

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
NÍVEL DOUTORADO**

LUÍS CLÁUDIO STAUDT CONCEIÇÃO

**PRODUÇÃO INDUSTRIAL DE BLOCOS DE CONCRETO PARA ALVENARIA À
BASE DE ROCHA VULCÂNICA ÁCIDA ÁLCALI-ATIVADA**

São Leopoldo

2023

LUÍS CLÁUDIO STAUDT CONCEIÇÃO

**PRODUÇÃO INDUSTRIAL DE BLOCOS DE CONCRETO PARA ALVENARIA À
BASE DE ROCHA VULCÂNICA ÁCIDA ÁLCALI-ATIVADA**

Tese apresentada como requisito parcial
para obtenção do título de Doutor em
Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil da
Universidade do Vale do Rio dos Sinos -
UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Mauricio Mancio

São Leopoldo

2023

C744p

Conceição, Luís Cláudio Staudt.

Produção industrial de blocos de concreto para alvenaria à base de rocha vulcânica ácida álcali-ativada / Luís Cláudio Staudt Conceição. – 2023.

168 f. : il. ; 30 cm.

Tese (doutorado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2023.

“Orientador: Prof. Dr. Mauricio Mancio.”

1. Blocos de concreto. 2. Concreto álcali-ativado. 3. Escala industrial. 4. Rocha vulcânica ácida. I. Título.

CDU 624

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Bibliotecária: Silvana Dornelles Studzinski – CRB 10/2524)

AGRADECIMENTOS A CAPES

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, eu só estou aqui hoje pela forma como fui educado e inspirado pela minha família. Eu tenho uma rede de apoio familiar que ao longo dos anos me deu suporte para que pudesse voar voos cada vez mais alto, com a tranquilidade que se algo desse errado, eles estariam ali para me ajudar no que fosse preciso.

O meu principal agradecimento é para essas pessoas que lutaram tanto quanto eu, para que eu pudesse chegar ao nível de doutor em engenharia civil. O carinho e o amor que cada um transmite para mim é o combustível que me move em direção a desafios maiores, e o orgulho deles em mim, é a recompensa por todo o esforço e disciplina despendido para obter cada conquista.

Quero expressar aqui todo o meu amor e carinho pela minha família, deixando eternizado neste trabalho o nome de cada um deles:

Aos meus avós: Reneo Staudt e Lúcia Danila Staudt.

Aos meus pais: Luciana Staudt e Sandro César Sodré Silveira.

Aos meus irmãos: Sandro Staudt Silveira Júnior e Lorrani Staudt Silveira.

A minha namorada: Franciéle Gomes da Silva.

Em segundo lugar, o meu agradecimento é para a Unisinos, que não consigo descrever o quanto me transformou como profissional e como ser humano, nem mesmo os diplomas e certificados conseguem mensurar a diferença que a Unisinos gerou em mim, na minha vida, na minha família e nas minhas perspectivas futuras.

O Luís que entrou na graduação, não é o mesmo Luís que está saindo do doutorado. Hoje, com certeza, a Unisinos é parte importante de quem sou e eu sou um pedacinho na história dessa magnífica universidade.

Em terceiro lugar, gostaria de agradecer imensamente ao meu orientador por ter acreditado no meu potencial. Ao longo de 10 anos foi inspiração como profissional e principalmente pelo lado humano como enxerga o mundo, rompendo as barreiras do ego elevado enraizado na cultura acadêmica e mostrando a realidade de vulnerabilidade social em nosso entorno.

O doutorado foi um processo solitário, que teve início na graduação, foi intensificado no mestrado e consolidado no doutorado. Contudo, ao longo do percurso tive a oportunidade de ter em meu lado colegas de altíssimo nível que subiram a régua, fazendo com que eu evoluísse muito.

Aos meus colegas e amigos: Angélica Koppe, Jéssica Fröhlich e Guilherme Bueno.

Ao meu colega e amigo Davi Muller, que foi fundamental na produção desta tese ao disponibilizar a infraestrutura de sua empresa Millato para a produção dos blocos em escala industrial.

Em resumo, eu agradeço as pessoas que conviveram comigo ao longo deste longo ciclo, pois me tornaram uma pessoa melhor em diversos aspectos, afinal somos a média das pessoas com quem convivemos.

“Entre para aprender, saia para liderar”.

RESUMO

A conscientização da sociedade em relação à degradação ambiental e às consequências ocasionadas pelo aumento das emissões de gases do efeito estufa, somada com a crescente demanda por matérias primas para a construção civil, têm estimulado a busca por construções e materiais mais sustentáveis. Enfocando materiais álcali-ativados como alternativa, a pesquisa preenche uma lacuna na literatura ao integrar aspectos técnicos, ambientais e econômicos, especialmente em escala industrial. Portanto, este estudo tem como objetivo fornecer uma contribuição significativa para o desenvolvimento da produção em escala industrial de blocos de concreto álcali-ativado utilizando um subproduto da mineração (rochas vulcânicas ácidas). Isso envolve uma avaliação abrangente de aspectos técnicos, como estabilidade dimensional, absorção de água, resistência à compressão e resistência à água, bem como considerações ambientais, tais como emissões de CO₂ e energia incorporada, e aos custos de produção em larga escala. Os resultados mostram que, embora esses blocos tenham resistência inferior ao cimento Portland, atendem aos requisitos normativos estabelecidos pela NBR 6136 para utilização na construção civil. Além disso, apresentam um potencial significativo de redução nas emissões de CO₂ (40% a 61%) e no consumo energético (25% a 35%). A análise de custos revelou um acréscimo de apenas 2% em relação ao cimento Portland. Neste contexto, foi possível avaliar, pela primeira vez, a viabilidade técnica, ambiental e os custos da produção de blocos de concreto utilizando cimento álcali-ativado produzido a partir de rocha vulcânica ácida como aglomerante em escala industrial. A consolidação dos resultados indica o potencial de utilização de rochas vulcânicas ácidas, como um substituto viável ao cimento Portland na produção de blocos de concreto.

Palavras-chave: Concreto álcali-ativado. Rocha vulcânica ácida. Escala industrial. Blocos de concreto.

ABSTRACT

Society's growing awareness of environmental degradation and the consequences of increased greenhouse gas emissions, coupled with the rising demand for raw materials in the construction industry, has spurred the search for more sustainable building materials and practices. Focusing on alkali-activated materials as an alternative, this research addresses a gap in the literature by integrating technical, environmental, and economic aspects, particularly on an industrial scale. Therefore, this study aims to provide a significant contribution to the development of industrial-scale production of alkali-activated concrete blocks using a mining byproduct (acidic volcanic rocks). This entails a comprehensive assessment of technical aspects, such as dimensional stability, water absorption, compressive strength, and water resistance, as well as environmental considerations, including CO₂ emissions and embodied energy, along with large-scale production costs. The results demonstrate that, although these blocks exhibit lower strength compared to Portland cement, they meet the regulatory requirements established by NBR 6136 for use in construction. Furthermore, they present a substantial potential for reducing CO₂ emissions (32% to 52%) and energy consumption (11% to 19%). Cost analysis revealed only a 2% increase compared to Portland cement. In this context, it was possible to evaluate, for the first time, the technical, environmental, and cost viability of producing concrete blocks using alkali-activated cement derived from acidic volcanic rock as a binder on an industrial scale. The consolidation of these results highlights the potential of using acidic volcanic rocks as a viable alternative to Portland cement in concrete block production.

Keywords: Alkali-activated concrete. Acidic volcanic rock. Industrial scale. Concrete blocks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Detalhamento do processo de formação da microestrutura dos materiais álcali-ativados.....	29
Figura 2 - Modelo estrutural do C-A-S-H: (a) Cadeia linear; (b) Cadeia com ligações cruzadas.....	32
Figura 3 - Modelo estrutural do N-A-S-H.....	33
Figura 4 – Distribuição da Província Magmática do Paraná na América do Sul.....	36
Figura 5 - Análise petrográfica de vidros vulcânicos: a) vidro vulcânico; b) vidro parcialmente devitrificado; c) vidro devitrificado.....	38
Figura 6 - Análise comparativo da influência do grau de devitrificação de vidros vulcânicos no desempenho mecânico de amostras de pasta de cimento	40
Figura 7 -Influência do cátion potássio (K) e sódio (Na) no desenvolvimento de resistência à compressão de pastas de cimento utilizando escória como material precursor	43
Figura 8 - Influência da concentração da solução alcalina na taxa de dissolução das partículas de cinza volante.....	44
Figura 9 - Influência da molaridade na resistência à compressão em amostras com relação solução/aglomerante de 0,45 e o módulo de sílica 2	45
Figura 10 - Solubilidade de sílica com relação ao pH.....	46
Figura 11 - Influência do módulo de sílica na resistência à compressão em amostras com relação solução/aglomerante de 0,45 e 12 mol.....	47
Figura 12 - Influência do Ms na resistência à compressão de pastas curadas a 20 °C	48
Figura 13 - Influência do silicato de sódio na estrutura.....	49
Figura 14 - Diagrama de fases influenciado pelo módulo de sílica.....	50
Figura 15 - Interação entre a molaridade e a relação solução/aglomerante.....	51
Figura 16 - Interações: (a) Módulo de sílica x molaridade; (b) Módulo de sílica x Solução/Aglomerante.....	52
Figura 17 - Influência da relação solução/aglomerante na resistência à compressão.....	53
Figura 18 - Interações: (a) Temperatura x módulo de sílica; (b) Temperatura x Solução/Aglomerante.....	54
Figura 19 - Interação entre a temperatura e a molaridade.....	54

Figura 20 – Análise da taxa de dissolução de sílica e alumina em cinza volante por diferentes concentrações de NaOH no ativador alcalino: (a) Silício; (b) Alumínio	56
Figura 21 – Influência da temperatura de cura no tempo de início e término de pega em material ativado por álcalis utilizando metacaulim como material precursor.	58
Figura 22 – Taxa de desenvolvimento de resistência em materiais ativados por álcalis em relação ao período e temperatura de cura térmica.....	59
Figura 23 – Influência da temperatura de cura na resistência à compressão	59
Figura 24 - Distribuição do tamanho de poros.....	60
Figura 25 - Alterações na microestrutura de pastas de cimento ativados por álcalis tendo cinza volante como material precursor	62
Figura 26 - Diferenças morfológicas e microestruturais de pastas de cimento ativados por álcalis tendo cinza volante como material precursor: (a) Cura úmida; (b) Cura Seca.....	63
Figura 27 - Efeitos da diferença de temperaturas e de pré-cura: (a) 1 dia; (b) 7dias	64
Figura 28 - Influência da relação Na/Al na lixiviação de álcalis e na resistência à compressão.	66
Figura 29 - Amostras submersas em água por 24h: (a) Estado das amostras antes do contato com a água; (b) Estado das amostras após o contato com a água.....	67
Figura 30 - Diferentes comportamentos de amostras de pastas de cimento em contato com película de água	67
Figura 31 - Forma de deterioração das amostras: (a) Desintegração; (b) Expansão; (c) Forma bicônica e bifaturada observada na expansão.....	68
Figura 32 - Evolução da expansão: (a) Comportamento de fissuração vertical com aumento volumétrico horizontal; (b) Comportamento de intensa fissuração horizontal com a amostra seccionada.....	69
Figura 33 - Comparação de comportamento de amostras imersas em água por 24h constituídas por rochas vulcânicas coletadas em diferentes afloramentos: antes (A) e depois (D).	71
Figura 34 - Detalhamento dos impactos ambientais relacionados ao setor da construção civil.	72
Figura 35 - Perspectiva esquemática dos aspectos positivos dos concretos álcali-ativados.....	74
Figura 36 - Contribuição de carbono dos constituintes dos cimentos álcali-ativado .	77

