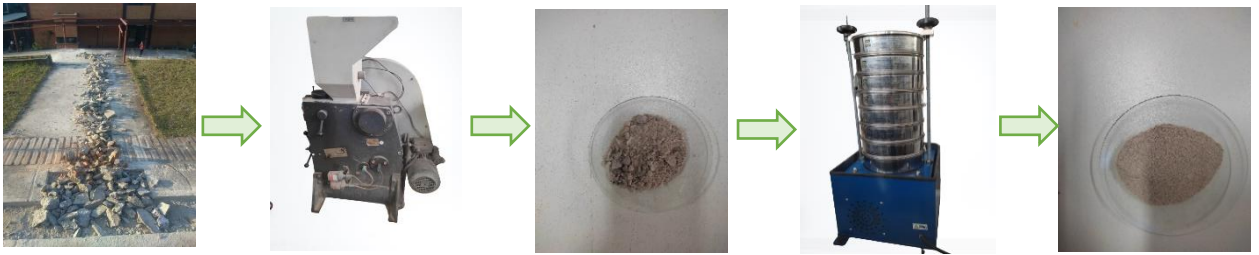
Figura 5 - Calçada de concreto demolida Campus Morro do Cruzeiro - UFOP.



À medida que os prédios do Campus Morro do Cruzeiro foram sendo construídos foram também executados estes passeios, sendo que os mais antigos datam da década de 70.

Para a adequação das calçadas, algumas áreas de passagem de pedestres foram totalmente demolidas já em outras áreas houve demolição parcial para que pudesse ser instalado piso podotátil. As calçadas foram demolidas por meio de marteleto e em seguida foram devidamente transportadas ao Laboratório de Construção Civil da UFOP para reciclagem. Os RC foram coletados em diversos pontos do Campus Morro do Cruzeiro/UFOP em tamanhos variados, aqueles com dimensão superior a 5cm tiveram seu tamanho reduzido por meio de uma marreta e posteriormente todo resíduo foi levado a um moinho de mandíbulas de aço manganês. Após passar três vezes pela mandíbula (Trituração primária) e reduzido a uma granulometria máxima de 4,8mm, esse material foi peneirado por 5 minutos com o auxílio do agitador elétrico e o material passante na peneira de 600 μm foi definido como o precursor a ser utilizado neste trabalho. O processo de preparo do RC é apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Preparo do Resíduo de Concreto.



b) Ativadores alcalinos

Foram utilizados hidróxido de sódio e silicato de sódio como ativadores alcalinos. O hidróxido apresenta-se sob a forma sólida, possui fórmula molecular NaOH , densidade de 2,12 g/mL, massa molar de 40,0 g/mol e 98,0% de pureza.

O silicato de sódio apresenta-se na forma líquida, possui fórmula molecular Na_2SiO_3 , densidade de 2,40 g/mL, massa molar de 122,06 g/mol.

d) Água destilada

A água destilada utilizada na produção das pastas possui densidade de 1,00 g/mL, massa molar de 18 g/mol e 100,0% de pureza.

3.2 Preparo das pastas

Foram produzidos corpos de prova prismáticos de dimensões 4x4x16 cm com o intuito de caracterizar as pastas e avaliar a viabilidade da ativação alcalina do RC em estudo. Para confecção das pastas primeiramente definiu-se a relação água/sólidos baseado em um valor mínimo que mantivesse a pasta com boa trabalhabilidade, essa relação foi mantida constante no valor de 0,30. Foram produzidos traços por meio da ativação alcalina simples com silicato de sódio e traços com ativação alcalina composta com silicato de sódio e hidróxido de sódio. Todas as determinações de massa foram realizadas em balança digital de precisão.

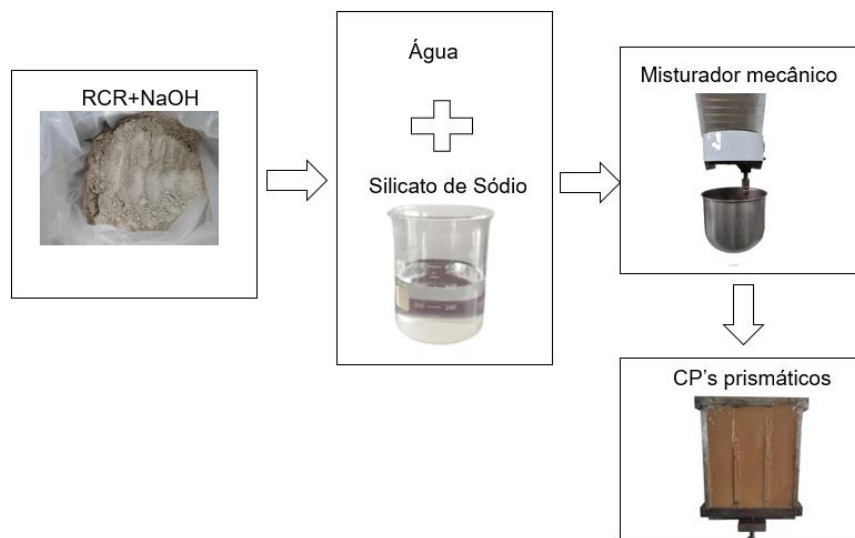
De forma a diminuir o tamanho dos grãos do resíduo, dar homogeneidade à mistura e potencializar o processo de moagem, evitando aglomeração de partículas, essa mistura foi realizada em um moinho de bolas horizontal de baixa eficiência, por um período de duas horas a uma velocidade de 50 rpm. A quantidade de NaOH adicionado ao resíduo variou em três valores de porcentagem em relação à quantidade de resíduo: pasta sem adição de NaOH (0%), pastas com adição de 2% e 8% de NaOH, este processo é apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Processo de mistura do RCR e NaOH.



Na Figura 8 é apresentado o esquema de produção e moldagem das pastas.

Figura 8 - Preparo das pastas.



Para adição do Na_2SiO_3 este foi previamente misturado junto à água de amassamento no teor de 3% e 9% de massa em relação ao RCR para todos os traços. A mistura da pasta foi realizada por meio de um misturador mecânico planetário. A pasta foi misturada por um período de 3 minutos na velocidade baixa e em seguida foi realizada a moldagem dos corpos de prova. Os moldes com os as pastas foram então envolvidos com plástico filme e curados à temperatura ambiente (25 ± 1 °C) por 24 horas e posteriormente em estufa a 100°C por 6 dias. A desmoldagem dos corpos de prova ocorreu aos 5 dias de cura.

Na Tabela 1 são apresentadas as composições dos traços produzidos, assim como a nomenclatura das amostras a serem utilizadas no decorrer deste trabalho. Ressalta-se que foram moldados em escala de protótipo corpos de prova utilizando hidróxido de sódio como único ativador alcalino nos teores de 2% e 8% em relação a massa do RCR assim como também foi realizado em escala de protótipo a cura em temperatura ambiente, cura por 6 dias a 70°C e cura por 24h a 100°C para todos os traços porém obteve-se qualitativamente baixa resistência mecânica, logo as amostras não foram caracterizadas e definiu-se pela caracterização somente dos traços apresentados na Tabela 1 com cura a 100°C por 6 dias.

Tabela 1 - Traço das pastas

Corpo de Prova	NaOH (%)	Na_2SiO_3 (%)
H2S3	2	3
H2S9	2	9
H8S3	8	3
H8S9	8	9
H0S9	0	9

3.3 Caracterização do precursor de RCR

A amostra de RCR foi caracterizada quimicamente pela técnica de Fluorescência de Raios X (FRX). A análise mineralógica foi realizada por Difração de Raios-X (DRX) e

MEV-SE. A análise física da amostra foi analisada pelo ensaio de massa específica real e granulometria por difração à laser.

3.3.1 Fluorescência de raios-X (FRX)

O RCR foi analisado quimicamente por meio do ensaio de espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) que determinará qualitativamente os elementos químicos presentes no material. Para a preparação das amostras parte do material foi cominuído até uma granulometria inferior a 45 µm em um almofariz. O ensaio de FRX foi realizado através do Espectrômetro de raios-X Epsilon 3x.

3.3.2 Difração de raios-X (DRX)

A análise mineralógica foi realizada por meio de ensaio de difração de raios-X (DRX), onde foi possível identificar e quantificar as fases cristalinas presentes na amostra. Para este ensaio foram preparadas duas amostras. Para a primeira amostra foi retirada uma pequena fração do RCR. Para a segunda amostra, uma pequena fração de brita do RC foi separada. Na Figura 9 é apresentado a amostra de brita utilizada para o ensaio DRX.

Figura 9 - Fração brita sem preparo.



Para retirar a argamassa aderida ao agregado foi adicionado solução diluída de ácido clorídrico à amostra. Em seguida a amostra foi lavada e seca em estufa a 100°C por 24h e é apresentada na Figura 10.

Figura 10 - Fração brita após limpeza com ácido clorídrico.



Todas as amostras foram cominuídas até que todo o material passasse na peneira #325 (abertura de 45 µm). Por meio deste ensaio foi possível identificar as fases cristalinas presentes no RCR e de forma isolada no agregado graúdo. A identificação e análise das fases foi realizada por meio do software X'Pert High Score Plus 3.0 Panalytical, utilizando banco de dados cristalográfico COD 2011 (Crystallography Open Database). Para este ensaio foi utilizado o equipamento D2 PHASER 2ª Geração Bruker nos parâmetros faixa de varredura 2θ de 6-80° passo de 0,018° por segundo, 8 rotações do spinner por segundo.

3.3.3 Granulometria por difração à laser

Para caracterização física do RCR foi realizado o ensaio de granulometria por difração à laser do RCR sem moer, do RCR moído após 1h, 2h e 3h. Por meio deste ensaio foi definido o tempo ótimo de moagem do resíduo. Os coeficientes de curvatura e uniformidade são parâmetros importantes e amplamente utilizados na classificação de solos e materiais de forma a auxiliar na análise de graduação ou distribuição de partículas (ONYELOWE, 2021). Para análise de uniformidade do resíduo foi calculado o coeficiente de não uniformidade (Cu), já para análise de graduação foi calculado o Coeficiente de Curvatura (Cc), sendo:

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \text{e} \quad Cc = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \cdot D_{10}}$$

onde, D10, D30, D60 representam o tamanho das partículas correspondentes quando a porcentagem acumulada chega respectivamente a 10%, 30% e 60%. O equipamento utilizado foi o Bettersize 2000 sendo a dispersão do pó realizada por via úmida utilizando água.

3.3.4 Massa específica Real

A determinação da massa específica do RCR seguiu o procedimento estabelecido na NBR 16605 (2017) para o CPC e outros materiais em pó, por meio do frasco de *Le Chatelier* (Figura 11), que verifica o deslocamento do líquido no interior do recipiente após a inserção de material.

Figura 11 - Frasco Le Chatelier com RCR.



O cálculo da massa específica (ρ) foi obtido por meio da equação 3:

$$\rho = m/V \quad (3)$$

onde,

m é a massa do material ensaiado;

V é o volume deslocado pela massa do material ensaiado ($V_2 - V_1$);

3.3.5 Microscopia Eletrônica de Varredura - elétrons secundários (MEV-SE)

Para a realização do ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura - elétrons secundários (MEV-SE) as amostras de RCR foram fixadas em fita de carbono dupla face no *stub* e recobertas por uma camada de material condutor de elétrons, neste trabalho as amostras foram recobertas com um filme de ouro (QUORUM Q150T). Por meio deste ensaio foi possível a análise qualitativa da morfologia das partículas do RCR. O ensaio foi realizado no equipamento VEGA3, TESCAN.

3.4 Caracterização das pastas álcali-ativadas

Após a confecção dos corpos de prova, os mesmos foram caracterizados pelos ensaios de densidade aparente, absorção de água por imersão, microscopia eletrônica de varredura acoplada ao detector de energia dispersiva de raios-X (MEV/ EDS), Difração de Raios-X (DRX) e ensaio de resistência à compressão.

3.4.1 Densidade aparente

A densidade aparente de cada pasta no estado endurecido foi determinada a partir da avaliação de 3 corpos de prova 4x4x16 cm moldados para cada traço. Conforme as recomendações da NBR 13280 (ABNT, 2008), as dimensões dos corpos de prova foram obtidas com auxílio de um paquímetro e a massa com o auxílio de uma balança com precisão de 0,1g. A densidade aparente foi calculada dividindo a massa da amostra pelo seu volume. O valor médio das três amostras foi considerado como resultado da densidade aparente de cada mistura.

3.4.2 Índice de absorção de água

Para execução do ensaio de absorção de água, foram utilizados fragmentos dos corpos de prova que após serem previamente pesados para obtenção da massa seca (m_{sec}) foram imersos em água. Decorrido o período de 24 horas, as amostras

foram secas superficialmente e pesadas para obtenção da massa saturada (m_{sat}). O índice de absorção é expresso pela equação 4:

$$Ab(\%) = \frac{m_{sat} - m_{sec}}{m_{sec}} \cdot 100 \quad (4)$$

3.4.3 Microscopia eletrônica de varredura associada à espectroscopia de energia dispersiva (MEV /EDS)

Para a realização deste ensaio foram coletados fragmentos dos Corpos de prova rompidos. Primeiramente estes fragmentos foram inseridos em um porta amostras, embutidos com resina de poliéster e levados para o dessecador a vácuo pelo período de 24 horas. Decorrido esse período as amostras foram imersas em isopropanol por 5 minutos em um banho ultrassônico. A amostra foi então metalizada com um filme de ouro e armazenada no dessecador por um período de 24h. Para as amostras H0S9, H2S3 e H8S3 foi realizado a análise morfológica do material. Para as amostras H2S9 e H8S9 foi realizado o ensaio MEV em associação à Espectroscopia de energia de dispersiva (EDS) com o intuito de identificar pontualmente a composição química do MAA. O ensaio foi realizado no equipamento VEGA 3, TESCAN.