Figura 37 - Emissões de dióxido de carbono para diferentes composições de aglomerantes álcali-ativados.....	78
Figura 38 - Comparação das emissões de CO ₂ entre concretos produzidos com cimento Portland e Álcali-ativado.....	80
Figura 39 – Fatores de emissão de CO ₂ para os constituintes do concreto álcali-ativado.....	81
Figura 40 - Comparação de custo (em dólares australianos) entre pastas produzidas com cimento álcali-ativado e cimento Portland.....	83
Figura 41 - Quadro resumo das etapas do programa experimental	85
Figura 42 – Amostra de concreto álcali-ativada desmoldada imediatamente após moldagem do corpo de prova.....	87
Figura 43 – Ensaio de estabilidade dimensional: (a) Amostras de concreto álcali-ativado do traço de 10% após 24 horas submersas; (b) Amostras de concreto álcali-ativado do traço de 15% após 24 horas submersas.....	89
Figura 44 - Análise petrográfica do vidro vulcânico coletado na cidade de Caxias do Sul	90
Figura 45 - Difratoograma de DRX com refinamento de Rietveld do vidro vulcânico de Caxias do Sul.....	91
Figura 46 - Rocha beneficiada.....	92
Figura 47 - Distribuição granulométrica das partículas do material precursor com o CaO homogeneizado.....	93
Figura 48 - Distribuição granulométrica: (a) Composição do agregado miúdo; (b) Agregado graúdo.....	96
Figura 49 – Compilação da distribuição granulométrica dos agregados utilizados ..	97
Figura 50 - Fluxograma do processo produtivo dos blocos de concreto com cimento convencional.....	98
Figura 51 – Prensa hidráulica para moldagem dos blocos de concreto	99
Figura 52 - Armazenamento dos blocos em cura ambiente.....	99
Figura 53 - Fluxograma do processo produtivo dos blocos de concreto com cimento álcali-ativado.....	100
Figura 54 - Blocos de concreto álcali-ativado	101
Figura 55 - Blocos de concreto álcali-ativado iniciando o período de cura térmica	102
Figura 56 – Monitoramento de temperatura e umidade na câmara de secagem relativa no período de cura térmica na indústria	103

Figura 57 - Análise Dimensional	104
Figura 58 - Mísulas Bloco	105
Figura 59 - Fatores considerados na obtenção do indicador ambiental.....	107
Figura 60 – Absorção de água das composições de blocos de concreto aos 28 dias	114
Figura 61 – Comportamento mecânico dos blocos de concreto produzidos no estudo.	116
Figura 62 – Descrição da estagnação do processo de dissolução do material precursor.....	118
Figura 63 – Comparação do efeito do processo de cura no comportamento mecânico dos blocos de concreto	119
Figura 64 – Análise das resistências em amostras submetidas ao ciclo de saturação e secagem em comparação aos blocos submetidos a cura ambiente	121
Figura 65 – Formação de eflorescência na superfície de blocos de concreto álcali-ativados com 8 dias: (a) Cura ambiente; (b) Cura térmica.	122
Figura 66 – Estimativa de emissão de carbono por unidade de bloco de concreto produzido.	125
Figura 67 – Impacto dos parâmetros do processo de cura nas emissões de carbono de blocos de concreto álcali-ativados.....	127
Figura 68 – Composição de origem na emissão de carbono para a produção de blocos de concreto álcali-ativado: (a) Cura Térmica; (b) Cura Ambiente.	128
Figura 69 – Estimativa de energia incorporada por unidade de bloco de concreto.	129
Figura 70 – Impacto dos parâmetros do processo de cura na energia incorporada em blocos de concreto álcali-ativados.	130
Figura 71 – Composição de origem da demanda energética na produção dos blocos de concreto álcali-ativado: (a) Cura Térmica; (b) Cura Ambiente.....	131
Figura 72 – Desempenho em relação à energia primária: (a) Concreto Portland; (b) Concreto Álcali-ativado.	132
Figura 73 – Composição de custos na produção de blocos de concreto em escala industrial: (a) Cimento Portland; (b) Cimento Álcali-ativado	134
Figura 74 – Impacto da escala de produção em relação ao custo comparado ao bloco de concreto produzido com cimento Portland.	135

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação das reações dos cimentos	31
Tabela 2 - Estrutura do N-A-S-H	34
Tabela 3 - Análise química quantitativa por FRX das rochas vulcânicas ácidas usadas no estudo de Koppe (2021).	37
Tabela 4 – Análise das fases cristalinas por DRX em rochas vulcânicas ácidas	37
Tabela 5 – Quantificação da fração reativa de vidros vulcânicos	39
Tabela 6 - Resistência à compressão, obtidas em diferentes estudos.	41
Tabela 7 - Evolução na eficiência do uso de silicato de potássio na produção de concretos álcali-ativados	79
Tabela 8 – Traços unitários, em massa, dos concretos ativados por álcalis utilizados no estudo piloto.	86
Tabela 9 – Resultados do ensaio de resistência à compressão do teste piloto. As resistências potenciais obtidas são apresentadas em itálico, e as médias em negrito.	88
Tabela 10 - Composição de fases da rocha de Caxias do Sul.	91
Tabela 11 - Quantificação da fração reativa do vidro vulcânico.....	92
Tabela 12 - Características físicas do material precursor	94
Tabela 13 - Traço Unitário do concreto utilizado para a produção dos blocos de concreto álcali-ativado.....	95
Tabela 14 - Requisitos físico-mecânicos dos blocos de concreto.....	103
Tabela 15 – Contribuição do impacto ambiental dos constituintes na produção dos blocos de concreto com base em dados coletados no Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção e literaturas complementares,	108
Tabela 16 – Quantitativo de insumos utilizados para a produção de uma unidade de bloco de concreto	109
Tabela 17 – Composição de custos para a produção de uma unidade de bloco de concreto.....	111
Tabela 18 – Análise dimensional dos blocos de concreto	112
Tabela 19 – Designação por classe, largura dos blocos e espessura mínima das paredes dos blocos.	113
Tabela 20 – Área líquida dos blocos de concreto aos 28 dias.....	115

Tabela 21 – Avaliação ao atendimento dos requisitos para resistência à compressão e absorção da composição referência com cimento Portland aos 28 dias.....	124
Tabela 22 – Avaliação ao atendimento dos requisitos para resistência à compressão e absorção da composição com concreto álcali-ativado aos 28 dias.....	124
Tabela 23 – Composição de custo para a produção de uma unidade de bloco de concreto.....	133

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BET	(Braunauer, Emmet e Teller) área específica
C-A-S-H	Aluminossilicato de cálcio hidratado
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
DRX	Difração de Raios-X
FRX	Fluorescência de Raios-X
GMAT	Grupo de Pesquisa em Materiais e Reciclagem
LCVMat	Laboratório de Caracterização e valorização dos materiais
MS	Módulo de sílica (razão molar $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$)
N-A-S-H	Aluminossilicato de sódio hidratado
NBR	Norma brasileira regulamentada
P.F	Perda ao fogo
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos

LISTA DE SIMBOLOS

%	Percentual
>	Maior que
°C	Graus Celsius
g/cm ³	Gramas por centímetro cúbico
h	Hora
kg	Quilograma
km ²	Quilômetro quadrado
km ³	Quilometro cúbico
m ³	Metro cúbico
min	Minuto
mm	Milímetro
mol	Molar
MPa	Mega Pascal
Ms	módulo de sílica
pH	Potencial hidrogeniônico
pm	Picômetro
rpm	Rotações por minuto
s	Segundos
Sagl	Relação solução aglomerante
µm	Micrômetros

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	23
1.2 PROBLEMA.....	24
1.3 OBJETIVOS	25
1.3.1 Objetivo Geral	25
1.3.2 Objetivos Específicos	25
1.4 JUSTIFICATIVA	25
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	28
2.1 MATERIAIS CIMENTÍCIOS ÁLCALI-ATIVADOS.....	28
2.1.1 Materiais Precursores	35
2.1.2 Ativadores Alcalinos	41
2.1.3 Produção de Álcali-Ativados	55
2.1.4 Durabilidade	64
2.2 IMPACTOS AMBIENTAIS	72
2.2.1 Desempenho Ambiental	75
2.2.2 Análise do Ciclo de Vida	79
2.3 ANÁLISE DE CUSTOS	82
3 METODOLOGIA	85
3.1 ESTUDO PILOTO	86
3.1.1 Composição do Traço e Produção de Concreto Álcali-ativado	86
3.2 PREPARAÇÃO DO MATERIAL PRECURSOR	89
3.3 PRODUÇÃO DOS BLOCOS DE CONCRETO DE ALVENARIA	94
3.3.1 Composição do Traço	95
3.3.2 Fabricação de Blocos de Concreto com Cimento Portland	97
3.3.3 Fabricação de Blocos de Concreto com Cimento Álcali-ativado	100
3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS DE CONCRETO	103
3.4.1 Análise Dimensional	104
3.4.2 Absorção de Água e Área Líquida	105
3.4.3 Resistência à Compressão	106
3.4.4 Resistência à Água	106
3.5 ANÁLISE DE IMPACTOS AMBIENTAIS.....	107
3.6 ANÁLISE DE CUSTOS	111

4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	112
4.1 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS.....	112
4.1.1 Análise Dimensional.....	112
4.1.2 Absorção de Água e Área Líquida	113
4.1.3 Resistência à Compressão	115
4.1.4 Resistência à água.....	120
4.1.5 Classificação de acordo com NBR 6136:2016	123
4.2 DESEMPENHO AMBIENTAL	125
4.2.1 Emissões de Dióxido de Carbono	125
4.2.2 Energia Incorporada	129
4.3 AVALIAÇÃO DE CUSTOS.....	132
5 CONCLUSÃO	136
5.1 MÍNIMO PRODUTO VIÁVEL (MVP).....	136
5.2 DESEMPENHO TÉCNICO	137
5.3 DESEMPENHO AMBIENTAL	138
5.4 DESEMPENHO ECONÔMICO	140
5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	141
5.6 TRABALHOS FUTUROS	141
REFERÊNCIAS	143
ANEXO A – ANÁLISE ESTATÍSTICA	154
ANEXO B – DESCRIÇÕES DOS ITENS NO SIDAC	167
ANEXO C – DESCRIÇÃO DO BLOCO DE CONCRETO FCK 4MPA (14X19X39) SIDAC	168

1 INTRODUÇÃO

A conscientização da sociedade em relação à degradação ambiental e às consequências ocasionadas pelo aumento das emissões de gases do efeito estufa, somada à crescente demanda por matérias primas para a construção civil, têm estimulado a busca por construções e materiais sustentáveis. As crescentes demandas por edificações e obras de grande porte tornaram o concreto o segundo material mais consumido pelo ser humano, após a água, segundo Mehta e Monteiro (2014).

O cimento Portland, componente fundamental do concreto, é produzido através da sinterização de rochas calcárias em um processo industrial que resulta em emissões significativas de dióxido de carbono (CO_2). Estas emissões representaram somente em 2018 aproximadamente $1,50 \pm 0,12$ Gt de CO_2 lançados na atmosfera (ANDREW, 2019). Tais emissões ocorrem durante a queima de combustíveis fósseis para fornecer energia ao processo de sinterização, bem como devido à descarbonatação do calcário. Além dessas emissões associadas ao processo de produção do cimento Portland, é importante ressaltar que a extração de matérias-primas virgens, como o calcário, argila, minério de ferro e gipsita também são necessárias para sua fabricação (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Segundo Srividya et al. (2022), nos últimos anos tem ocorrido avanços no desenvolvimento de novos materiais de construção em alternativa ao cimento Portland, como os cimentos álcali-ativados. Palomo, Grutzeck e Blanco (1999) definem a ativação alcalina como o processo químico de transformação de estruturas vítreas, parcialmente ou totalmente amorfas, em um composto cimentante e bem compactado.

O principal diferencial da utilização do cimento álcali-ativado em relação ao cimento Portland está relacionado com as características mais sustentáveis que este material apresenta. Segundo Neupane (2022), os pilares ambientais são atribuídos à baixa emissão de gases do efeito estufa, utilização de materiais residuais, redução do uso de matéria prima virgem e o aumento da vida útil das estruturas.

O cimento álcali-ativado pode ser produzido a partir de materiais naturais ou artificiais considerados residuais em outras indústrias, se tornando uma ferramenta eficaz para o gerenciamento e destinação adequada de grandes quantidades de resíduos (SHEHATA et al., 2022). Além de não ser necessária a extração de matéria

prima virgem, dispensam o processo de sinterização no seu processo produtivo, principal fonte de CO₂ na produção do cimento tradicional.

Provis (2018) afirma que a diversidade de materiais com a possibilidade de serem utilizados como precursores é uma ótima oportunidade para o desenvolvimento dos cimentos ativados por álcalis, por não ser necessário a competição com o cimento Portland por matéria-prima. No entanto, Garcia-Lodeiro, Palomo e Fernández-Jiménez (2015a) afirmam que a variação do material de origem pode influenciar no processo de polimerização e no desenvolvimento da microestrutura dos ligantes obtidos, o que resulta em propriedades e estruturas distintas. Cabe ressaltar que os traços desenvolvidos em uma determinada condição podem não ser aplicáveis a outras situações, devido à extensa variedade de matérias-primas com potencial de utilização.

Os materiais álcali-ativados possuem características para atuar em diversos cenários, com condicionantes e finalidades diferentes, como em ambientes hostis, com a presença de sulfatos, submetidos a altas temperaturas e na imobilização de metais, além de contribuir em 12 dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável estabelecidos pela Assembleia Geral das Nações Unidas (HASSAN; ARIF; SHARIQ, 2019; SHEHATA et al., 2022). As propriedades mecânicas e de durabilidade dos álcali-ativados, muitas vezes, apresentam desempenho similar ou superior ao cimento convencional, tendo em vista as limitações do cimento Portland em ambientes com a presença de enxofre (ARBI et al., 2016; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A; PALOMO, 2009; PALOMO et al., 1999; PINTO, 2004; PROVIS, 2018; ZHAO; SANJAYAN, 2011).

Segundo Hassan, Arif e Shariq (2019), a capacidade de resistência ao contato com sulfatos e ácidos torna o concreto álcali-ativado uma alternativa para a confecção de tubos de concreto para ser empregado no esgotamento sanitário e aplicações marinhas subaquáticas. Outras aplicações para este material são relacionadas a estruturas de concreto, blocos de construção e de pavimentação (SRIVIDYA et al., 2022).

O marco da utilização de cimentos álcali-ativados em escala industrial ocorreu na construção do aeroporto de Brisbane West Wellcamp Airport - Austrália, onde foram utilizados 40.000 m³ de concreto, tendo uma produção 120 m³/h de concreto. O material, à base de cinza volante e escória de alto-forno, apresentou versatilidade

ao ser utilizado em diferentes condições climáticas e de duração de concretagem, variando de 2 °C a 40 °C e 5 min a 20 min, respectivamente. A alta resistência à tração na flexão, a baixa retração e boa trabalhabilidade foram algumas das propriedades destacadas ao utilizar os cimentos álcali-ativados neste projeto, além de ter sido evitada a emissão de 8.640 toneladas de CO₂ (GLASBY et al., 2015).

As rochas vulcânicas ácidas, como o vidro vulcânico, se tornaram atraentes para a aplicação como material precursor devido a sua microestrutura amorfa, o alto teor de sílica e alumina, além da sua ampla disponibilidade na crosta terrestre, que foram utilizadas até mesmo pelos romanos antigos para a produção de cimentos e concretos (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014). No Brasil, está situada uma das maiores manifestações basálticas do mundo, com um volume aproximado de 600.000 km³. Dentro dessa formação rochosa, cerca de 2,5% a 3% consiste em rochas ácidas com alto teor SiO₂, apresentando potencial de exploração como material precursor dos cimentos álcali-ativados (NARDY, MACHADO, OLIVEIRA, 2008; NARDY, et al, 2011; POLO, 2014; POLO et al., 2018).

Robayo-Salazar e Gutiérrez (2018) compilaram estudos que utilizaram pozolanas naturais de origem vulcânica na produção de cimentos álcali-ativados e concluíram que os resultados obtidos demonstram potencial na sua utilização como material precursor. Contudo, Staudt (2019) observou no seu estudo com vidros vulcânicos, um comportamento de desintegração das amostras ao entrar em contato com a água. Segundo Koppe (2021), este comportamento de deterioração registrado pode estar relacionado com a formação de géis instáveis devido ao baixo teor de Al³⁺ disponível no processo de polimerização do material, resultando em redes fracamente formadas, associadas com um comportamento mecânico pobre.

As rochas vulcânicas ácidas apresentam predominantemente elevada razão molar SiO₂/Al₂O₃, devido à baixa fração de Al₂O₃ reativo. Para empregar os vidros vulcânicos como matéria-prima na produção de materiais cimentícios álcali-ativados, é essencial disponibilizar uma fonte alternativa de Al³⁺ ou de outro modificador de rede, como Ca²⁺ e Mg²⁺. Caso contrário, não será possível alcançar resultados satisfatórios no que diz respeito ao desempenho mecânico e, até mesmo, à consolidação da microestrutura do material (KOPPE, 2021).

O estudo conduzido por Koppe (2021) teve como objetivo investigar os efeitos da adição de cálcio à composição do material precursor, derivado de rochas

vulcânicas ácidas, com o propósito de mitigar os processos de deterioração quando exposto à água. Nos ensaios iniciais, ficou evidente que o alumínio não possuía a reatividade necessária para estabilizar o material, sendo, portanto, removido da pesquisa. Embora a inclusão de óxido de cálcio tenha apresentado resultados promissores, há indícios de que o teor de 10% adicionado pode não ter sido suficiente para uma estabilização completa do produto formado, o que sugere a necessidade de novos estudos para determinar a proporção ideal de óxido de cálcio para a consolidação e estabilização adequadas da matriz cimentícia.

O comportamento de deterioração observado por Staudt (2019) e Koppe (2021) em amostras de pasta de cimento álcali-ativado à base de rochas vulcânicas ácidas, mantidas em contato com água, surge como um ponto de atenção referente à durabilidade do material. Somado a isso, é necessário que o desenvolvimento do material seja estruturado para que tenha baixo impacto ambiental; caso contrário, pode ocasionar um aumento nas emissões em relação ao produto à base de cimento Portland (DAVIDOVITS, 2015; GARCES et al., 2021; HABERT et al., 2011; PROVIS, 2014; PROVIS, 2018; TURNER; COLLINS, 2013).

Nesse contexto, os desafios relacionados à composição do material precursor e à dosagem do ativador alcalino demandam estudos mais aprofundados para validar o desempenho do produto, possibilitando assim sua adoção em nível nacional. Contudo, os materiais álcali-ativados apresentam indícios que respaldam sua viabilidade como alternativa ao cimento Portland, e a produção de blocos de concreto é uma oportunidade significativa. Isso ocorre devido ao uso frequente de cimento Portland com elevado teor de clínquer na produção de blocos de concreto, o que resulta em um maior impacto ambiental. Nesse sentido, o presente estudo buscou validar o potencial de produção de blocos de concreto álcali-ativados utilizando rochas vulcânicas ácidas como matéria-prima em escala industrial, avaliando sua viabilidade técnica, ambiental e econômica.

1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O estudo destina-se a avaliar a viabilidade técnica, econômica e ambiental do processo produtivo dos blocos de concreto em planta industrial utilizando cimento álcali-ativado à base de rocha vulcânica ácida como aglomerante. A pesquisa está limitada ao uso de um material precursor para a obtenção do cimento álcali-ativado,

tendo em vista a ampla suscetibilidade de variações nas propriedades do material devido à sua composição química. Assim, adotou-se o vidro vulcânico, em específico, devido à disponibilidade local da matéria-prima e os resultados promissores obtidos em estudos anteriores realizados pelo grupo (STAUDT, 2019; KOPPE, 2021) com este material, incluindo a utilização de óxido de cálcio para ajustes na sua composição química, sendo ativado por soluções à base de hidróxido de sódio.

1.2 PROBLEMA

A crescente demanda por matérias primas para a construção civil tem aumentado a necessidade de desenvolvimento de novos materiais com menor impacto ambiental. Os cimentos álcali-ativados surgem como uma alternativa ao cimento Portland, cuja produção é responsável por 7% das emissões globais de CO₂, além de demandar a extração de matéria virgem (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Os materiais ativados por álcalis têm o potencial de serem produzidos a partir de resíduos industriais e agrícolas, como cinzas volantes, escórias, cinza de casca de arroz e resíduos de construção e demolição. Isso permite transformar esses resíduos em coprodutos para a construção civil, reduzindo o consumo energético, emissões de CO₂ e a extração de materiais não renováveis (SHEHATA et al., 2022).