3.4.4 Difração de raios-X (DRX)

Para a realização deste ensaio, foram retirados fragmentos de CP endurecidos, que foram cominuídos em um almofariz até atingir um tamanho inferior a #325 (abertura de 45 μ m). Esse ensaio foi realizado utilizando o equipamento D2 PHASER 2ª Geração Bruker.

3.4.5 Resistência à compressão

O ensaio mecânico de resistência à compressão foi realizado seguindo as especificações da ABNT 13279 (2005). Para a determinação da resistência à compressão foram utilizados 6 corpos de prova prismáticos para cada traço. A resistência à compressão foi determinada individualmente para cada corpo de

prova e expresso pela média de suas repetições. Para este ensaio foi utilizado prensa EMIC modelo DL 20000 com célula de carga de 20 kN. Foram realizadas análises de variância dos dados (ANOVA) com os modelos de regressão testados pelo teste F e as médias comparadas pelo teste de Tukey. Para as análises estatísticas foi utilizado o software Past - Paleontological Statistics (HAMMER, HARPER e RYAN, 2001).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização dos materiais

4.1.1 Massa específica real

Por meio das medidas de volume, obtidas pelo frasco *Le Chatelier* e massa do resíduo, foi obtida uma massa específica média de 2,70g/cm³ para o RCR. O que corrobora com o valor de densidade de 2,71g/cm³ encontrado por Villaquirán-Caicedo *et al.* (2021).

4.1.2 Fluorescência de raios- X (FRX)

Por meio do ensaio FRX foi possível a obtenção da composição química do RCR, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição química do RCR.

Composição	Peso (%)
SiO ₂	42,2
CaO	35,3
MgO	7,7
Al ₂ O ₃	6,1
Fe ₂ O ₃	5,4
Outros*	3,2

*Elementos com teores abaixo de 1%

O RCR é composto principalmente de óxidos de silício (SiO₂), óxidos de cálcio (CaO) e óxidos de magnésio (MgO). Observa-se que o resíduo em estudo possui os dois óxidos que podem estar envolvidos no processo de ativação alcalina: 42,2% de óxido de silício (SiO₂) e uma baixa quantidade de óxido de alumínio (Al₂O₃): 6,09 %. O óxido de cálcio compõe 31,3% do RCR. Vários estudos (XU; VAN DEVENTER, 2000 e YIP *et al.*, 2005) descobriram que o cálcio tem um efeito positivo na resistência à

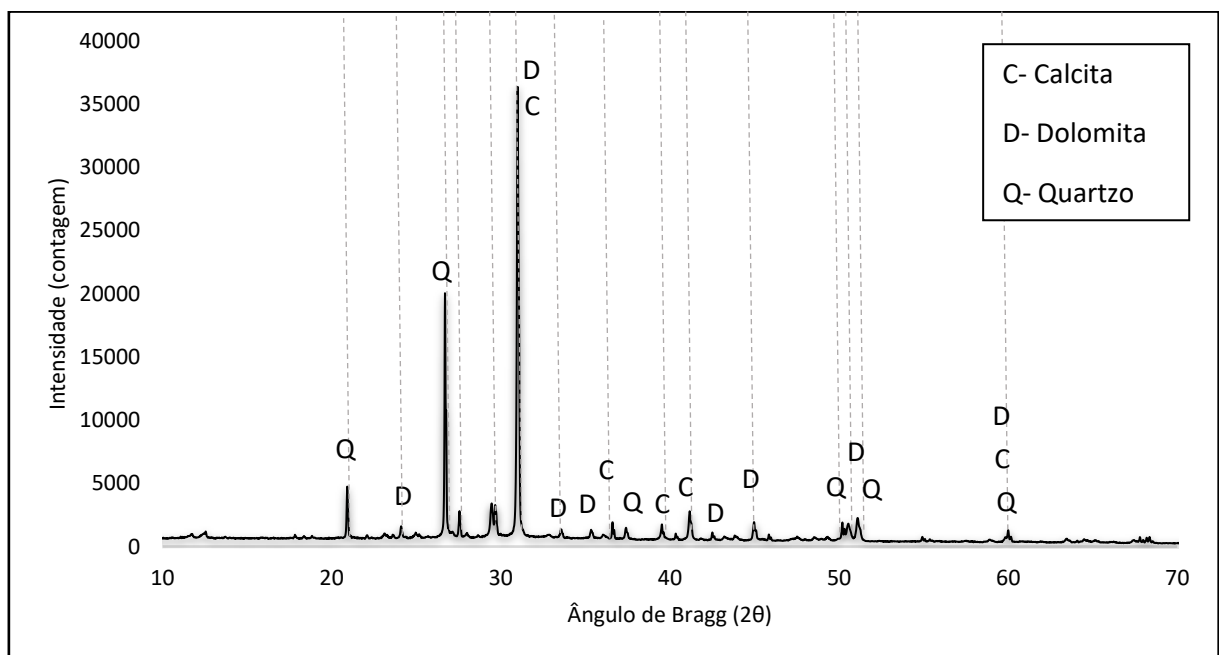
compressão de ligantes geopoliméricos. Quando o teor de CaO é alto, a porosidade microestrutural diminui e a formação resultante da estrutura amorfa aumenta a resistência mecânica final (VAN JAARSVELD *et al.*, 1998, XU; VAN DEVENTER, 2002).

Os resultados do ensaio de FRX apresentam os valores dos óxidos sem considerar a estrutura de formação dos compostos: cristalinos ou amorfos. O óxido de silício existe sob diversas formas cristalinas e amorfas (FLÖRKE, 2000). Exemplos de alguns dos minerais silicatados mais comuns são os quartzos, feldspatos, micas e os piroxênios.

4.1.3 Difração de raios-X (DRX)

Na Figura 12 é apresentado o difratograma do RCR.

Figura 12 - Difratograma do RCR.

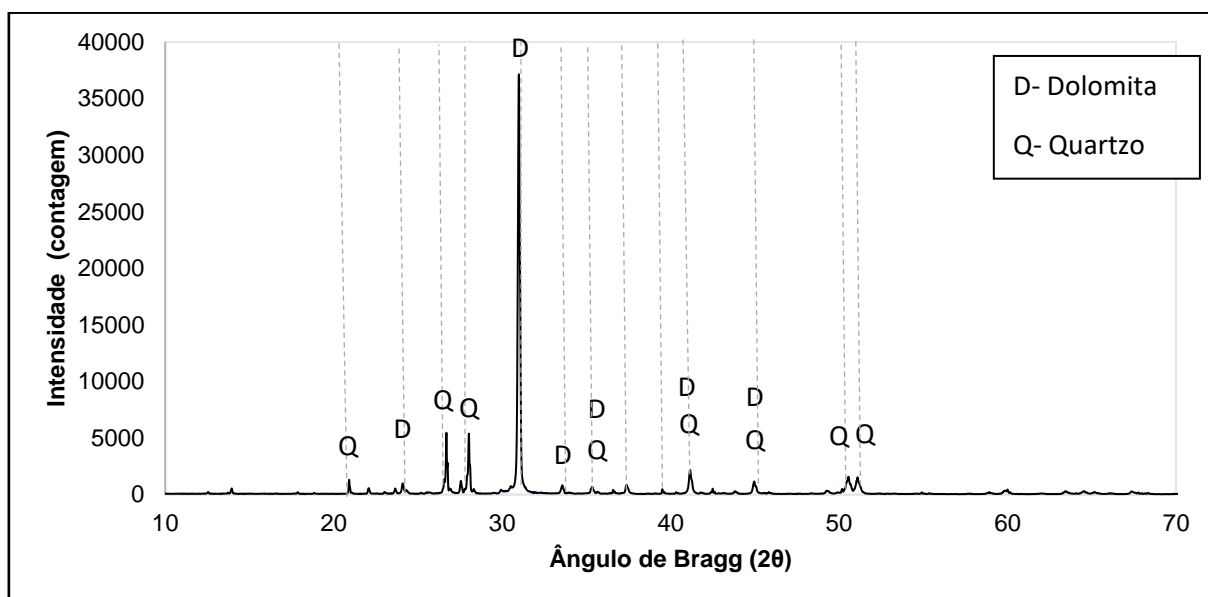


Observa-se por este difratograma a estrutura cristalina do RCR. Segundo Madsen *et al.* (2011) a composição amorfa (ou não cristalina) são caracterizados por terem ordem de curto alcance e apresentam alta capacidade de sofrer reações. Essa estrutura amorfa é essencial para a reação de ativação alcalina, pois quanto mais amorfa a estrutura do precursor mais extensa é a reação (FERNÁNDEZ JIMENEZ *et al.*, 2005). A análise mineralógica do RCR mostra que dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), COD 36-0426,

calcita (CaCO_3), COD 05-0586 e quartzo (SiO_2), COD 46-1045, são os principais minerais presentes no RCR. Yip *et al.* (2008) relatam que a presença de partículas de dolomita e quartzo, atuam como um enchimento físico/ microagregado, auxiliando na resistência à compressão. Os agregados têm um efeito restritivo na retração. Mastali (2018) relata que os agregados podem atuar nas pastas álcali-ativadas diminuindo a taxa de retração. Sugere-se que a presença da calcita no RCR é possivelmente proveniente do filler calcário que compõe o cimento anidro e/ ou da carbonatação da portlandta ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

Na Figura 13, é apresentado o DRX da brita proveniente do RC, sendo identificado as seguintes fases cristalinas: dolomita, COD 36-0426 e quartzo, COD 46-1045. O que nos leva a concluir que a dolomita e o quartzo presentes no RCR são em partes provenientes da brita.

Figura 13 - Difratoograma da brita.



4.1.4 Granulometria por Difração à laser

A Figura 14 apresenta a distribuição granulométrica do RCR sem moagem (RCR-0), RCR com 1 hora de moagem (RCR-1), RCR com 2 horas de moagem (RCR-2) e RCR com 3 horas de moagem (RCR-3). Na Tabela 3 é mostrado D50, D90 e diâmetros mínimo e máximo das partículas de RCR.

Figura 14 - Distribuição granulométrica do RCR-0, RCR-1, RCR-2 e RCR-3.

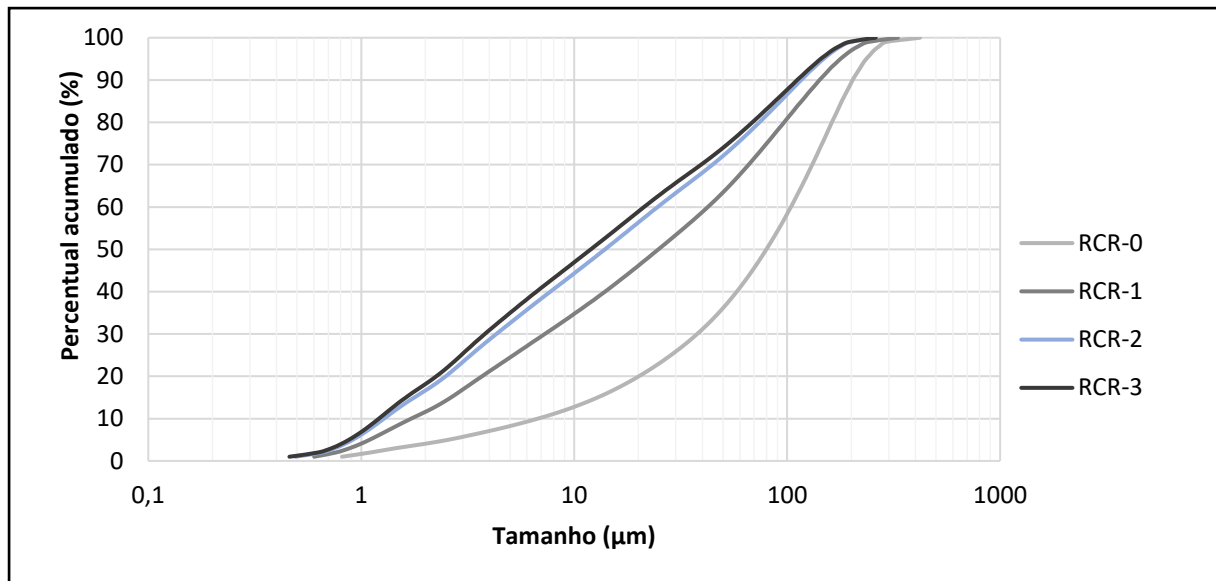


Tabela 3 - Distribuição granulométrica do RCR.

Amostra	Diâmetro		D10 (µm)		
	mínimo (µm)	máximo (µm)		D50 (µm)	D90(µm)
RCR-0	0,813	420,6	6,75	79,88	202,8
RCR-1	0,601	330,9	1,72	24,87	141,8
RCR-2	0,491	260,3	1,28	13,95	116,3
RCR-3	0,460	260,3	1,21	11,97	111,3

Ao comparar a o tamanho das partículas com o tempo de moagem de 2 horas e 3 horas, por meio da Tabela 3 e da Figura 14, observa-se que não houve redução significativa no tamanho das partículas. Logo, para a confecção das pastas, optou-se então por moer o resíduo por 2 horas onde obteve-se um tamanho mínimo de partículas de 0,491 µm e máximo de 260,3 µm. Conforme apresentado na Tabela 3, para o tempo de 2h de moagem 90% das partículas apresentam diâmetro menor que 116,3 µm (D90) e 50% das partículas apresentam diâmetros inferiores a 13,95 µm (D50), corroborando com Komnitsas *et al.* (2015) ao relatar a necessidade do tamanho das partículas à base de RCD ser inferior a 150 µm e D50 inferior a 15 µm. Na Tabela 4 são apresentados D10, D30, D60 assim como os valores de Cu e Cc para o RCR-2.