Neste cenário, o presente estudo pretende contribuir com o desenvolvimento e validação de uma alternativa ao setor da construção civil para reduzir os impactos ambientais através da utilização de materiais mais amigáveis ao meio ambiente. Apresenta-se assim, a oportunidade de desenvolver blocos de concreto utilizando cimentos álcali-ativados em substituição ao cimento Portland, com produção em escala real, sob os aspectos técnicos de desempenho e com análise sobre os impactos ambientais gerados e seus custos de produção.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho é avaliar a viabilidade técnica, ambiental e de custos da produção de blocos de concreto para alvenaria, produzidos em escala industrial, utilizando o cimento álcali-ativado à base de vidro vulcânico como ligante.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Obter o produto viável mínimo (*Minimum Viable Product*) do bloco de concreto em escala industrial utilizando o cimento álcali-ativado à base de vidro vulcânico como ligante;
- b) Caracterizar o desempenho técnico dos blocos de concreto;
- c) Obter indicadores ambientais relacionados à emissão de CO₂ e à energia incorporada no processo de produção;
- d) Obter indicador de custo de produção dos blocos de concreto.

1.4 JUSTIFICATIVA

Os cimentos álcali-ativados surgem como uma alternativa de reduzido impacto ambiental ao cimento Portland, por apresentar características de comportamento e de desempenho compatível com os requisitos consolidados na construção civil, acrescentando a possibilidade de ser produzido a partir de uma ampla variedade de materiais naturais e residuais. Segundo Hassan, Arif e Shariq (2019), o concreto álcali-ativado apresenta potencial para uso em aplicações comerciais, devido à sua maior durabilidade e propriedades de resistências mecânica, química e térmica.

No entanto, foi observado por Staudt (2019) um comportamento deletério em amostras de pasta de cimento produzidas com rochas vulcânicas ácidas quando em contato com água, indicando um ponto de atenção referente à durabilidade do material em desenvolvimento. No estudo desenvolvido por Koppe (2021), foi analisada a influência da adição de 10% CaO na composição do material precursor a partir de rochas vulcânicas ácidas visando a mitigação do mecanismo de

deterioração e foram obtidos resultados positivos. Porém, o fenômeno de degradação da matriz cimentícia não foi completamente estabilizado em algumas misturas, demandando a validação e o monitoramento dos teores de correção da composição química do material.

Segundo Almutairi et al. (2021), a utilização de concreto álcali-ativado é facilitada em aplicações pré-fabricadas devido à possibilidade de maior controle das condicionantes de produção, além de viabilizar a realização do processo de cura térmica, quando necessário. Somado a este fato, o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável [2022?], indica que os ligantes com alto teor de clínquer são prioritariamente utilizados na produção de blocos de concreto, tendo como justificativa a demanda pelo ganho de resistência nas horas iniciais. Neste contexto, a produção de blocos de concreto álcali-ativados se torna uma oportunidade para a inserção do material no mercado da construção civil.

Conforme observado por Ganjian, Jalull e Sadeghi-Pouya (2015), a redução ou substituição do consumo de cimento Portland por outros aglomerantes com baixa emissão de dióxido de carbono durante sua produção pode resultar em uma significativa redução na pegada ecológica do concreto. No entanto, é importante destacar que a determinação de indicadores ambientais para os produtos álcali-ativados é complexa devido à sua suscetibilidade a diversas variáveis na cadeia produtiva, o que pode afetar sua viabilidade ambiental.

A linha de pesquisa desenvolvida por Staudt (2019) e Koppe (2021) esteve limitada a produção de pastas de cimento álcali-ativada em escala laboratorial, com ênfase em analisar o potencial de utilização de diferentes precursores vulcânicos, observando o comportamento mecânico e de estabilidade estrutural do material em contato com a água. O conhecimento referente à viabilidade ambiental e financeira era, até então, desconhecido, sem apresentar indicadores de desempenho nestas áreas.

Neste contexto, de maneira pioneira, este estudo tem como objetivo contribuir para o desenvolvimento do conhecimento sobre a produção em escala industrial de blocos de concreto álcali-ativado à base de vidro vulcânico. Isso envolve a transição do nível laboratorial para a produção comercial, seguindo especificações e requisitos normativos. Além disso, visa apresentar e consolidar a análise de indicadores de

emissão de dióxido de carbono e de energia incorporada ao produto, juntamente com a perspectiva de custo de produção.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

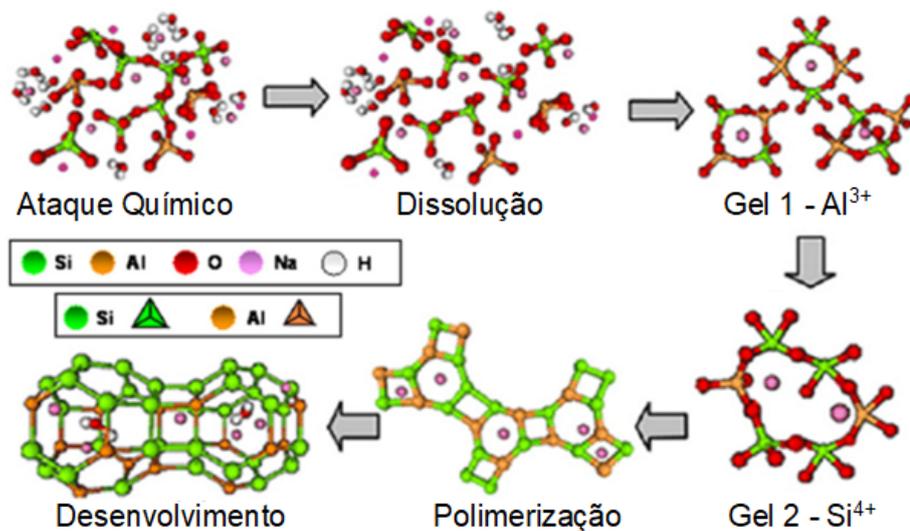
Neste capítulo é apresentada uma revisão da literatura referente aos principais aspectos para o entendimento do funcionamento dos cimentos álcali-ativados e suas limitações, incluindo mecanismos de formação, materiais precursores – com foco nos vidros vulcânicos da região, ativadores alcalinos, produção e durabilidade, além de questões relacionadas ao seu impacto ambiental e análise de custos.

2.1 MATERIAIS CIMENTÍCIOS ÁLCALI-ATIVADOS

Os cimentos álcali-ativados são constituídos basicamente por dois componentes principais, o material precursor e o ativador alcalino, e a combinação desses dois elementos podem interferir nas propriedades finais do material. Segundo Shi, Fernández-Jiménez e Palomo (2011), diferentes materiais podem dar origem aos materiais álcali-ativados, como as escórias industriais, o metacaulim, as cinzas volantes, as argilas calcinadas, os vidros vulcânicos, as pozolanas naturais e as zeólitas. A produção dos ativadores alcalinos, segundo Provis (2009), é realizada principalmente a partir dos silicatos e hidróxidos de sódio e potássio, mas podem ser utilizados carbonatos e aluminatos para ativar o material precursor.

Garcia-Lodeiro, Palomo e Fernández-Jiménez (2015) descrevem o início do processo de formação da matriz álcali-ativada como sendo um ataque alcalino em materiais amorfos de aluminossilicatos, que acabam estabilizando e endurecendo, produzindo, assim, um material com propriedades ligantes. O processo é iniciado pela dissolução das partículas sólidas dos aluminossilicatos promovido pela ação do ativador alcalino em contato com o material precursor, formando, em um primeiro momento, um gel predominantemente composto por íons de Al e posteriormente ocorrendo à dissolução dos íons de Si. Com a formação do gel é desencadeado o mecanismo de polimerização, onde é formada uma rede polimérica tridimensional responsável pelo desenvolvimento de resistência à compressão e pela variação nas propriedades da matriz cimentícia (DUXSON et al., 2007; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2009). A Figura 1 representa o detalhamento das etapas da reação de formação da microestrutura dos materiais álcali-ativados.

Figura 1 - Detalhamento do processo de formação da microestrutura dos materiais álcali-ativados



Fonte: adaptado de Shi, Jiménez e Palomo (2011)

Estudos realizados por Rattanasak e Chindaprasirt (2009) sugerem que o processo de polimerização é iniciado com a formação do gel em formato coloidal, com dimensões inferiores a 1 μm até 20 μm e, conforme o gel vai sendo formado, a matriz cimentícia se torna mais densa conferindo as propriedades mecânicas. O gel inicial é rico em Al devido à alta concentração de Al^{3+} nas idades iniciais da pasta. Isso ocorre, pois o alumínio é mais reativo que o silício, onde as ligações Al-O são mais fracas que Si-O, no entanto, o desenvolvimento de resistência à compressão inicia de fato com a formação do gel de Si (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ et al., 2006; GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015a).

Segundo Hassan, Arif e Shariq (2019), quando ocorre a dissolução de Si em larga escala, a estrutura do gel se reorganiza formando o gel precursor da zeólita (gel 2), este gel é mais estável que a etapa anterior com a presença somente de Al, pois a ligação Si-O apresenta ligação mais resistentes que a ligação Al-O. Esse processo de reorganização resulta na formação de zeólitas cristalizadas, formando uma estrutura sólida similar a estrutura formada no processo de hidratação do cimento Portland.

Srividya e Rajkumar (2022) definem os materiais álcali-ativados como um polímero inorgânico de aluminossilicato amorfo, compreendido por uma unidade básica de silício e outra de alumínio, ligados por átomos de oxigênio em forma tetraédrica. Durante o processo de polimerização ocorre a substituição do Si^{4+} por

Al^{3+} , fazendo com que o cátion do ativador alcalino realize o balanço de carga da estrutura $-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-$ formada.

Os principais parâmetros monitorados no desenvolvimento de um material álcali-ativado estão relacionados à relação molar $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, à quantidade de água adicionada, às condições de cura e às características do ativador alcalino. Isso inclui o tipo de modificador de rede utilizado (Na, K ou Ca), a molaridade e a relação $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ durante a produção do material (HASSAN; ARIF; SHARIQ, 2019; SRIVIDYA; RAJKUMAR, 2022). Além disso, o precursor utilizado na produção do cimento álcali-ativado também exerce influência no resultado das reações químicas, levando em consideração sua origem, composição química e estrutural.

Uma ampla gama de materiais, tanto naturais quanto artificiais, pode ser utilizada como fonte precursora para a produção de cimentos álcali-ativados, como rochas vulcânicas e cinzas volantes. Um requisito fundamental é a capacidade de fácil dissolução de alumina e sílica em ambientes com alto pH (ALLAHVERDI; KANI, 2013; GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015a; PROVIS, 2018). As propriedades químicas e físicas dos materiais utilizados na produção dos cimentos álcali-ativados exercem grande influência na evolução das reações químicas e no desenvolvimento da microestrutura. Ou seja, pequenas alterações em sua composição podem gerar alterações nas propriedades finais dos materiais álcali-ativados. Neste contexto, abre-se a possibilidade do desenvolvimento de matrizes cimentícias com propriedades específicas para cada uso. Todavia, algumas alterações na composição química, podem ocasionar efeitos deletérios ao produto, como a sua desintegração ao entrar em contato com a água (WALKLEY et al., 2016).

A ampla variedade de insumos vem sendo estudado e a forte influência do teor de cálcio na nanoestrutura dos produtos álcali-ativados resultaram em uma classificação dos precursores de acordo com o seu teor de cálcio: alto teor de cálcio e os de baixo teor de cálcio. Na Tabela 1 podem ser observados os produtos de reações formadas por cada grupo de precursor (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015a; PROVIS; PALOMO; SHI, 2015).

Tabela 1 - Comparação das reações dos cimentos

Reações	Cimento Portland	Cimentos ativados por álcalis	
		Alto teor de Cálcio (Na, K) ₂ O-CaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ -H ₂ O	Baixo teor de Cálcio (Na, K) ₂ O-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ -H ₂ O
Primárias	C-S-H	C-A-S-H	N-A-S-H
	Ca(OH) ₂	CH ₂₄ Al ₂ Mg ₆ O ₂₃	Na ₄ (Al ₃ (OH)(SiO ₄) ₃)
Secundárias	3C ₄ AS ₃ H ₁₈	Mg ₆ Al ₂ CO ₃ (OH) ₁₆ ·4H ₂ O	(NaAlO ₂) ₇ (SiO ₂) ₉
	C ₆ AS ₃ H ₃₂	C ₄ AH ₁₃ CASH ₈	(K ₂ ,Na ₂) ₂ [Al ₂ Si ₄ O ₁₂] ₂ ·12H ₂ O
		C ₄ AcH ₁₁ C ₈ Ac ₂ H ₂₄	(Na ₂ , Mg) ₂₉ [Al ₅₈ Si ₁₃₄ O ₃₈₄] ₂₄₀ H ₂ O

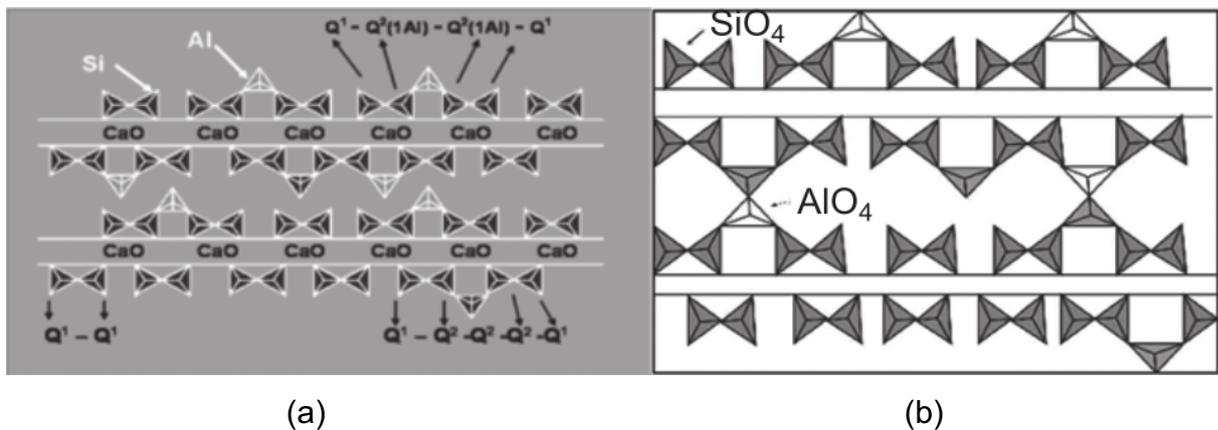
Nota: C = CaO, S = SiO₂, A = Al₂O₃, N = Na₂O, H = H₂O, c = CO₂

Fonte: adaptado de Garcia-Lodeiro, Palomo e Fernández-Jiménez (2015a)

Segundo Garcia-Lodeiro, Palomo e Fernández-Jiménez (2015a), os materiais precursores compostos por (Na, K)₂O-CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O são pertencentes a classe de alto teor de cálcio, onde SiO₂ + CaO correspondem a mais de 70% da sua composição, enquanto Provis e Bernal (2014) classificam os materiais alto teor de cálcio como sendo os sistemas que apresentam a relação Ca/(Si+Al) aproximadamente igual a 1. Esses precursores, como por exemplo, a escória de alto-forno, são ativados em condições alcalinas moderadas, tendo como principal produto a formação do aluminossilicato de cálcio hidratado (C-A-S-H) em forma de gel (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015a).

O C-A-S-H formado é estruturalmente similar ao C-S-H, formado na hidratação do cimento Portland. A diferença entre as duas estruturas se dá pela presença do Al, que torna as cadeias lineares mais longas e formam as ligações cruzadas de Si-O-Al, transformando a estrutura em bidimensional. Na Figura 2(a) é possível observar a cadeia linear e na Figura 2(b) a presença das ligações cruzadas entre as camadas (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015a).

Figura 2 - Modelo estrutural do C-A-S-H: (a) Cadeia linear; (b) Cadeia com ligações cruzadas.

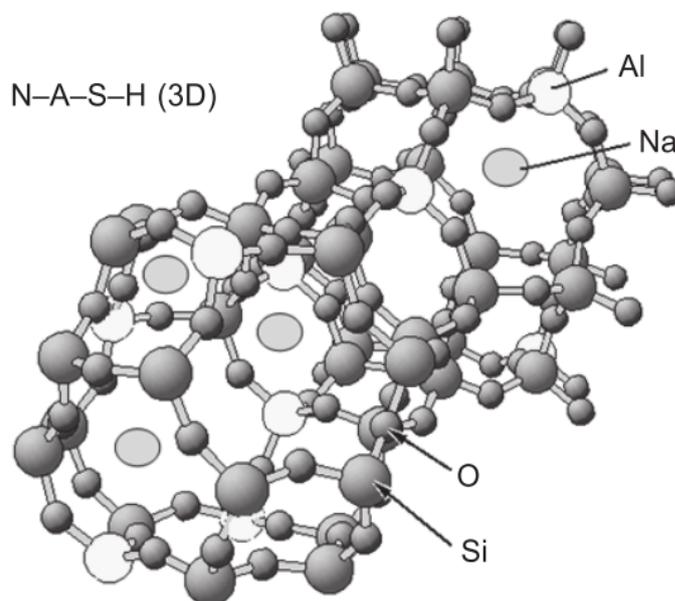


Fonte: adaptado de Garcia-Lodeiro, Palomo e Fernández-Jiménez (2015a)

Já os materiais compostos por $(\text{Na}, \text{K})_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ correspondem à classe de baixo teor de cálcio e demandam condições mais severas para que ocorra o início das reações, sendo necessário ativadores alcalinos com maior alcalinidade e, em algumas situações, a realização de cura térmica, que pode variar de $60\text{ }^\circ\text{C}$ a $200\text{ }^\circ\text{C}$. O principal produto formado no mecanismo de ativação é o aluminossilicato de sódio hidratado (N-A-S-H) também em forma de gel (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015a).

A formação do gel N-A-S-H é iniciada com a formação dos monômeros de sílica e de alumina dissolvidos do material de origem, então esses monômeros interagem formando dímeros, posteriormente formam trímeros, tetrâmeros e assim por diante, até precipitar o gel N-A-S-H. A origem do Si não é exclusiva do material precursor, mas também pode ser a partir do ativador alcalino (silicato de sódio, por exemplo), por ser altamente solúvel participa facilmente da formação do gel. O modelo estrutural do gel pode ser observado na Figura 3 (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015a).

Figura 3 - Modelo estrutural do N-A-S-H.



Fonte: adaptado de Garcia-Lodeiro, Palomo e Fernández-Jiménez (2015a)

Segundo Criado et al. (2008), a nanoestrutura do gel N-A-S-H consiste em uma rede polimérica de aluminossilicato reticulado similar ao gel C-A-S-H, composta por dois tipos de ligações Si-O, ponte e terminal. Ainda segundo os autores, a formação da microestrutura é influenciada pelo ativador alcalino utilizado, sendo responsável fundamental na cinética da estrutura e composição inicial do gel formado, e pelas condicionantes do método de cura aplicado no material, que torna a sua formação mais ordenada com predominância de ligações ponte, tornando-a mais estável.

O gel N-A-S-H é caracterizado pela estrutura tridimensional, onde os tetraedros de SiO_4 e AlO_4 estão conectados por oxigênios, enquanto os cátions (Na^+ ou K^+) realizam o balanceamento das cargas negativa, como pode ser observado na Tabela 2. No entanto, as relações molares Si/Al estabelecem alterações na microestrutura dos materiais, assim como o grau de polimerização e da temperatura de cura geram alterações na estrutura (DAVIDOVITS, 2008; GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015a).

Tabela 2 - Estrutura do N-A-S-H

Reação Si/Al	Polímero Formado	Estrutura
1	Polissialatos (-Si-O-Al-O-)	
2	Polissialatos-siloxo (-Si-O-Al-O-Si-O)	
3	Polissialatos-disiloxo (-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O)	
>3	Sialato combinado	

Fonte: adaptado de Davidovits (2008)

A combinação dos dois sistemas supracitados é uma possibilidade, que pode ser resultado da combinação do cimento Portland, cinza volante e as escórias ou a partir da combinação de escória de alto-forno e cinzas volantes. Os produtos das reações de ativação dos cimentos híbridos são resultado da interação entre o C-A-S-H e o N-A-S-H, sendo mais complexos de descrever, quando comparadas com suas formas independentes (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015a).

Uma das principais diferenças entre a estrutura formada pelo processo de hidratação do cimento Portland e a estrutura de polimerização dos cimentos alcali-ativados, é que, em matrizes ativadas por álcalis a água de mistura não tem ligação química com a estrutura da matriz. A água é encontrada na estrutura de poros do gel, que origina uma série de nano e macro poros, dependendo da composição química e das condições de cura térmica das amostras (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015a).

2.1.1 Materiais Precursores

Os materiais álcali-ativados são originados a partir da polimerização da sílica e da alumina em soluções alcalinas, com isso qualquer fonte que dissolva Si e Al amorfo de forma fácil em ambiente com alto pH (12,5 a 14) pode ser considerada precursor para os cimentos ativados por álcalis. A partir dessas características, inúmeros aluminossilicatos considerados resíduos industriais, assim como materiais naturais apresentam potencial de utilização, como: pozolanas naturais, escória de alto forno, cinzas volantes, argilas calcinadas e vidros vulcânicas, podendo, também, ocorrer a combinação de dois ou mais precursores (ALLAHVERDI; KANI, 2013; GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015a; PROVIS, 2018).