Tabela 4 - D10, D30, D60, Cu e Cc do RCR-2.

Resíduo	D10 (μm)	D30 (μm)	D60 (μm)	Cu	Cc
RCR-2	1,28	4,31	24,66	19,28	0,59

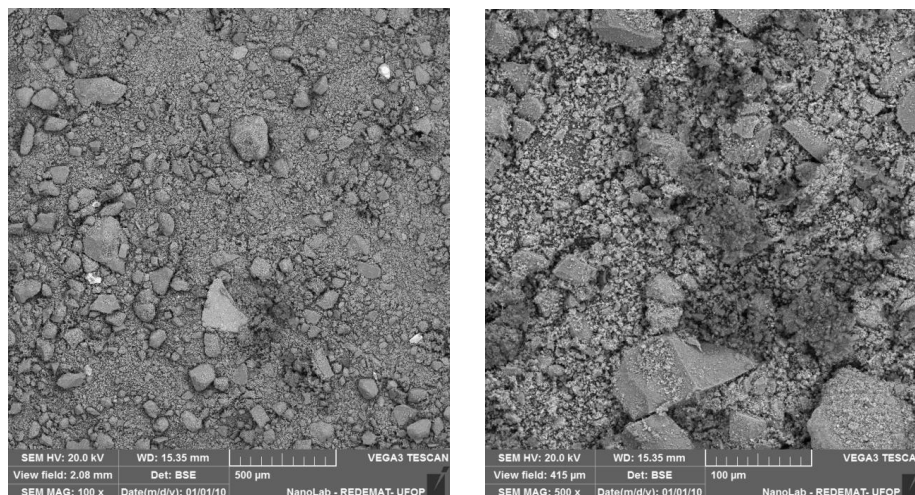
O Cc está relacionado com a forma da curva granulométrica entre D60 e D10: se a curva apresentar uma equilibrada representação dos diâmetros intermédios àqueles, o valor Cc estará compreendido entre valores da ordem de 1 a 3 e o material será considerado bem graduado (MARTINS, 2020). Logo o Cc de 0,59 sugere descontinuidade na curva granulométrica, em decorrência da ausência de grãos em determinado diâmetro.

O Cu representa a variedade de dimensões que as partículas apresentam sendo que, quanto maior este coeficiente menor é a inclinação da curva granulométrica, e melhor graduado é o material. A partir do valor do Cu de 19,28, constata-se que o RCR-2 possui granulometria não uniforme.

4.1.5 Microscopia eletrônica de varredura elétrons secundários energia dispersiva (MEV/SE)

As micrografias do RC com aumento de 100x e 500x são apresentadas na Figura 15.

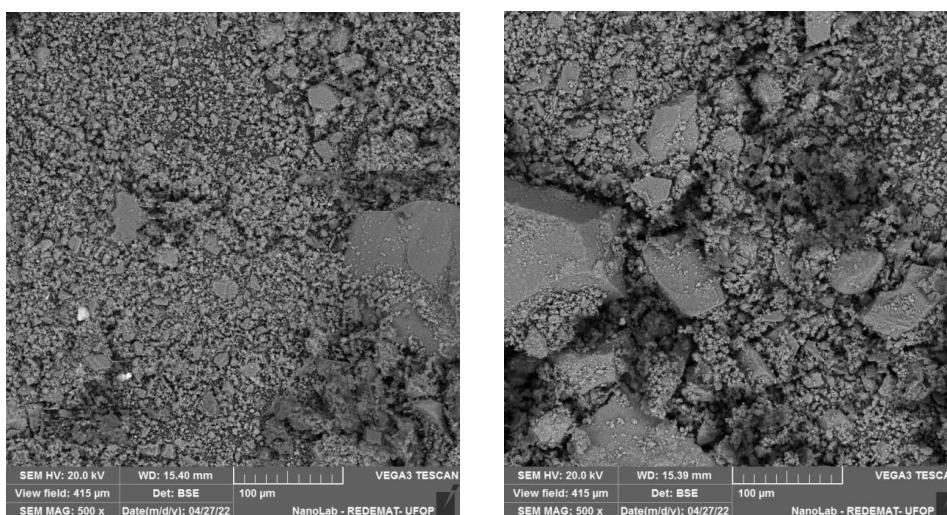
Figura 15 - Micrografia do resíduo de concreto, com aumento de 100x e 500x respectivamente.



A partir das imagens obtidas, foi possível observar que os grãos do RC se apresentam em tamanhos e formas variadas, sendo que possivelmente os grãos moídos maiores representam a fração de agregado e os grãos menores a pasta de cimento.

Na Figura 16 são apresentadas as micrografias RCR após passar pelo processo de moagem com 2% de NaOH e 8% de NaOH em pó. Observa-se um material mais fino e homogêneo do que o RC apresentado na Figura 15, sendo possível notar a presença de grãos maiores possivelmente provenientes da brita dolomítica ou areia.

Figura 16 - Micrografias do Resíduo, 500x (a) adição de 2% de NaOH, (b) adição de 8% de NaOH



(a)

(b)

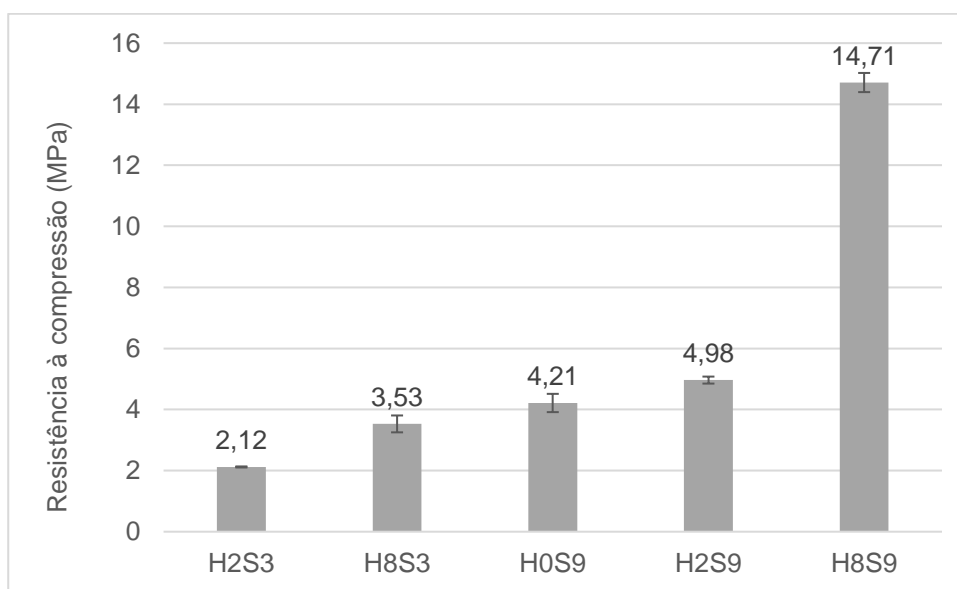
4.2 Caracterização das pastas álcali-ativadas

4.2.1 Resistência à compressão

Na Figura 17, é apresentado a resistência à compressão das pastas álcali-ativadas aos 7 dias de cura. A resistência à compressão variou de 2,12MPa a 14,71 MPa. Nota-se que o maior valor de resistência à compressão foi obtido para a pasta que contém maior porcentagem de hidróxido de sódio e silicato de sódio. O que corrobora com Palomo *et al.* (1999) ao relatar que o desenvolvimento da resistência mecânica foi mais rápido nas amostras ativadas com soluções alcalinas combinando hidróxidos (K ou Na) com silicatos solúveis (K ou H). Um ambiente altamente alcalino favorece a

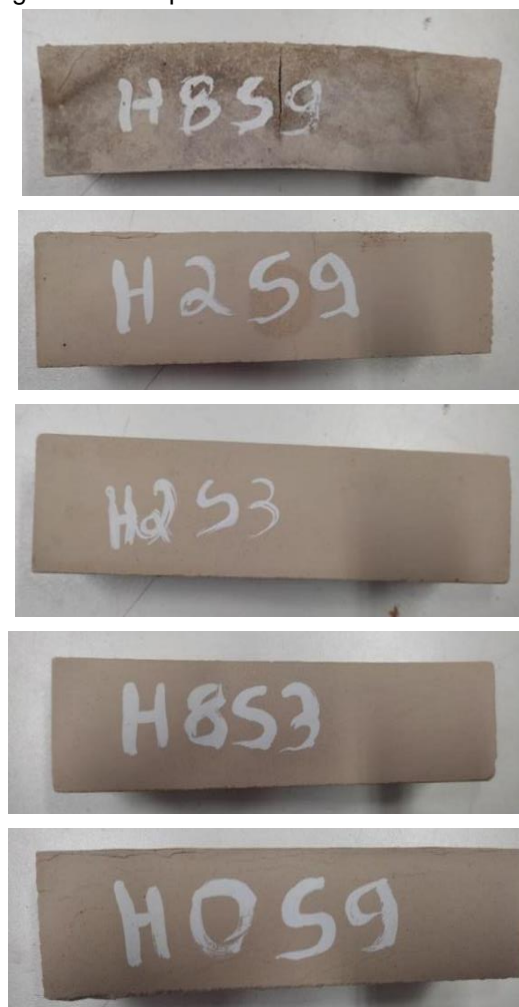
dissolução de compostos de aluminossilicato quebrando Si–O–Si e Al–O–Al que de acordo com o modelo polimérico proposto por Davidovits (1982) formam uma estrutura polimérica de aluminossilicato.

Figura 17 - Resistência à compressão aos 7 dias de cura.



Comparando-se as pastas compostas com mesmo teor de hidróxido de sódio (H2S3 x H2S9 e H8S3 x H8S9) e as pastas com mesmo teor de silicato de sódio (H2S9 x H8S9 e H2S3 x H8S3), nota-se um ganho de resistência à medida que o teor de ativador é acrescido. Ao comparar as pastas com 9% de silicato (H0S9, H2S9 e H8S9), que apresentam respectivamente resistência à compressão de 4,21 MPa, 4,98 MPa e 14,71 MPa, nota-se um aumento na resistência à compressão nas pastas compostas que utilizaram além do silicato de sódio também o hidróxido de sódio. Com o aumento na concentração de hidróxido de sódio, a dissolução das matérias primas é favorecida o que conseqüentemente potencializa a reação álcali-ativada obtendo assim valores mais elevados de resistência à compressão. A solução de hidróxido de sódio é importante para a dissolução dos íons Si e Al dos precursores, enquanto a solução de silicato de sódio contém espécies de silicato solúveis e, portanto, é utilizada para promover o processo de condensação na reação álcali-ativada (PANIAS *et al.*, 2007). Na Figura 18 são apresentados os Corpos de Prova unitários de cada amostra que foram utilizados para o ensaio de resistência à compressão.

Figura 18 - Corpos de Prova aos 7 dias de cura

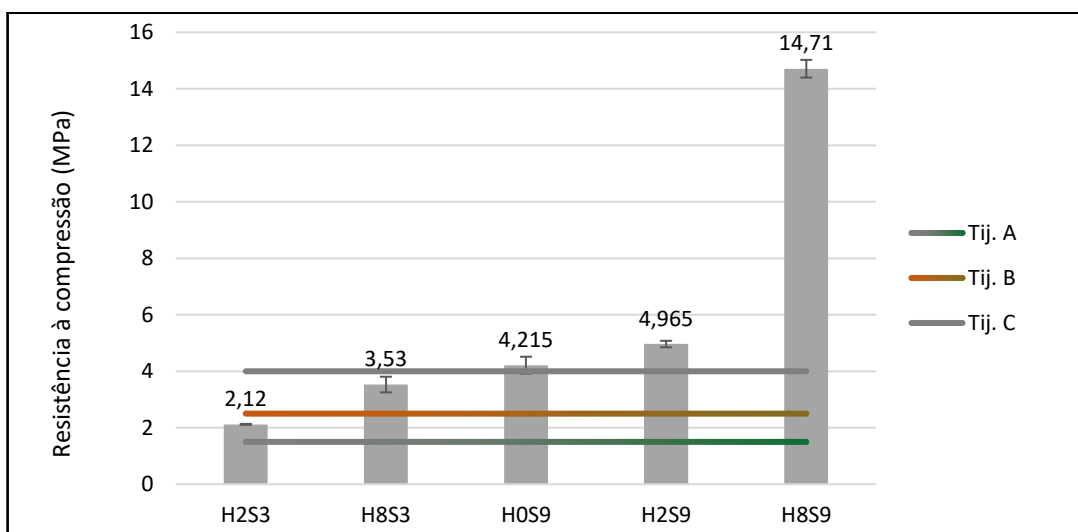


Os corpos de prova referentes à amostra H8S9 apresentaram fissuras, possivelmente em decorrência da retração. Me; Ye (2015) ao utilizar cinzas volante na obtenção de MAA observou que a retração das pastas é fortemente afetada pelo teor de sílica e sódio: amostras com maior teor de sódio e sílica exibiram uma maior retração autógena e por secagem. Os autores relatam que a retração autógena não é causada pelo conhecido processo de autodessecação que ocorre nas pastas de CPC, está mais relacionada à reorganização e polimerização contínua da estrutura do gel de aluminossilicato (MA; YE, 2015).