A incorporação de subprodutos industriais desempenha um papel fundamental na redução do consumo de energia e na mitigação das emissões de CO₂, sendo um foco importante no desenvolvimento de cimentos álcali-ativados, incluindo sua aplicação na produção de blocos de concreto. Essa prática não apenas contribui para a gestão sustentável de resíduos industriais, como os gerados na queima da casca de arroz para produção de energia, que, quando tratada adequadamente, pode se tornar uma fonte de energia mais ecológica, mas também demonstra a interconexão entre diferentes setores industriais na busca por soluções mais sustentáveis. Além disso, materiais residuais provenientes de processos de construção e demolição, ricos em aluminossilicatos, mostram-se como alternativas promissoras como precursores na produção de cimentos álcali-ativados (DE SILVA; PRIYAMALI, 2022; ROBAYO-SALAZAR; RIVERA; GUTIÉRREZ, 2017; SRIVIDYA; RAJKUMAR, 2022).

Provis (2018) afirma que a possibilidade de utilizar uma ampla variedade de materiais é uma ótima oportunidade para o desenvolvimento dos cimentos ativados por álcalis, por existir a possibilidade de não entrar em competição com o cimento Portland por matéria-prima. No entanto, Garcia-Lodeiro, Palomo e Fernández-Jiménez (2015a) afirmam que a variação do precursor pode influenciar no processo de polimerização e no desenvolvimento da microestrutura dos ligantes obtidos, o que resulta em propriedades e estruturas distintas.

As cinzas vulcânicas, pequenas partículas de rocha e vidros pulverizados durante erupções vulcânicas, que inicialmente foram utilizadas pelos romanos antigos para a produção de cimentos e concretos, começam a ser estudados como

uma alternativa de material precursor na produção de materiais álcali-ativados. A sua microestrutura amorfa altamente reativa, devido ao processo de resfriamento brusco no qual foi submetido, e o teor de alumina e sílica a tornam atraente para o mecanismo de ativação alcalina (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014).

Segundo Provis e Van Devender (2014), as cinzas vulcânicas são geralmente compostas em maior quantidade por SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 e CaO , em menor quantidade e por óxidos como MgO , Na_2O , K_2O e TiO_2 , além da presença de inúmeros elementos traços. Segundo Provis e Van Deventer (2014), os materiais pozolânicos naturais provenientes da Europa, Irã e África apresentam bom desempenho na ativação alcalina. No Brasil, ocorre a presença da Província Magmática do Paraná (Figura 4), considerada uma das maiores formações basálticas do mundo, com cerca 600.000 km^3 de rochas vulcânicas. O derramamento se estende por estados do sul e centro-oeste do Brasil, totalizando 917.000 km^2 de extensão. Embora, apenas de 2,5% a 3% consiste em rochas ácidas com alto teor SiO_2 , apresentando potencial de exploração como material precursor dos cimentos álcali-ativados (NARDY, MACHADO, OLIVEIRA, 2008; NARDY, et al, 2011; POLO, 2014; POLO et al., 2018).

Figura 4 – Distribuição da Província Magmática do Paraná na América do Sul.



Fonte: adaptado de Machado et al. (2005)

No estudo desenvolvido por Koppe (2021), foram caracterizadas amostras de rochas vulcânicas ácidas de três localidades: Caxias do Sul e Tainhas, no estado do Rio Grande do Sul, e Timbé do Sul em Santa Catarina. Na Tabela 3 são apresentados os resultados da análise química quantitativa das amostras, na qual a concentração de SiO₂ encontra-se na faixa de 65%, enquanto a concentração de Al₂O₃ é de 13%. Os elementos CaO e MgO, que também podem participar das interações químicas na formação dos produtos ativados por álcalis, estão presentes nas amostras variando de 3,6% a 4,13% de CaO e 0,53% a 1,12% de MgO.

Tabela 3 - Análise química quantitativa por FRX das rochas vulcânicas ácidas usadas no estudo de Koppe (2021).

Compostos (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Na ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	MnO	P.F	Total
Caxias do Sul	64,25	13,21	7,49	2,85	4,13	1,12	0,82	1,12	0,24	0,12	4,35	99,7
Tainhas	65,09	13,77	6,19	3,77	3,6	0,97	1,56	0,66	0,27	-	3,75	99,64
Timbé do Sul	64,16	13,33	6,55	4,12	3,73	1,01	0,22	0,53	0,25	0,1	6,03	100,03

Fonte: adaptado de Koppe (2021)

No estudo de Staudt et al. (2017), foi realizada a análise petrográfica em três amostras de vidro vulcânico. As amostras apresentaram composição mineralógica similar, sendo compostas por plagioclásio, clinopiroxênio e minerais opacos, além de uma das amostras apresentar intrusão de sedimento na sua matriz. Na caracterização petrográfica realizada por Koppe (2021), foram identificadas cinco fases cristalinas de augita, cristobalita low e andesina, representam a maior parcela cristalina do precursor, além da presença de pigeonita e quartzo, constituindo menos de 2% da amostra. Embora as fases cristalinas identificadas sejam as mesmas nos três materiais, há uma variação nos percentuais correspondentes a cada fase, conforme apresentado na Tabela 4.

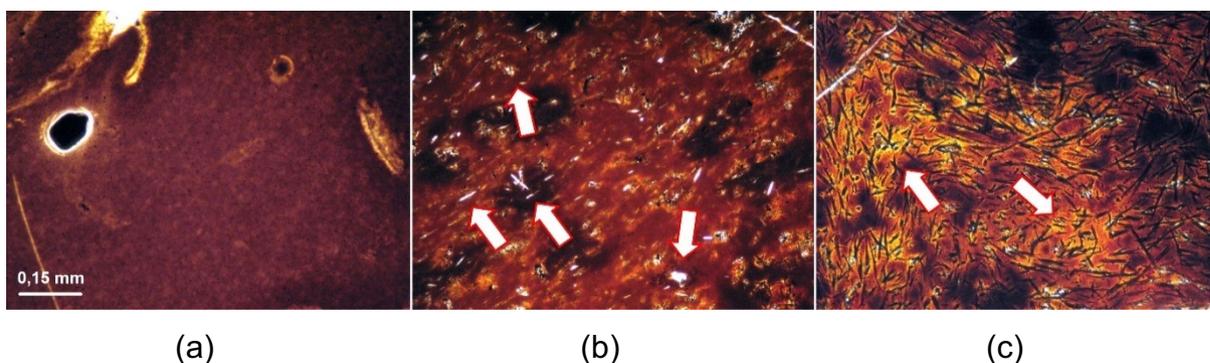
Tabela 4 – Análise das fases cristalinas por DRX em rochas vulcânicas ácidas

Fase (% em peso original)	Andesina	Quartzo	Augita	Pigeonita	Cristobalita low	Amorfo
Caxias do Sul	9,289	0,552	12,335	1,18	11,248	65,4
Tainhas	36,104	0,728	8,601	8,167	5,399	41
Timbé do Sul	28,601	0,289	7,827	10,377	2,528	50,38

Fonte: adaptado de Koppe (2021)

As lâminas petrográficas observações por Staudt et al. (2017) revelaram diferentes graus de amorfismo e a presença de distintas fases cristalinas em amostras de três rochas vulcânicas ácidas. A Figura 5(a) mostra a lâmina petrográfica da obsidiana, um vidro vulcânico com alto grau de amorfismo e ausência de cristais visíveis na escala analisada. Já o vidro parcialmente devitrificado é representado na Figura 5(b), onde foram identificados alguns cristálitos incolores e prismáticos envoltos pela matriz vítrea. Na Figura 5(c), é possível observar uma abundância de cristálitos aciculares, por vezes triquíticos, por toda a lâmina, indicando uma devitrificação avançada na matriz vítrea.

Figura 5 - Análise petrográfica de vidros vulcânicos: a) vidro vulcânico; b) vidro parcialmente devitrificado; c) vidro devitrificado.



Fonte: adaptado de Staudt et al. (2017)

Koppe (2021) caracterizou o percentual vítreo de amostras de rochas vulcânicas ácidas, obtendo uma variação correspondente a 50,38% e 65,40% entre as amostras e, na sequência, calculou o quantitativo da composição reativa à ativação alcalina, apresentadas na Tabela 5. Como resultado, a autora esboça que a rocha coletada em Caxias do Sul apresentou maior potencial para a ativação alcalina, por indicar uma maior proporção de SiO_2 e Al_2O_3 na forma amorfa, enquanto as amostras de Tainhas e Timbé do Sul apresentam valores elementares passíveis à ativação similares entre si.

Tabela 5 – Quantificação da fração reativa de vidros vulcânicos

Material	Fase amorfa (%)	SiO₂ amorfo (%)	Al₂O₃ amorfo (%)	SiO₂/Al₂O₃ (razão Molar)
Caxias do Sul	65,4	47,85	8,7	9,34
Tainhas	41	38,34	4,76	13,66
Timbé do Sul	50,38	38,93	5,21	12,69

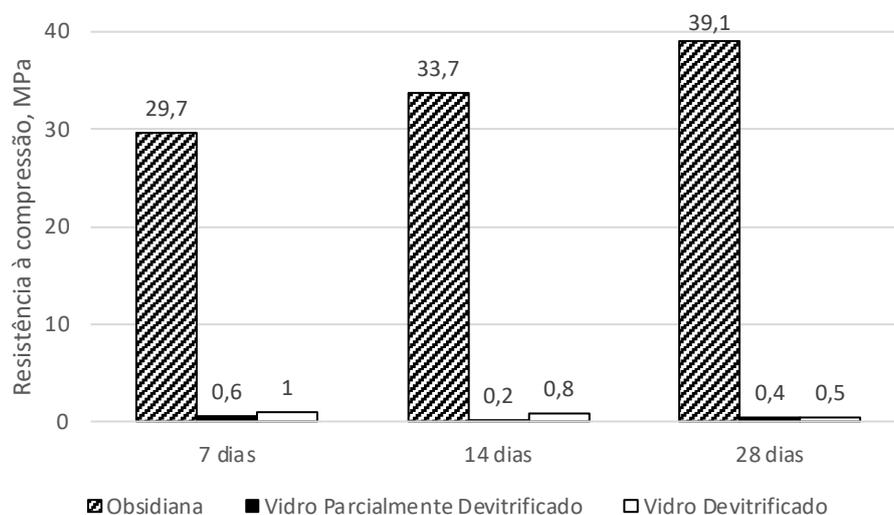
Fonte: adaptado de Koppe (2021)

Segundo Provis e Van Deventer (2014), o amorfismo característico das cinzas vulcânicas e o alto teor de sílica não cristalina explicam a dissolução deste material em solução alcalina, levando a processos de reação similares aos observados com o metacaulim e as cinzas volantes. No entanto, segundo Koppe (2021), os elementos SiO₂ e Al₂O₃, quando encontrados em fase cristalina não indicam participar da polimerização da microestrutura do material, tornando-se possivelmente inertes, atuando simplesmente como enchimento em misturas do ligante.