A resistência à compressão é condição importante a ser analisada considerando as aplicações práticas dos MAA, na Figura 19 é apresentado a resistência à compressão das pastas produzidas e a resistência à compressão mínima exigida para tijolos de cerâmica maciço das categorias A, B e C segundo a NBR 7170 (1983). Observa-se que todos os traços atenderiam a resistência mínima exigida para tijolos categoria A

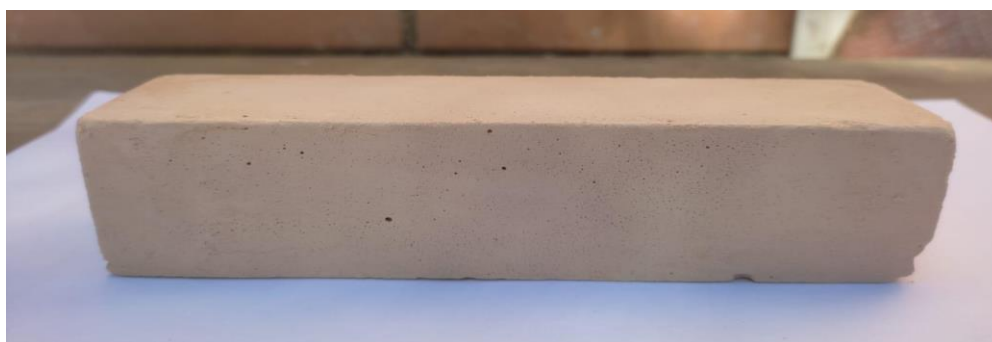
(>1,5MPa). Para tijolos categoria B (>2,5MPa) somente a amostra H2S3 não atendeu ao requisito mínimo de resistência à compressão. Para a categoria C (>4MPa) todas as amostras com teor de 9% de silicato atenderiam ao requisito mínimo de resistência, já as amostras com teor de 3% de silicato não se enquadram neste requisito.

Figura 19 - Resistência à compressão das pastas álcali-ativadas x resistência à compressão mínima para tijolos categoria A, B e C (7170/1983).



Foi possível a obtenção de pastas com boas características estéticas, conforme apresentado na Figura 20, tornando possível a utilização do material de forma aparente sem que haja nenhum preparo da superfície externa.

Figura 20 - Corpo de Prova H2S3.



Nas análises de variância para resistência à compressão, o valor-P menor que 0,05 e o F maior que o F crítico, rejeitam a hipótese nula e verificam diferença estaticamente significativa entre um ou mais grupos conforme é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Análise estatística ANOVA.

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	435,53	4	108,88	242,90	1,94E-13	3,06
Dentro dos grupos	6,72	15	0,45			
Total	442,25	19				

A fim de demonstrar quais grupos são estatisticamente diferentes entre si, são apresentados os resultados do método de Tukey (Tabela 6) para a resistência à compressão, onde as células sombreadas indicam diferença estatisticamente significativa entre os grupos.

Tabela 6 - Método de Tukey.

Amostra	H2S3	H8S3	H0S9	H2S9	H8S9
H2S3		5,34E-02	3,12E-03	1,85E-04	0
H8S3	4,32		0,59	5,89E-02	1,02E-12
H0S9	6,41	2,091		0,5655	3,96E-12
H2S9	8,56	4,24	2,151		1,17E-11
H8S9	38,95	34,63	32,54	30,39	

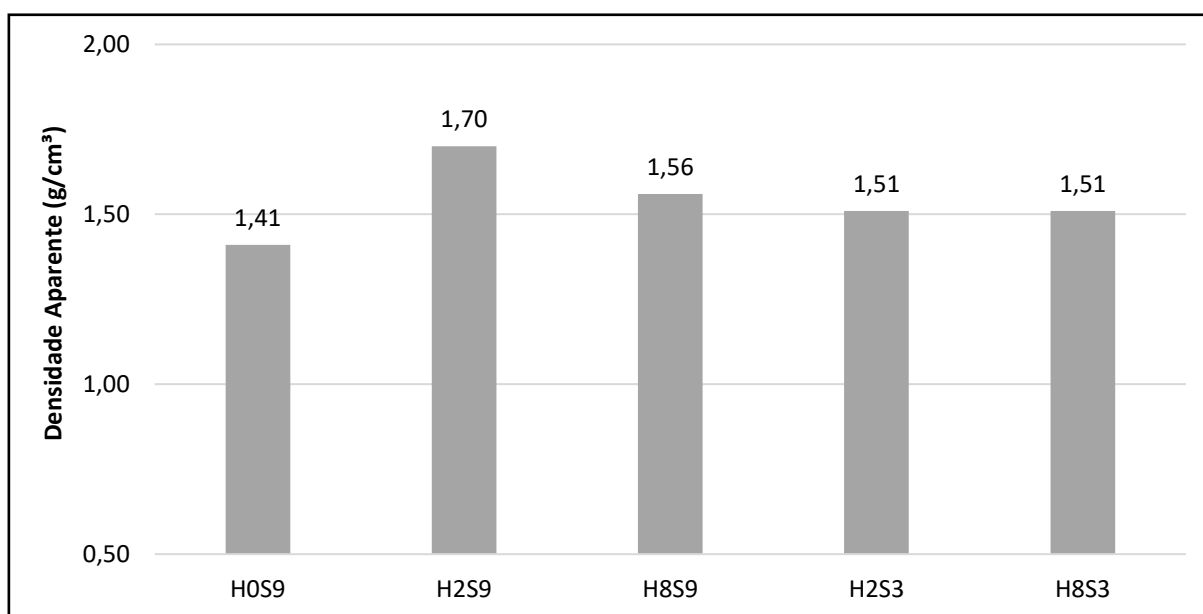
Assim, de acordo com o método de Tukey todas as amostras são estatisticamente diferentes da amostra H8S9. A amostra H2S3 além de ser diferente da H8S9 difere também das amostras H0S9 e H2S9. Para amostras com teor de 2% de NaOH a variação no teor de silicato de sódio (9% ou 3%) resultou em resistências à

compressão estatisticamente diferentes. Assim como, quando se manteve fixo o teor de silicato de sódio em 9% (H0S9, H2S9 e H8S9), a adição de 0% ou 2% de NaOH gerou resistências estatisticamente iguais e somente para adição de 8% de NaOH a resistência à compressão foi estatisticamente diferente. Conclui-se que a variação no teor de silicato de sódio parece interferir mais na resistência à compressão do que a variação no teor de NaOH.

4.2.2 Densidade Aparente

Na Figura 21 é apresentado o resultado de densidade aparente das pastas aos 7 dias de cura.

Figura 21 - Densidade Aparente das pastas.

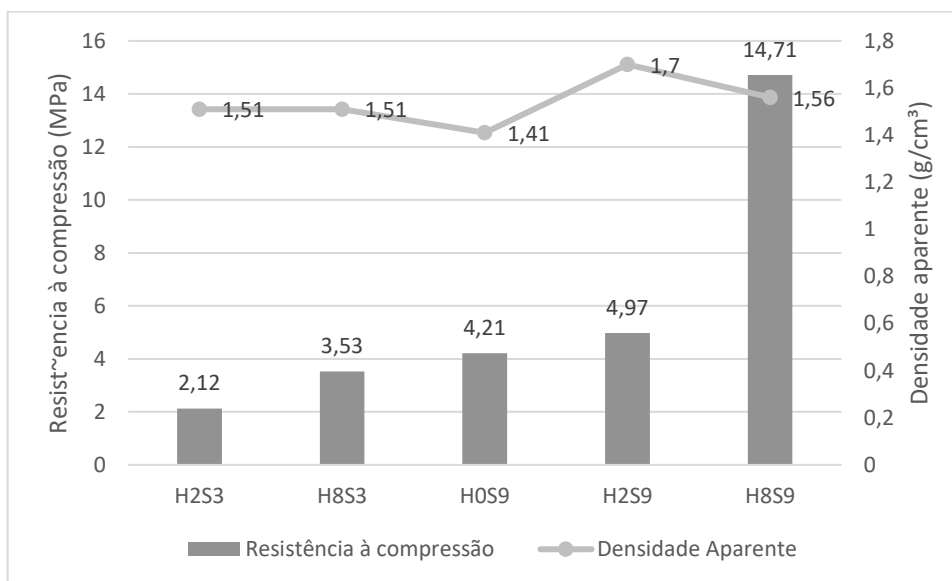


Os valores encontrados para densidade aparente variaram de 1,41 g/cm³ a 1,70 g/cm³, sendo que as composições com maior valor para densidade aparente foram as amostras compostas e com adição de maior valor de silicato de sódio, H2S9 (1,70g/cm³) seguida da amostra H8S9 (1,56g/cm³). O menor valor de densidade encontrado foi para a amostra H0S9, possivelmente ativadores compostos possuem maior capacidade de dissolver partículas, favorecendo a formação de produtos de hidratação e conseqüentemente tornando a matriz mais densa. O aumento na

densidade dos geopolímeros observado com o aumento da razão Si/Al decorre da maior proporção de componentes sólidos devido à adição de silício à solução ativadora (DUXSON *et al.*, 2005).

Na Figura 22 é comparado os resultados de resistência à compressão com a densidade aparente das pastas, não sendo possível observar uma correlação.

Figura 22 - Resistência à compressão x densidade aparente



4.2.3 Relação $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$

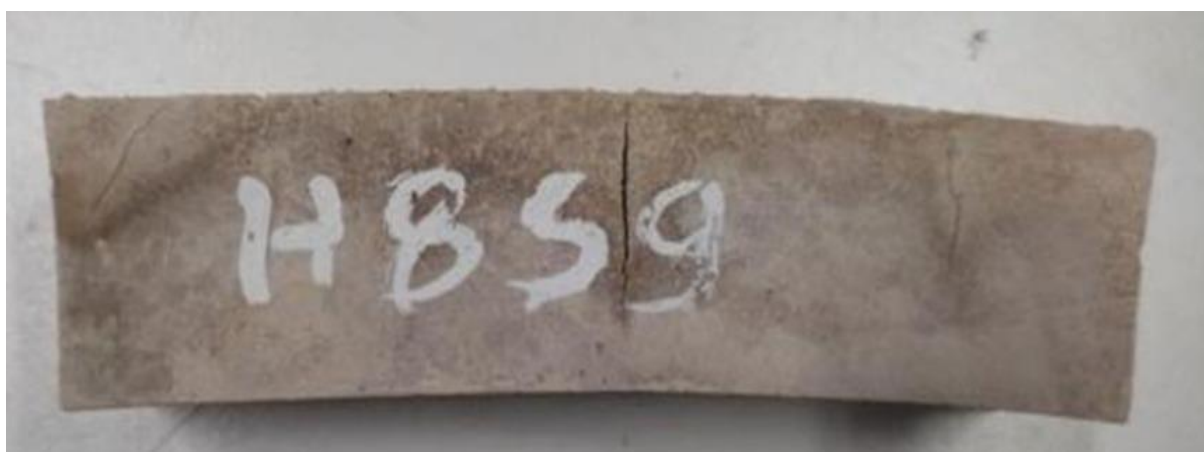
Na Tabela 7 é apresentado a relação $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ das pastas produzidas.

Tabela 5 - Relação $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ das pastas.

Amostra	Relação $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$
H2S3	0,54
H8S3	1,80
H0S9	0,37
H2S9	0,78
H8S9	2,04

Pimraksa *et al.* (2011) observaram que ao aumentar a razão $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$, as fases de silicato foram mais suscetíveis à dissolução. Já de acordo com Zhang *et al.* (2013), quando $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 < 1$, o aumento da concentração de hidróxido de sódio é eficaz em aumentar a extensão da reação, porém, valores superiores a 1 indicam excesso de Na^+ , que não estabelecerá conexões e ficará livre na estrutura o que torna o material propenso a formar eflorescência. Observa-se que as amostras H8S9 e H8S3 apresentaram relações $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ superiores a 1. A amostra H8S9 apresentou a maior relação $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$, valor de 2,04%, o que explicaria a ocorrência de eflorescência em sua superfície (Figura 23).

Figura 23 - Corpo de prova H8S9 apresentando eflorescência.

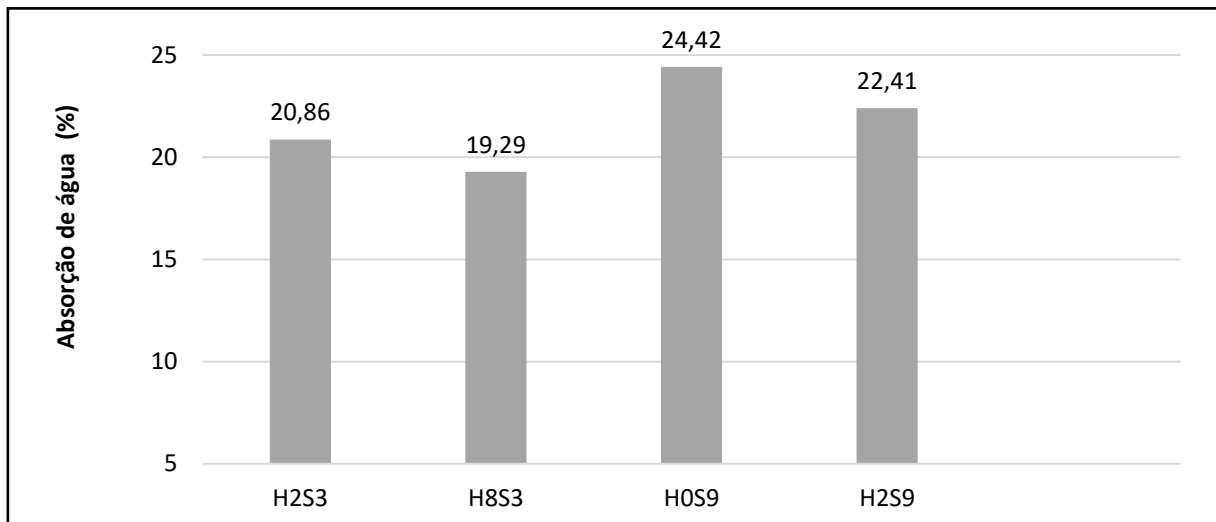


Já a amostra H8S3 apesar de apresentar também relação $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ superior a 1,0, não apresentou eflorescência em sua superfície, o que não descarta a ocorrência em sua estrutura interna ou em idades de cura superiores.