Lemougna et al. (2014) afirmam que a adequabilidade das cinzas vulcânicas como material precursor não depende da composição química da rocha, mas da porção química amorfa que a constitui. Corroborando com essa colocação, Robayo-salazar e Gutiérrez (2018) acrescentam que, além da fase vítrea, a relação molar SiO₂/Al₂O₃ e o tamanho das partículas também influenciam na reatividade do material.

No estudo conduzido por Staudt et al. (2017) foi destacada a influência do grau de amorfismo no desenvolvimento de resistência em amostras de vidro vulcânico. O estudo dividiu as amostras em três grupos: Obsidiana (mais amorfa), Vidro parcialmente devitrificado (amorfismo intermediário) e Vidro devitrificado (menos amorfa). Conforme ilustrado na Figura 6, a obsidiana, por ser mais amorfa, apresentou um melhor desempenho mecânico, entretanto, as demais amostras com processo de devitrificação mais avançado, obtiveram resultados inferiores.

Figura 6 - Análise comparativo da influência do grau de devitrificação de vidros vulcânicos no desempenho mecânico de amostras de pasta de cimento



Fonte: adaptado de Staudt et al. (2017)

Segundo Polo (2014), a devitrificação consiste na nucleação e cristalização de quartzo (ou cristobalita) e feldspato, comumente observado em rochas vulcânicas de composição ácida e intermediária. Este processo ocorre pelo fato de o vidro ser termodinamicamente instável quando submetido a certas circunstâncias durante um determinado período. Estima-se que para ocorrer a cristalização a 300 °C são necessários aproximadamente 1 milhão de anos. Entretanto, aumentando-se a temperatura para 400 °C, esse período reduz para poucas centenas de anos (LOFGREN, 1971; MARSHALL, 1961).

Outro fator que determina a fase de reatividade dos vidros vulcânicos é a condição natural de resfriamento, que, por consequência, depende da temperatura, pressão, velocidade do vento, umidade, entre outros. Por ser um processo natural, sem controle humano, apresenta frações vítreas menores que o metacaulim, cinzas volantes e escórias, que tem o processo de resfriamento controlado (ROBAYO-SALAZAR; GUTIÉRREZ, 2018).

No estudo conduzido por Staudt (2019), uma ampla gama de resistências foi observada entre as várias combinações analisadas com rochas vulcânicas em pastas de cimentos. Algumas amostras não apresentaram desenvolvimento de resistência mecânica ao longo do tempo, enquanto outros desenvolveram resistência nas idades iniciais, mas sofreram queda posterior na resistência mecânica. Notavelmente, uma amostra atingiu uma resistência média de 131,6 MPa,

com um valor máximo de 181,8 MPa e um desvio padrão de 65,9 MPa. Neste cenário, diversas composições de pastas de cimento álcali-ativado apresentaram um comportamento mecânico compatível com as diversas aplicações do cimento Portland na construção civil.

A Tabela 6 fornece uma compilação de resultados de diferentes estudos que utilizaram precursores naturais. Mesmo considerando a variabilidade na composição e na estrutura química desses materiais, a resistência à compressão dos materiais álcali-ativados variou de 37,4 MPa a 181,8 MPa, o que destaca o potencial mecânico do uso de rochas vulcânicas como material precursor.

Tabela 6 - Resistência à compressão, obtidas em diferentes estudos.

Material	Resistência (MPa)	Autor
Cinza Vulcânica	37,4	(DJOBO et al., 2016)
Cinza Vulcânica	41,5	(TCHAKOUTE et al., 2013)
Cinza Vulcânica	50	(TCHAKOUTE et al., 2013b)
Cinza Vulcânica	60	(LEMOUGNA et al., 2013a)
Cinza Vulcânica	80,1	(TAKEDA et al., 2014)
Pozolana Natural	44	(BONDAR et al., 2011b)
Pozolana Natural	47	(MOON et al., 2014)
Pozolana Natural	56,2	(BONDAR et al., 2011a)
Pozolana Natural	81,5	(BONDAR et al., 2011c)
Pozolana Natural	145,2	(NADOUSHAN; RAMEZANIANPOUR, 2016)
Tufo Vulcânico	40,3	(YADOLLAHI; BENLI; DEMIRBOGA, 2015)
Tufo Vulcânico	47,6	(ALLAHVERDI; MEHRPOUR; NAJAFIKANI, 2008)
Tufo Vulcânico	63	(ALLAHVERDI; MEHRPOUR; KANI, 2008)
Vidro Vulcânico	39,1	(STAUDT et al., 2017)
Vidro Vulcânico	181,8	(STAUDT, 2019)
Vidro Vulcânico	93,17	(KOPPE, 2021)

Nota: Resistência à compressão aos 28 dias.

Fonte: adaptado de Staudt (2019)

2.1.2 Ativadores Alcalinos

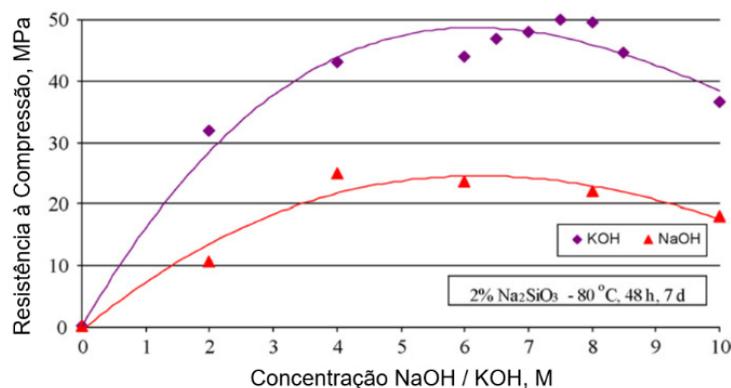
O ativador alcalino é uma solução com um elevado pH, responsável por realizar o ataque químico nas partículas sólidas do material precursor, a fim de que ocorra a dissolução e liberação de Si e Al para que ocorra o desenvolvimento das propriedades mecânicas através do mecanismo de polimerização. Para se obter o desempenho esperado do produto da reação é necessário observar a interação entre o material precursor e o ativador alcalino, pois alguns ativadores alcalinos

terão maior aptidão e eficiência com determinados materiais precursores. Os compostos mais utilizados como ativador alcalino dos materiais com baixo teor de cálcio são os silicatos e hidróxidos, principalmente de Na ou K. Já os materiais precursores com alto teor de cálcio podem ser ativados com eficiência pelo Na_2CO_3 e Na_2SO_4 , podendo também ser utilizado o MgO , CaO e/ou $\text{CA}(\text{OH})_2$ (HASSAN; ARIF; SHARIQ, 2019; PROVIS, 2018).

O estudo conduzido por Lemounga et al. (2013) investigou o impacto da composição dos ativadores alcalinos (KOH e NaOH) na resistência à compressão e nas propriedades termodinâmicas de materiais álcali-ativados produzidos com cinzas vulcânicas. A variação na composição do ativador alcalino não resultou em uma diferença significativa no desempenho mecânico. No entanto, o KOH promoveu materiais com maior estabilidade térmica, enquanto o NaOH acelerou a taxa de reação e resultou em maior resistência após 21 dias.

A cinza volante demonstra melhor dissolução da alumina e da sílica quando tratada com soluções de hidróxido de sódio em comparação com soluções de hidróxido de potássio (PANIAS; GIANNOPOULOU; PERRAKI, 2007; RATTANASAK; CHINDAPRASIRT, 2009). Contudo, pesquisas também mostraram que o hidróxido de potássio (KOH) é mais eficaz em termos mecânicos na ativação da escória do que o hidróxido de sódio (NaOH). Isso é atribuído ao maior tamanho iônico do potássio (K^+), que possui 152 pm em comparação com os 116 pm do sódio (Na^+), favorecendo a formação de oligômeros de silicato devido à sua maior afinidade com o íon $\text{Al}(\text{OH})_4^-$. O comportamento mecânico relacionado a este cenário pode ser observado na Figura 7 (KOMNITSAS; ZAHARAKI; PERDIKATSI, 2009; NADOUSHAN; RAMEZANIANPOUR, 2016).

Figura 7 - Influência do cátion potássio (K) e sódio (Na) no desenvolvimento de resistência à compressão de pastas de cimento utilizando escória como material precursor



Fonte: adaptado de Komnitsas, Zaharaki, Perdikatsis (2009)

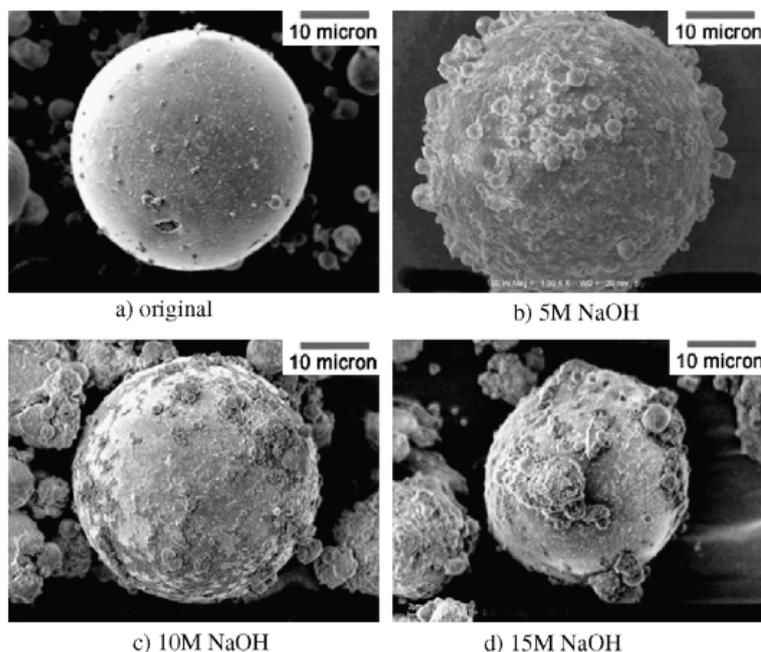
Os cátions presentes no ativador alcalino formam parte da estrutura do gel, neutralizando as cargas negativas referentes aos tetraedros de AlO_4 . As propriedades do material são otimizadas quando a concentração de cátions é suficiente para equilibrar a carga do sistema, pois a presença em excesso pode resultar em lixiviação ou na cristalização de sais solúveis (ALLAVERDI; KANI, 2013; BARBOSA; MACKENZIE; THAUMATURGO, 2000; GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015b).