4.2.4 Índice de absorção de água

Na Figura 24, são apresentados os índices de absorção das pastas obtidas, com exceção da pasta H8S9 que se desintegrou em água. Observa-se que os índices de absorção de água variaram de 19,29% a 24,42%.

Figura 24 - Resultado do ensaio de absorção de água.



A amostra H0S9 apresentou o maior índice de absorção (24,42%) o que correlaciona com o menor valor de densidade aparente encontrado para a referida amostra. As propriedades de retenção de água das amostras dependem do tamanho de seus poros, tamanhos maiores proporcionam maior absorção (OKADA *et al.*, 2009). A pasta H8S3, com ativação alcalina composta apresentou o menor índice de absorção e conforme pode ser observado na Figura 25 não possui em sua superfície poros claramente observáveis como nos demais traços. Sugere-se que estes macroporos são provavelmente decorrentes da incorporação de ar durante o processo de cura.

Na Figura 26, são apresentados os fragmentos dos corpos de prova após 24h de imersão em água. A pasta H2S3 apresentou pequena quantidade de pulverulência no fundo do recipiente. Observa-se que a pasta que mais se desintegrou foi aquela com maior teor de NaOH e Na₂SiO₃ (H8S9). Acredita-se que excesso de ativador não reagido atua como local de defeito e tem efeito negativo nas propriedades do MAA (KOMNITSAS *et al.*, 2007). As demais amostras mantiveram-se íntegras.

A pasta H8S9 foi a única que apresentou eflorescência conforme apresentado na Figura 23, o que confirma a composição de álcalis não reagidos na mistura. Ativadores em excesso ficam livres nos poros, e ao serem imergidos em água são lixiviados, enfraquecendo a estrutura. Segundo Mierzwiński (2018), Kang *et al.* (2017) e Nguyen (2018) a ocorrência de eflorescência pode prejudicar a estética da superfície do material e deteriorar as propriedades físicas dos geopolímeros. Em sistemas ricos em

cálcio, a reação de carbonatação ocorre entre CO_2 dissolvido e álcalis livres e cátions alcalino-terrosos, resultando em danos químicos à própria estrutura do ligante através da descalcificação (SHI *et al.*, 2011).

Figura 25 - Corpos de prova aos 7 dias de cura (a) H0S9 (b) H2S9 (c) H8S9 (d) H2S3 (e) H8S3.

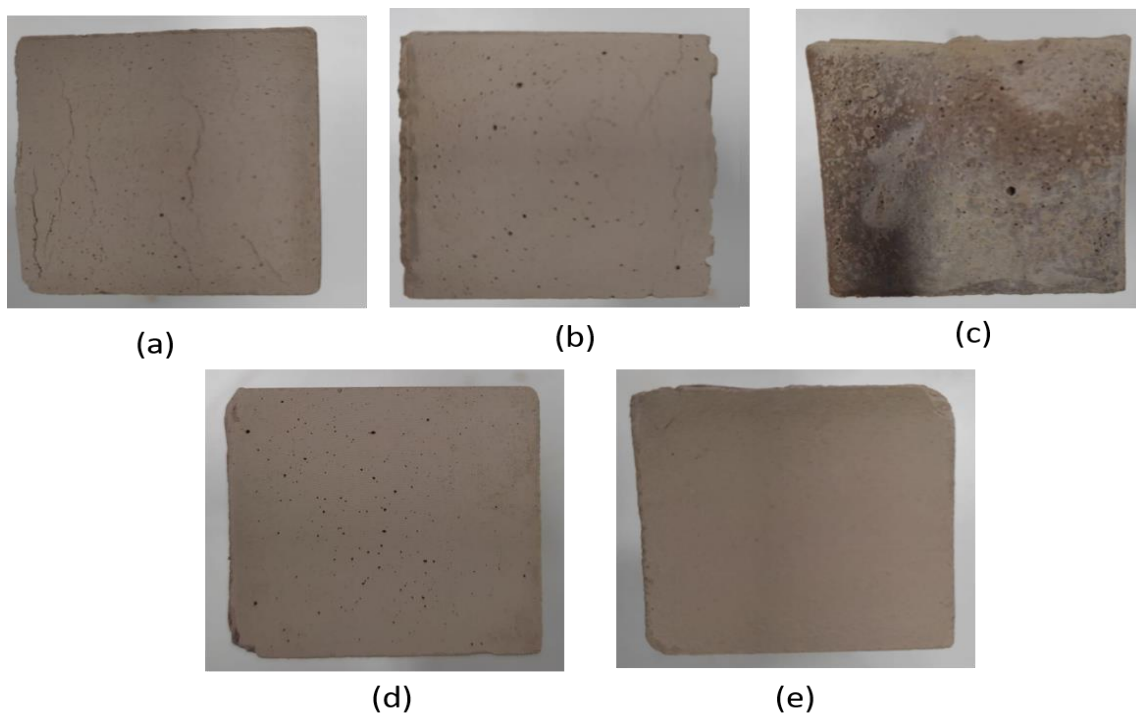
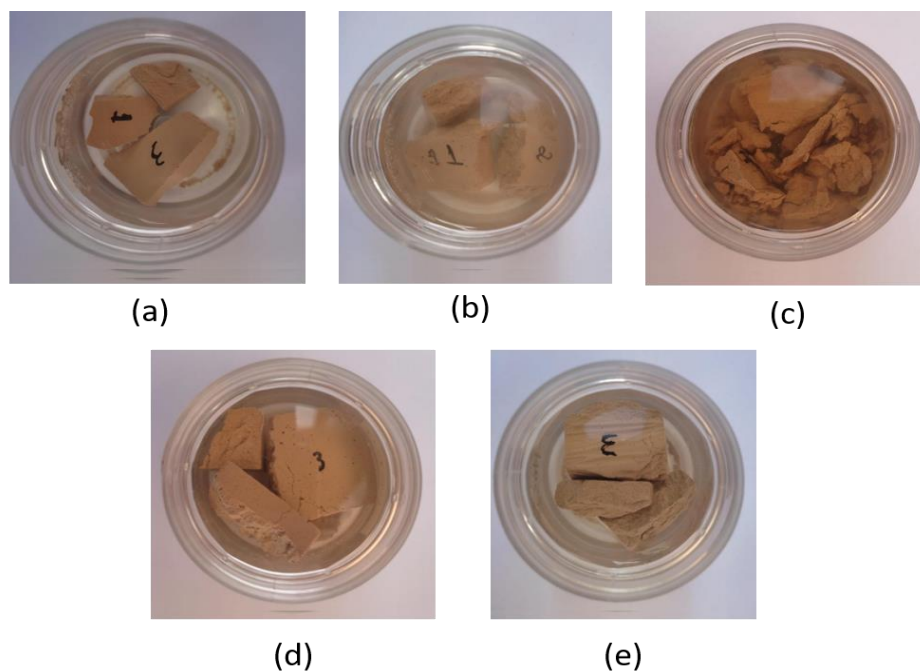
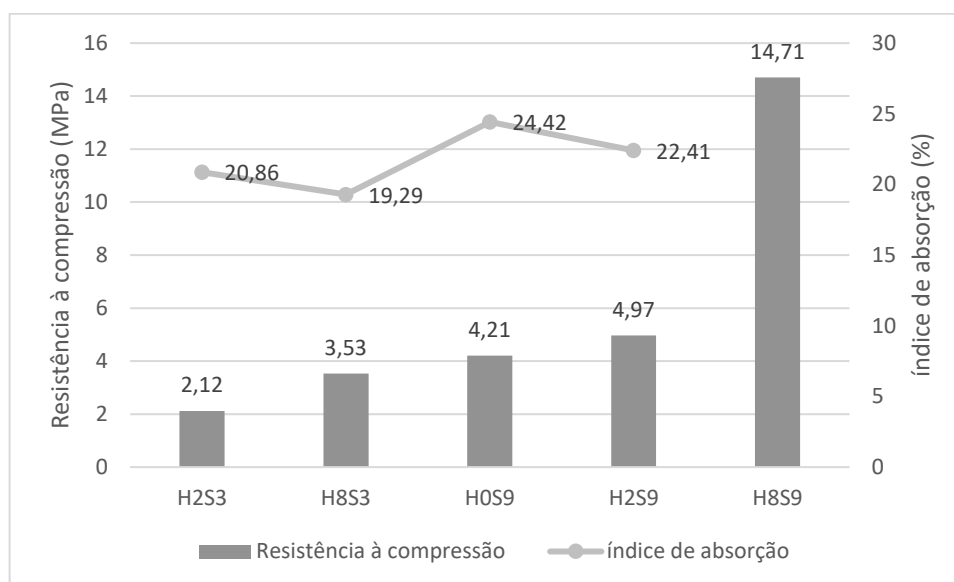


Figura 26 - Ensaio de absorção de água (a) H2S3 (b) H8S3 (c) H8S9 (d) H2S9 (e) H0S9.



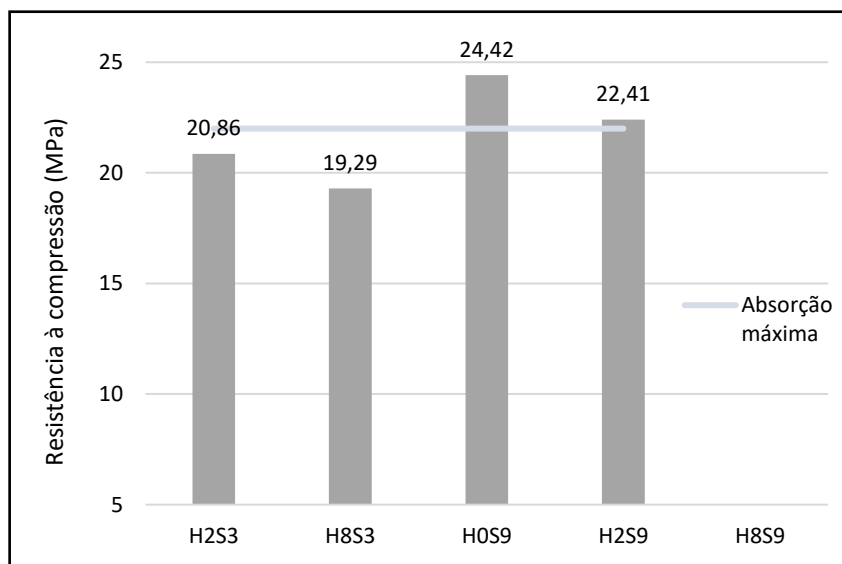
Na Figura 27 são apresentados os resultados da resistência à compressão em comparação com os índices de absorção das pastas, não sendo possível estabelecer uma correlação entre estes parâmetros.

Figura 27 - Resistência à compressão x Índice de absorção



O índice de absorção é um importante parâmetro a ser estudado pois tem relação com a durabilidade do material. Confrontando-se os resultados de índice de absorção de água com os valores máximos estabelecidos pela normativa NBR 15270-3 (2005) (Figura 28) para tijolos de alvenaria e estrutural, observa-se que os traços com teor de 9% de silicato de sódio (H0S9 e H2S9) se encontram acima do valor máximo estabelecido, que é de 22%. Para os demais traços os valores se encontram dentro da faixa estabelecida, o que mostra a viabilidade com relação a absorção de água deste MAA para utilização como tijolos.

Figura 28 - Índice de absorção de água das amostras x índice de absorção de água máximo estabelecido pela NBR 15270-3 (2005).



4.2.5 Difração de Raios-X (DRX)

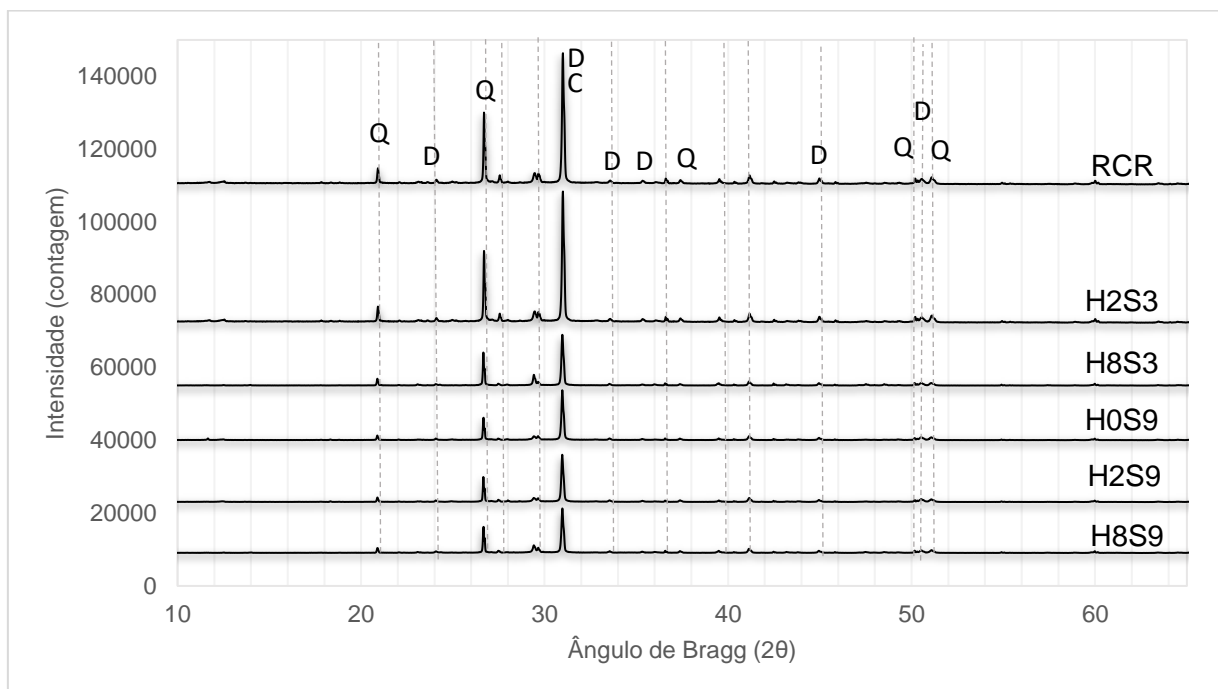
Na Figura 29 é apresentado o resultado da análise mineralógica do RCR e das pastas aos 7 dias de cura. Para Fernández-Jiménez *et al.* (2005) quando a fonte de aluminossilicato sofre ativação alcalina, o principal componente resultante da reação é um gel de aluminossilicato com baixa ordem de estrutura cristalina.

Quando comparados os difratogramas do material de origem com os difratogramas dos geopolímeros já endurecidos, é possível observar que as fases cristalinas permanecem, pois não houve dissolução total dos cristais, no entanto todos os picos aparecem em menor intensidade. Lecomte *et al.* (2003) relatam que embora o quartzo permaneça em uma fase inerte, a alta molaridade poderia reduzir sua intensidade devido ao efeito de diluição. Vásquez *et al.* (2016) relatam que além da diluição, pode ocorrer uma dissolução parcial de certas fases cristalinas.

O padrão obtido mostra um material com as mesmas fases cristalinas que estavam originalmente presente no RCR. Isso indica que as mudanças responsáveis pelas

diferenças na resistência à compressão se originam e ocorreram principalmente dentro da parte amorfa da estrutura.

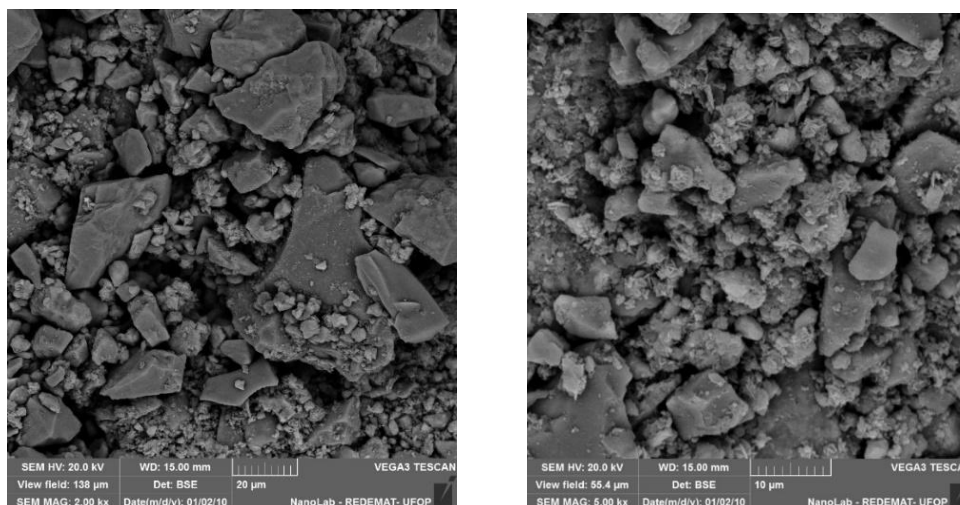
Figura 29 - Difratoograma do RCR e das pastas com 7 dias de cura.



4.2.6 Microscopia eletrônica de varredura associada à espectroscopia de energia dispersiva (MEV/EDS)

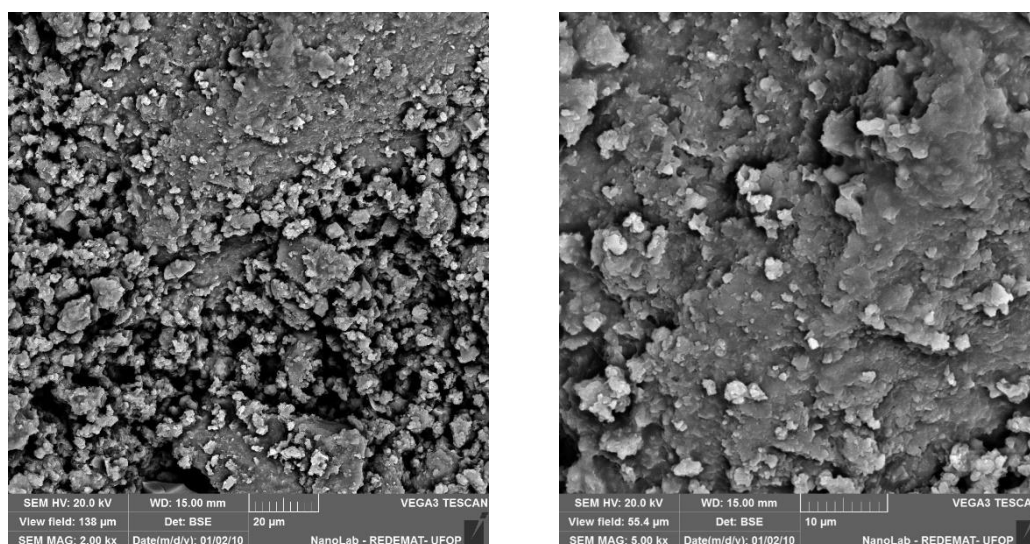
Na Figura 30, é apresentado a micrografia da amostra H2S3 capturada com aumento de 2000x e 5000x. Observa-se que o material possui natureza porosa com a presença de partículas em diversos tamanhos e formatos além de partículas não reagidas que se entrelaçam em pequenos aglomerados reagidos. A amostra H2S3 apresentou o menor resultado de resistência à compressão quando comparado às outras amostras. Yunsheng *et al.* (2007) relatam que partículas fracas que não reagiram podem atuar como defeitos pontuais, reduzindo a resistência à compressão de MAA. Ativador alcalino insuficiente é o principal motivo que leva partículas a não reagirem, uma vez que há o retardamento na dissolução inicial dos compostos (TROCHEZ *et al.*, 2015).

Figura 30 - Micrografia da amostra H2S3, ampliação de 2000x e 5000x.



Na Figura 31, é apresentado a micrografia da amostra H8S3, capturada com aumento de 2000x e 5000x, a pasta caracteriza-se por possuir uma matriz mais densa e homogênea o que vai de encontro ao ensaio de absorção onde a referida amostra apresentou o menor índice de absorção quando comparado à amostra H2S3.

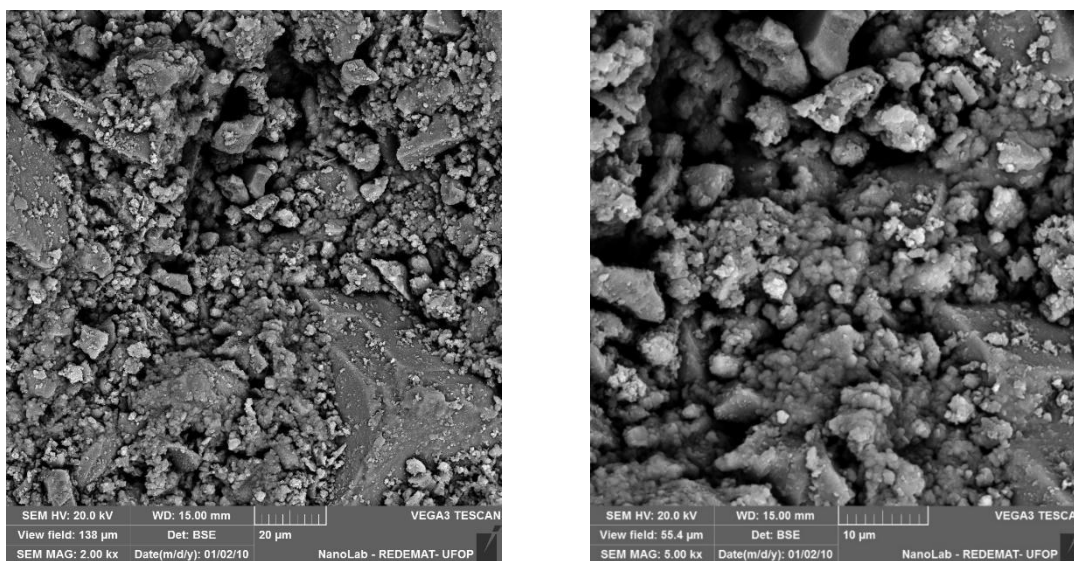
Figura 31 - Micrografia da amostra H8S3,2000x e 5000x.



Na Figura 32, é apresentado a micrografia da amostra H0S9 capturada com aumento de 2000x e 5000x. A pasta caracteriza-se por possuir estrutura porosa com partículas

dispersas e não reagidas como consequência da utilização de somente um ativador alcalino, o silicato de sódio. Ativadores simples resultam em um processo menos reativo e aparentemente incompleto, quando comparados com os ativadores compostos. O hidróxido alcalino tem a função de dissolver as matérias-primas, enquanto, a solução de silicato alcalino atua como ligante (CHENG; CHIU, 2003).

Figura 32 - Micrografia da amostra H0S9, 2000x e 5000x.



Associado à análise de MEV, foi utilizada a análise química pontual por EDS da energia dos elétrons retroespalhados (BSE) das amostras H2S9 e H8S9, com ampliação de 2000x.

Na Figura 33 é apresentado a análise química pontual da amostra H2S9 capturada com aumento de 2000x, onde a Figura 33(a) apresenta a demarcação das áreas selecionadas para análise química pontual e a Figura 33 (b) exhibe o mapeamento da distribuição de elementos químicos na amostra. Os resultados semiquantitativos são exibidos na Tabela 7. Sugere-se que o ponto 1 seja quartzo não reagido já que a análise pontual apresentou constituição majoritária de silício. A presença de uma reação incompleta se confirma pelo baixo teor de silício e sódio nas interfaces da matriz, representado pelo ponto 2 e se apresentam na micrografia em tom esverdeado, evidenciando a presença de cálcio. O ponto 3 apresenta relação Ca/Si de 1,3 e Si/Al 3,2 sugerindo-se que são géis C-A-S-H.

Figura 33 - Micrografia da amostra H2S9, 2000x.

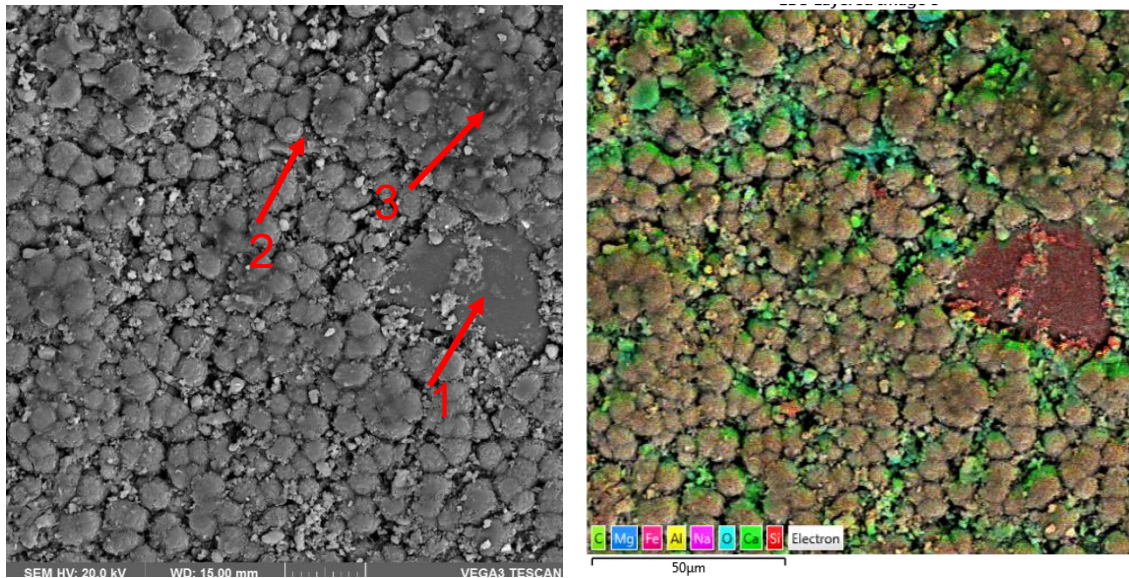


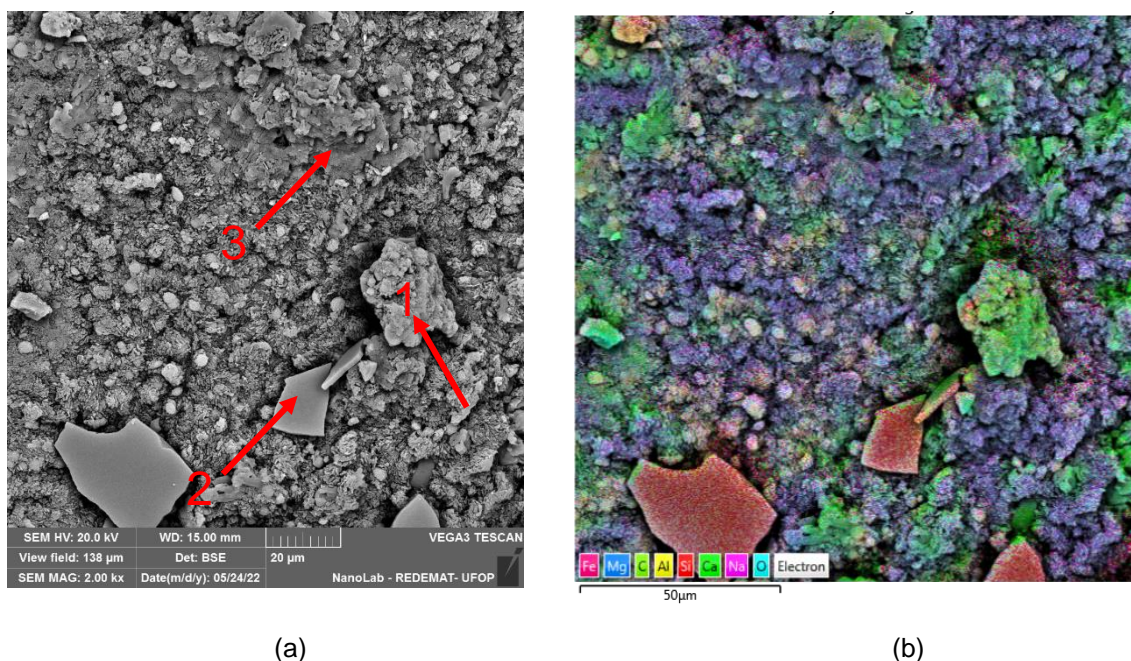
Tabela 7 - Análise química semiquantitativa da amostra H2S9.

Elemento (%)	Pontos		
	1	2	3
Si	38,7	3,0	17,0
Al	-	1,6	14,2
Ca	0,4	19,0	1,2
Mn	-	1,3	-
Mg	-	9,6	-
Fe	0,2	2,4	0,4
Na	0,7	1,9	4,1
C	7,9	9,5	18,4
O	52,1	51,8	43,3

Na Figura 34 é apresentado a análise química pontual da amostra H8S9 capturada com aumento de 2000x, onde, a Figura 34(a) apresenta a demarcação das áreas

selecionadas para análise química pontual e na Figura 34 (b) é exibido o mapeamento da distribuição de elementos químicos na amostra. Os resultados semiquantitativos da análise química da amostra H8S9 são exibidos na Tabela 8.

Figura 34 - Micrografia da amostra H8S9, 2000x.



Na análise química pontual observou-se que o Ponto 1 é basicamente constituído por cálcio, com baixos teores de silício e sódio sugerindo que seja produto de eflorescência. Os principais produtos da eflorescência são os carbonatos de sódio nas formas hidratada ou anidra, que crescem em diferentes formas e tamanhos (Yao *et al.*, 2016). Sugere-se que o Ponto 2 seja quartzo não reagido já que a análise pontual apresentou constituição majoritária de silício. O ponto 3 apresenta relação Ca/Si de 2,1 e Si/Al de 1,8 sugerindo-se que são géis C-A-S-H. Provis; Bernal (2014) associaram a formação do gel C-A-S-H à presença produtos secundários de reação em sistemas ricos em alumínio e/ou magnésio. Observa-se no entorno do Ponto 3 uma matriz mais homogênea e menos porosa. Nota-se a presença de pontos esféricos esbranquiçados distribuídos pela matriz, conforme apontado pelo Ponto 4. O Ponto 4 é constituído por grande quantidade de sódio sugerindo que seja NaOH não reagido.

Tabela 8 - Análise química semiquantitativa da amostra H8S9.

Elemento (%)	Pontos			
	1	2	3	4
Si	6,2	40,6	4,4	2,6
Al	1,2	-	2,4	2,2
Ca	33,9	1,6	9,4	12,7
Mg	-	-	1,4	-
Fe	5,2	-	1,1	0,4
Na	4,0	6,5	27,2	29,7
C	2,9	-	9,8	4,6
O	35,1	51,3	44,4	47,9

5 CONCLUSÕES

O processo de moagem e peneiramento mostraram-se eficazes para utilização do resíduo de concreto como precursor. O RCR apresentou massa específica e granulometria semelhantes a valores utilizados por outros autores.

A análise FRX mostrou que o RCR possui os óxidos necessários para ativação alcalina em MAA sendo eles: óxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3), além do óxido de cálcio (CaO).

A partir da análise por DRX sugere-se que os principais produtos de reação ocorram na estrutura amorfa do MAA uma vez que não foi possível notar o surgimento de novas fases cristalinas nas pastas.

A utilização do silicato de sódio na ativação alcalina simples, ou a utilização de ativação alcalina composta com adição de hidróxido de sódio mostraram-se adequados para produção de material álcali-ativado. As maiores resistências à compressão foram obtidas na ativação alcalina composta, com valor máximo de 14,71MPa aos 7 dias de cura utilizando 8% de hidróxido de sódio e 9% de silicato de sódio. Acredita-se que o controle da eflorescência poderia resultar em valores superiores de resistência à compressão. A análise de variância indicou que a variação no teor de silicato de sódio causa mais interferência na resistência mecânica do que a variação do hidróxido de sódio.

Foi possível observar que, maior valor de resistência à compressão não necessariamente resulta em estabilidade, já que a pasta com o resultado mais satisfatório se desintegrou em água. Sugere-se que ativadores alcalinos em excesso colaboram para ocorrência de eflorescência, disponibilizando maior concentração de álcali móvel, que ao ser dissolvido causa o enfraquecimento da matriz álcali-ativada.

Ao utilizar o RC como precursor objetivando-se valores superiores de resistência à compressão é necessário maior concentração de ativador alcalino e conseqüentemente, uma forma de prevenir a eflorescência e retração.

A utilização do RCR como precursor foi possível a obtenção de pastas com resistência mecânica e índices de absorção satisfatórios para aplicação em alguns campos do setor construtivo, como na confecção de tijolos.

Pela análise MEV foi possível observar que nas pastas com ativação alcalina composta à medida que se aumentou o teor de silicato de sódio mais partículas foram dissolvidas aumentando a intensidade da reação, o que favorece a formação de produtos de gel C-A-S-H.

Os ensaios de caracterização mostraram a viabilidade de uso do resíduo de concreto reciclado para obtenção de material álcali-ativado tanto com ativação composta, utilizando hidróxido de sódio em pó e silicato de sódio solução, como para ativação simples de solução de silicato de sódio.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliação da microestrutura dos materiais álcali-ativados, por meio de ensaios de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e DRX quantitativo com método de Rietveld;
- Experimentar outros traços com adição de outros resíduos de forma a eliminar a eflorescência nos traços com maiores concentrações de ativadores alcalinos;
- Realizar ensaios mecânicos, físicos e mineralógicos para a pasta de RC álcali-ativada em idades superiores de cura: 28 e 90 dias.
- Estudar a viabilidade da ativação alcalina no RCR por meio de ativadores alternativos produzidos a partir de materiais residuais ricos em sílica.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-GAWWAD, H. A. et al. Recycling of concrete waste to produce ready-mix alkali activated cement. **Ceramics International**, v. 44, n. 6, p. 7300-7304, 2018.

ABDEL-GAWWAD, H. A.; ABO-EL-ENEIN, S. A. A novel method to produce dry geopolymer cement powder. **HBRC journal**, v. 12, n. 1, p. 13-24, 2016.

ABDEL-GAWWAD, Hamdy A.; RASHAD, Alaa M.; HEIKAL, Mohamed. Sustainable utilization of pretreated concrete waste in the production of one-part alkali-activated cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 232, p. 318-328, 2019.

ABNT. **NBR 13279 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, p. 9. 2005.

ABNT. **NBR 13280: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido.** Rio de Janeiro, p. 2. 2008

ABNT. **NBR 15270-3: Componentes cerâmicos Parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – Métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, p. 33. 2005.

ABNT. **NBR 16605: Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, p.8. 2017.

ABNT. **NBR 7170: Tijolo maciço cerâmico para alvenaria** - Rio de Janeiro, p. 4. 1983.

ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos 2020.** São Paulo: Abrelpe, 2021.

ALHAWAT, Musab et al. Properties of geopolymers sourced from construction and demolition waste: A review. **Journal of Building Engineering**, v. 50, p. 104104, 2022.

AHMARI, Saeed et al. Production of geopolymeric binder from blended waste concrete powder and fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 718-729, 2012.

ALLAHVERDI, Ali; NAJAFI KANI, E. Construction wastes as raw materials for geopolymer binders. **International Journal of Civil Engineering**, v. 7, n. 3, p. 154-160, 2009.

ALLAHVERDI, A. et al. Methods to control efflorescence in alkali-activated cement-based materials. In: **Handbook of alkali-activated cements**, mortars and concretes. Woodhead Publishing, 2015. p. 463-483.

ARBI, Kamel et al. A review on the durability of alkali-activated fly ash/slag systems: advances, issues, and perspectives. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 55, n. 19, p. 5439-5453, 2016.

ASSI, Lateef N.; DEEVER, Edward Eddie; ZIEHL, Paul. Effect of source and particle size distribution on the mechanical and microstructural properties of fly Ash-Based geopolymer concrete. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 372-380, 2018.

AZEVEDO, Adriano Galvão Souza et al. Effect of curing temperature, activator solution composition and particle size in Brazilian fly-ash based geopolymer production. **Materials Research**, v. 22, 2019.

BARBOSA, Valeria FF; MACKENZIE, Kenneth JD. Thermal behaviour of inorganic geopolymers and composites derived from sodium polysialate. **Materials research bulletin**, v. 38, n. 2, p. 319-331, 2003.

BERNAL, Susan A. et al. Gel nanostructure in alkali-activated binders based on slag and fly ash, and effects of accelerated carbonation. **Cement and Concrete Research**, v. 53, p. 127-144, 2013.

BESSA, Sofia Araújo Lima; GONÇALVES MELLO, Tiago Augusto; LOURENÇO, Karen Katleen. Análise quantitativa e qualitativa dos resíduos de construção e demolição gerados em Belo Horizonte/MG. **urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 11, 2019.

BRASIL. 2002. Resolução CONAMA n.º 307 - **Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil de 17 de julho de 2002.

CHENG, Ta-Wui; CHIU, J. P. Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag. **Minerals engineering**, v. 16, n. 3, p. 205-210, 2003.

CORREIA, Natalia de Souza; CALDAS, Renan Cesar Silva; OLUREMI, Johnson Rotimi. Feasibility of using CDW fine fraction and bentonite mixtures as alternative landfill barrier material. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 22, n. 6, p. 1877-1886, 2020.

CRIADO, María; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, Ana. Alkali activation of fly ashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products. **Fuel**, v. 84, n. 16, p. 2048-2054, 2005.

CSI. **Cement Sustainability Initiative. Duesseldorf: WbcSD, 2016**. Disponível em: <<https://www.wbcSDcement.org/>>. Acesso em: 15/01/2022

DADSETAN, Sina et al. Construction and demolition waste in geopolymer concrete technology: a review. **Magazine of Concrete Research**, v. 71, n. 23, p. 1232-1252, 2019.

DAS, Sourav Kumar; SHRIVASTAVA, Sandeep. Influence of molarity and alkali mixture ratio on ambient temperature cured waste cement concrete based geopolymer mortar. **Construction and Building Materials**, v. 301, p. 124380, 2021.

DAVIDOVITS, Joseph. Mineral polymers and methods of making them. **U.S. Patent n. 4,349,386**, 14 set. 1982.

DAVIDOVITS, Joseph. False values on CO₂ emission for geopolymer cement/concrete published in scientific papers. **Technical paper**, v. 24, p. 1-9, 2015.

DE MELO, Estela Violin et al. Resíduos de construção e demolição: uma revisão dos usos e aplicabilidades em estradas e rodovias (2015–2020). **Research, Society and Development**, v. 10, n. 10, p. e286101018658-e286101018658, 2021.

DNIT. **Norma DNIT 143/2010 - ES. Pavimentação - base de solo cimento - especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2010. 10p.

- DUXSON, Peter et al. Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 269, n. 1-3, p. 47-58, 2005.
- FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, Ana; PALOMO, A. Mid-infrared spectroscopic studies of alkali-activated fly ash structure. **Microporous and mesoporous materials**, v. 86, n. 1-3, p. 207-214, 2005.
- FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, Ana; PALOMO, Angel. Propiedades y aplicaciones de los cementos alcalinos. **Revista ingeniería de construcción**, v. 24, n. 3, p. 213-232, 2009.
- FLÖRKE, Otto W. et al. Silica. **Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry**, 2000.
- FRARE, Andreza; LUZ, Caroline Angulski da. Cimentos álcali ativados: efeito da cura térmica no desenvolvimento da resistência mecânica. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, 2020.
- GÁLVEZ-MARTOS, José-Luis et al. Construction and demolition waste best management practice in Europe. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 136, p. 166-178, 2018.
- GEDIK, Abdulgazi. A review on the evaluation of the potential utilization of construction and demolition waste in hot mix asphalt pavements. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 161, p. 104956, 2020.
- GLUKHOVSKY, V. D. Ancient, modern and future concretes. In: **Proceedings of the First International Conference on Alkaline Cements and Concretes**. Kiev, Ukraine, 1994. p. 1-9.
- GOMES, Luana Silva; DE SOUZA, Marcos Costa; FURTADO, Antonia Carlene Rodrigues. A sílica e suas particularidades. **Revista virtual de química**, v. 10, n. 4, 2018.
- HAMMER, Ø.; HARPER, D. A. T.; RYAN, P. D. **PAST: Paleontological Statistics Software Package**, 2001.

HARDJITO, D.; RANGAN, B.V.. Development of Fly Ash-based Geopolymer Concrete: Progress and Research Needs. **2 nd Asian Concrete Federation Conference, BALI, INDONESIA**, 2006.

HASSAN, Amer; ARIF, Mohammed; SHARIQ, Mohd. Effect of curing condition on the mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete. **SN Applied Sciences**, v. 1, n. 12, p. 1-9, 2019.

HEAH, C. Y. et al. Strength and microstructural properties of mechanically-activated kaolin geopolymers. In: **Advanced Materials Research**. Trans Tech Publications Ltd, 2013. p. 926-930.

HO, Hsing-Jung; IIZUKA, Atsushi; SHIBATA, Etsuro. Chemical recycling and use of various types of concrete waste: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 284, p. 124785, 2021.

HOUNSI, Ayi D. et al. Kaolin-based geopolymers: Effect of mechanical activation and curing process. **Construction and Building Materials**, v. 42, p. 105-113, 2013.

HUO, Wangwen et al. Effect of synthesis parameters on the development of unconfined compressive strength of recycled waste concrete powder-based geopolymers. **Construction and Building Materials**, v. 292, p. 123264, 2021.

IEA. **International Energy Agency Cement Technology Roadmap (2009) – Carbon emissions reductions up to 2050**. Disponível em: . Acesso em: 22 dez. 2021.

JUAN-VALDÉS, Andrés et al. Recycled Precast Concrete Kerbs and Paving Blocks, a Technically Viable Option for Footways. **Materials**, v. 14, n. 22, p. 7007, 2021.

KABIRIFAR, Kamyar et al. Construction and demolition waste management contributing factors coupled with reduce, reuse, and recycle strategies for effective waste management: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 263, p. 121265, 2020.

KANG, Suk-Pyo; KWON, Seung-Jun. Effects of red mud and alkali-activated slag cement on efflorescence in cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 133, p. 459-467, 2017.

KANI, Ebrahim Najafi; ALLAHVERDI, Ali; PROVIS, John L. Efflorescence control in geopolymer binders based on natural pozzolan. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 1, p. 25-33, 2012.

KAPS, Ch; BUCHWALD, A. Property controlling influences on the generation of geopolymeric binders based on clay. **Proc. Geopolymers**, 2002.

KHALE, Divya; CHAUDHARY, Rubina. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. **Journal of materials science**, v. 42, n. 3, p. 729-746, 2007.

KOMNITSAS, Kostas et al. Effect of synthesis parameters on the quality of construction and demolition wastes (CDW) geopolymers. **Advanced Powder Technology**, v. 26, n. 2, p. 368-376, 2015.

KRIVENKO, Pavlo. Why alkaline activation—60 years of the theory and practice of alkali-activated materials. **Journal of Ceramic Science and Technology**, v. 8, n. 3, p. 323-333, 2017.

LAMPRIS, C.; LUPO, R.; CHEESEMAN, Christopher R. Geopolymerisation of silt generated from construction and demolition waste washing plants. **Waste Management**, v. 29, n. 1, p. 368-373, 2009.

LIZCANO, Maricela et al. Effects of water content and chemical composition on structural properties of alkaline activated metakaolin-based geopolymers. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 95, n. 7, p. 2169-2177, 2012.

LLOYD, Redmond R. et al. Spatial distribution of pores in fly ash-based inorganic polymer gels visualised by Wood's metal intrusion. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 126, n. 1-2, p. 32-39, 2009.

LONGHI, Márton A. et al. Efflorescence of alkali-activated cements (geopolymers) and the impacts on material structures: A critical analysis. **Frontiers in Materials**, v. 6, p. 89, 2019.

MADSEN, Ian C.; SCARLETT, Nicola VY; KERN, Arndt. Description and survey of methodologies for the determination of amorphous content via X-ray powder diffraction. **Zeitschrift für Kristallographie**, v. 226, n. 12, p. 944-955, 2011.

MARTINS, Cátia Vanessa Macedo. Análise Granulométrica e Distribuição dos Parâmetros de Forma e Textura de Areias Através do Processamento de Imagens Digitais. 2020.

MARZOUK, Mohamed; AZAB, Shima. Environmental and economic impact assessment of construction and demolition waste disposal using system dynamics. **Resources, conservation and recycling**, v. 82, p. 41-49, 2014.

MASTALI, M. et al. Drying shrinkage in alkali-activated binders—a critical review. **Construction and Building Materials**, v. 190, p. 533-550, 2018.

MA, Y.; YE, G. The shrinkage of alkali activated fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 68, p. 75-82, 2015.

MIERZWIŃSKI, D. et al. Effect of coffee grounds addition on efflorescence in fly ash-based geopolymer. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2018. p. 012035.

NAJAFI KANI, Ebrahim; ALLAHVERDI, Ali. Effects of curing time and temperature on strength development of inorganic polymeric binder based on natural pozzolan. **Journal of Materials science**, v. 44, n. 12, p. 3088-3097, 2009.

NGUYEN, Quang Hung et al. Porous arrangement and transport properties of geopolymers. **Construction and Building Materials**, v. 191, p. 853-865, 2018.

OKADA, Kiyoshi et al. Water retention properties of porous geopolymers for use in cooling applications. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 29, n. 10, p. 1917-1923, 2009.

ONYELOWE, Kennedy C.; SHAKERI, Jamshid. Intelligent prediction of coefficients of curvature and uniformity of hybrid cement modified unsaturated soil with NQF inclusion. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 4, p. 100152, 2021.

PACHECO-TORGAL, Fernando; CASTRO-GOMES, Joao; JALALI, Said. Alkali-activated binders: A review: Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. **Construction and building Materials**, v. 22, n. 7, p. 1305-1314, 2008.

PACHECO-TORGAL, Fernando et al. (Ed.). **Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes**. Elsevier, 2014.

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

PANIAS, Dimitrios; GIANNOPOULOU, Ioanna P.; PERRAKI, Theodora. Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 301, n. 1-3, p. 246-254, 2007.

PIMRAKSA, K. et al. Lightweight geopolymer made of highly porous siliceous materials with various $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ and $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratios. **Materials Science and Engineering: A**, v. 528, n. 21, p. 6616-6623, 2011.

PINTO, Amândio Teixeira. Introdução ao estudo dos geopolímeros. **Universidade De Trás-Os-Montes E Alto Douro: Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro**, 2006.

PROVIS, John L. et al. High-resolution nanoprobe X-ray fluorescence characterization of heterogeneous calcium and heavy metal distributions in alkali-activated fly ash. **Langmuir**, v. 25, n. 19, p. 11897-11904, 2009.

PROVIS, John L. Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what?. **Materials and structures**, v. 47, n. 1, p. 11-25, 2014.

PROVIS, John L.; BERNAL, Susan A. Geopolymers and related alkali-activated materials. **Annual Review of Materials Research**, v. 44, p. 299-327, 2014.

PROVIS, John L. Alkali-activated materials. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 40-48, 2018.

PROVIS, John L.; VAN DEVENTER, Jannie SJ (Ed.). **Alkali activated materials: state-of-the-art report, RILEM TC 224-AAM**. Springer Science & Business Media, 2013.

REIS, Jeselay HC et al. Evaluation of soil, cement and construction and demolition waste (CDW) mixtures for use in road pavement base and sub-base applications. In: **Key Engineering Materials**. Trans Tech Publications Ltd, 2015. p. 247-255.

ROBAYO-SALAZAR, Rafael; VALÊNCIA-SAAVEDRA, William; DE GUTIÉRREZ, Ruby Mejía. Reciclagem de resíduos de concreto, cerâmica e alvenaria via ativação alcalina: Obtenção e caracterização de cimentos híbridos. **Journal of Building Engineering** , v. 46, p. 103698, 2022.

SAEDI, Alieh; JAMSHIDI-ZANJANI, Ahmad; DARBAN, Ahmad Khodadadi. A review on different methods of activating tailings to improve their cementitious property as cemented paste and reusability. **Journal of Environmental Management**, v. 270, p. 110881, 2020.

SEVERO, C. G. S. et al. Características, particularidades e princípios científicos dos materiais ativados alcalinamente. **Revista eletrônica de Materiais e Processos**, v. 8, n. 2, p. 55-67, 2013.

SHI, C.; KRIVENKO, P. V.; ROY, D. Hydration and microstructure of alkali-activated slag cements. **Alkali-activated cements and concrete**. Oxford: Taylor and Francis, p. 66, 2006.

SHI, Caijun; JIMÉNEZ, A. Fernández; PALOMO, Angel. New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. **Cement and concrete research**, v. 41, n. 7, p. 750-763, 2011.

ŠKVÁRA, František et al. Aluminosilicate polymers—influence of elevated temperatures, efflorescence. **Ceramics—Silikáty**, v. 53, n. 4, p. 276-282, 2009.

STATISTA, U. S. (2021). **world cement production 2020**.

SUI, Yuwu et al. Study on properties of waste concrete powder by thermal treatment and application in mortar. **Applied Sciences**, v. 10, n. 3, p. 998, 2020.

TCHADJIE, L. N.; EKOLU, S. O. Enhancing the reactivity of aluminosilicate materials toward geopolymer synthesis. **Journal of materials science**, v. 53, n. 7, p. 4709-4733, 2018.

TORGAL, F. P. , JALALI, S. (2010) A Sustentabilidade dos Materiais de Construção. 2ª ed. Portugal.

TORGAL, F. Pacheco; ALVES, S. P. Desenvolvimento de ligantes obtidos por activação alcalina de lamas residuais das Minas da Panasqueira. **Universidade da Beira Interior, Covilhã**, 2007.

TORGAL, Fernando Pacheco; GOMES, JP de C.; JALALI, Said. Argamassas antigas: reacção pozolânica ou activação alcalina. In: **Congresso Nacional de Argamassas de Construção-“Sob a Égide da Reabilitação**. 2007.

TRAN, Van Quan; DANG, Viet Quoc; HO, Lanh Si. Evaluating compressive strength of concrete made with recycled concrete aggregates using machine learning approach. **Construction and Building Materials**, v. 323, p. 126578, 2022.

TROCHEZ, J. J. et al. Synthesis of geopolymer from spent FCC: Effect of SiO₂/Al₂O₃ and Na₂O/SiO₂ molar ratios. **Materiales de Construcción**, v. 65, n. 317, p. e046, 2015.

TURNER, Louise K.; COLLINS, Frank G. Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. **Construction and building materials**, v. 43, p. 125-130, 2013.

VAFAEI, Mostafa; ALLAHVERDI, Ali. Strength development and acid resistance of geopolymer based on waste clay brick powder and phosphorous slag. **Structural Concrete**, v. 20, n. 5, p. 1596-1606, 2019.

VAN DEVENTER, Jannie SJ et al. Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials. **Waste and Biomass Valorization**, v. 1, n. 1, p. 145-155, 2010.

VAN JAARSVELD, J. G. S.; VAN DEVENTER, J. S. J.; LORENZEN, L. L. Factors affecting the immobilization of metals in geopolymerized flyash. **Metallurgical and materials transactions B**, v. 29, n. 1, p. 283-291, 1998.

VAN JAARSVELD, J. G. S.; VAN DEVENTER, Jannie SJ; LUKEY, G. C. The effect of composition and temperature on the properties of fly ash-and kaolinite-based geopolymers. **Chemical Engineering Journal**, v. 89, n. 1-3, p. 63-73, 2002.

VÁSQUEZ, Alexander et al. Geopolymer based on concrete demolition waste. **Advanced Powder Technology**, v. 27, n. 4, p. 1173-1179, 2016.

VILLAQUIRÁN-CAICEDO, Mónica A.; DE GUTIÉRREZ, Ruby Mejía. Comparison of different activators for alkaline activation of construction and demolition wastes.

Construction and Building Materials, v. 281, p. 122599, 2021.

WANG, Hongling; LI, Haihong; YAN, Fengyuan. Synthesis and mechanical properties of metakaolinite-based geopolymer. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 268, n. 1-3, p. 1-6, 2005.

Physicochemical and Engineering Aspects, v. 268, n. 1-3, p. 1-6, 2005.

WANG, Yaguang et al. Efeitos da relação Si/Al na eflorescência e propriedades de geopolímeros à base de cinzas volantes. **Journal of Cleaner Production** v. 244, p. 118852, 2020.

WANG, Bo et al. A comprehensive review on recycled aggregate and recycled aggregate concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 171, p. 105565, 2021.

WENG, L.; SAGOE-CRENTSIL, K. Dissolution processes, hydrolysis and condensation reactions during geopolymer synthesis: Part I—Low Si/Al ratio systems. **Journal of Materials Science**, v. 42, n. 9, p. 2997-3006, 2007

XIE, Jun et al. Effect of nano metakaolin on compressive strength of recycled concrete. **Construction and Building Materials**, v. 256, p. 119393, 2020.

XU, Hua; VAN DEVENTER, J. S. J. The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. **International journal of mineral processing**, v. 59, n. 3, p. 247-266, 2000.

XU, Hua; VAN DEVENTER, Jannie SJ. Microstructural characterisation of geopolymers synthesised from kaolinite/stilbite mixtures using XRD, MAS-NMR, SEM/EDX, TEM/EDX, and HREM. **Cement and Concrete research**, v. 32, n. 11, p. 1705-1716, 2002.

YAO, Xiao; YANG, Tao; ZHANG, Zuhua. Compressive strength development and shrinkage of alkali-activated fly ash–slag blends associated with efflorescence. **Materials and Structures**, v. 49, n. 7, p. 2907-2918, 2016.

YIP, Ch K.; LUKEY, G. C.; VAN DEVENTER, Jannie SJ. The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation. **Cement and concrete research**, v. 35, n. 9, p. 1688-1697, 2005.

YIP, Christina K. et al. Carbonate mineral addition to metakaolin-based geopolymers. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 10, p. 979-985, 2008.

YUNSHENG, Zhang et al. Synthesis and heavy metal immobilization behaviors of slag based geopolymer. **Journal of hazardous materials**, v. 143, n. 1-2, p. 206-213, 2007.

ZAHARAKI, Dimitra; GALETAKIS, Michalis; KOMNITSAS, Kostas. Valorization of construction and demolition (C&D) and industrial wastes through alkali activation. **Construction and Building Materials**, v. 121, p. 686-693, 2016.

ZHANG, Zuhua et al. Quantitative kinetic and structural analysis of geopolymers. Part 2. Thermodynamics of sodium silicate activation of metakaolin. **Thermochimica acta**, v. 565, p. 163-171, 2013.

ZIVICA, Vladimír; BAJZA, Adolf. Acidic attack of cement based materials—a review.: Part 1. Principle of acidic attack. **Construction and Building materials**, v. 15, n. 8, p. 331-340, 2001.