Entretanto, a composição química e as reações que ocorrem na sintetização das cinzas vulcânicas não são totalmente comparáveis aos demais materiais precursores. Além de equilibrar a carga negativa introduzido pelo Al, o cátion utilizado forma novas fases cristalinas. Ao utilizar NaOH como ativador, o sódio forma sodalita - $\text{Na}_8\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_2$ e natrita - Na_2CO_3 e ao utilizar KOH, ocorre a formação de silicato hidratado de alumínio e potássio - $\text{KAlSiO}_4 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$, resultando em relações molares Na/Al e K/Al maiores que 1 (LEMOUGNA et al., 2013b).

A influência dos ativadores nas propriedades dos materiais álcali-ativados, de maneira geral, é afetada por mudanças em sua composição. O aumento nos parâmetros de dosagem, como molaridade e concentração, tem o efeito de melhorar a dissolução das partículas do material precursor. No entanto, é importante notar que, quando esses parâmetros ultrapassam um limite aceitável pelo sistema, podem prejudicar o desenvolvimento da resistência (ROBAYO-SALAZAR; GUTIÉRREZ, 2018).

No estudo desenvolvido por Rattanasak e Chindaprasirt (2009) pode-se observar a influência da concentração da solução alcalina na taxa de dissolução das partículas de cinza volante. Após 10 min, os autores observaram a diferença na intensidade de dissolução das partículas em diferentes soluções alcalinas, relacionando a facilidade de dissolução do material precursor com a concentração de íons de hidróxido na superfície das partículas (Figura 8). Foi identificado que a maior concentração de NaOH na solução alcalina resulta no aumento da liberação de Si^{4+} e Al^{3+} no período inicial de polimerização do sistema. A presença de Si e Al na solução é essencial para a formação inicial dos oligômeros precursores, principal processo no desenvolvimento de resistência à compressão (PANIAS; GIANNOPOULOU; PERRAKI, 2007).

Figura 8 - Influência da concentração da solução alcalina na taxa de dissolução das partículas de cinza volante

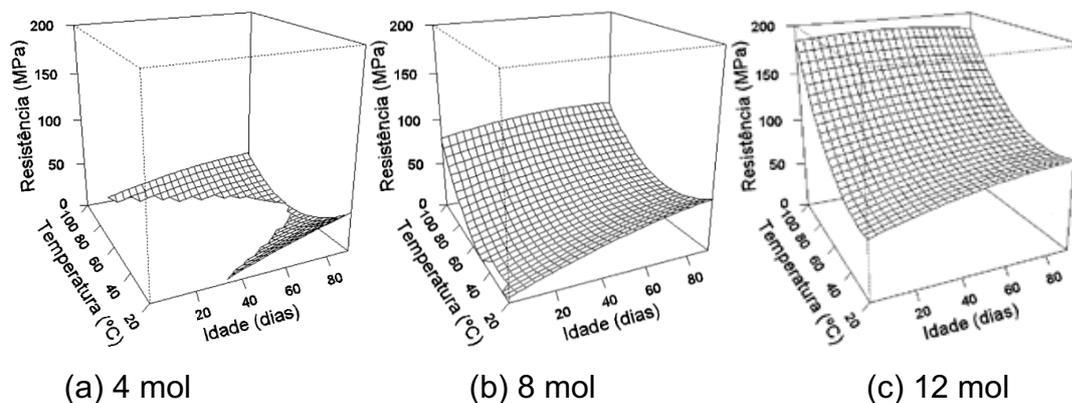


Fonte: adaptado de Rattanasak e Chindaprasirt (2009)

Em concordância com este comportamento, Staudt (2019) observou, através de modelagem matemática, a ocorrência do acréscimo e aceleração no desenvolvimento das propriedades mecânicas ao aumentar a concentração de álcalis no ativador alcalino (Figura 9). A expectativa de resistência à compressão inicial (24 h) das amostras com combinação de 12 molar é de 60 MPa, enquanto a

projeção para início do desenvolvimento de resistência com menor molaridade (4 mol) pode chegar a 91 dias.

Figura 9 - Influência da molaridade na resistência à compressão em amostras com relação solução/aglomerante de 0,45 e o módulo de sílica 2

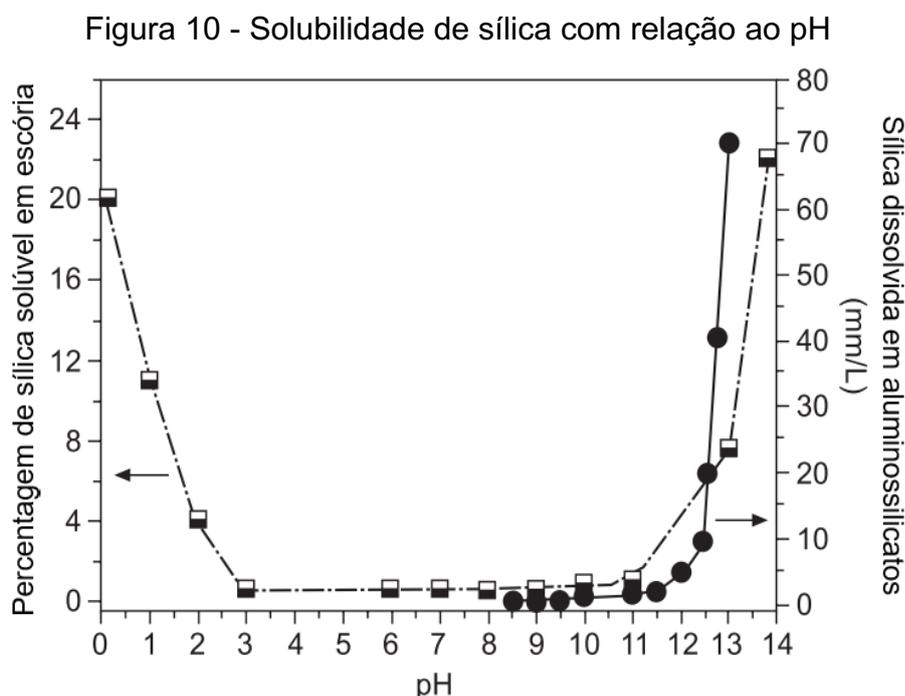


Fonte: adaptado de Staudt (2019)

Caso o processo de polimerização ocorra de forma acelerada, irá ocorrer a formação de uma camada do produto da reação de polimerização ao redor das partículas precursoras, o que dificulta a ação do ativador alcalino, paralisando o processo de dissolução das partículas. Ou seja, o material que não foi completamente dissolvido irá prejudicar o desenvolvimento de resistência à compressão da matriz cimentícia. Além disso, a presença de hidróxido de sódio ou silicato de sódio não reagido na matriz cimentícia pode prejudicar o desenvolvimento de resistência, causando a perda de resistência com o passar do tempo (PANIAS; GIANNOPOULOU; PERRAKI, 2007; TAKEDA et al., 2014; TCHAKOUTÉ et al., 2015). O estudo desenvolvido por Panias, Giannopoulou e Perraki (2007) observou que o comportamento da resistência à compressão não seguiu um crescimento linear em função do aumento da concentração de NaOH. O ápice de desenvolvimento de resistência foi registrado com concentração molar de 6,6 mol, após este valor o aumento da molaridade prejudicou o processo de polimerização.

De acordo com Garcia-Lodeiro, Palomo e Fernández-Jiménez (2015b), a dissolução do material precursor é diretamente influenciada pelo pH do ativador alcalino. Soluções com pH na faixa de 3 a 11 resultam em baixa solubilidade da sílica da escória. No entanto, é importante notar que, quando o pH se desvia dessa faixa, ocorre um aumento exponencial na taxa de dissolução da sílica, levando à formação de hidratos estáveis em meios alcalinos e hidratos instáveis em meios

ácidos. O comportamento da solubilidade da sílica em aluminossilicatos é semelhante, onde a hidrólise da sílica ocorre com o aumento do pH, mas em certas concentrações, o aumento de OH^- não resulta em um aumento proporcional na quantidade de material dissolvido. A Figura 10 ilustra esse comportamento da solubilidade da sílica.



Fonte: adaptado de Garcia-Lodeiro, Palomo e Fernández-Jiménez (2015b)

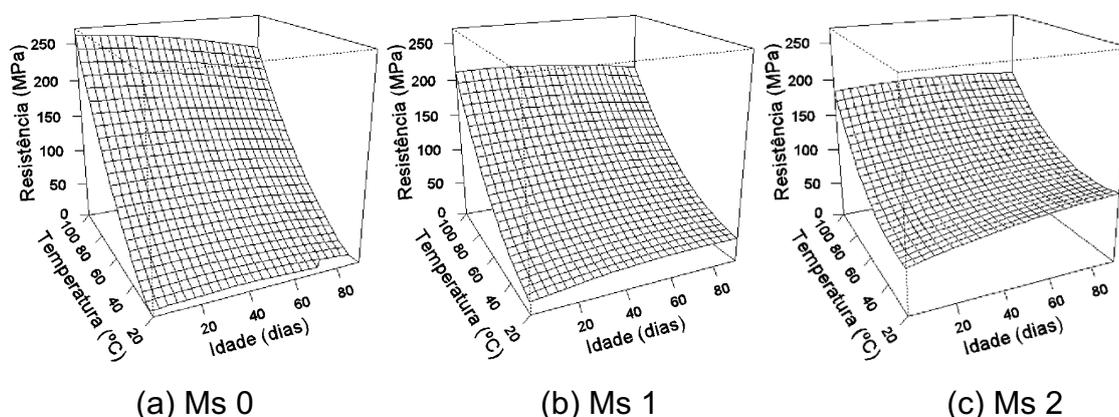
O ativador alcalino pode conter uma fonte suplementar de sílica para promover a polimerização. A utilização de silicato de sódio afeta a trabalhabilidade, o tempo de pega, modifica a composição e a microestrutura do material formado. Os dois principais fatores que devem ser analisados, nesse sentido, são a concentração de sílica e o módulo de sílica ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015b; NADOUSHAN; RAMEZANIANPOUR, 2016).

A incorporação de sílica solúvel (Si-O) no ativador alcalino facilita as condições adequadas para o desenvolvimento da microestrutura (NADOUSHAN; RAMEZANIANPOUR, 2016; ROBAYO-SALAZAR; DE GUTIÉRREZ; PUERTAS, 2017). O estudo conduzido por Robayo-Salazar; De Gutiérrez e Puertas (2017) observou que a incorporação de silicato de sódio no ativador alcalino de rochas vulcânicas resultou em um ganho significativo de resistência (> 165 %) em estudos com pastas de cimento. Segundo Nadoushan e Ramezianpour (2016), a incorporação do silicato de sódio aumenta a taxa de dissolução do material

precursor e antecipa o processo de polimerização por disponibilizar Si ao sistema desde o início, pois inicialmente ocorre a dissolução do Al e posteriormente a liberação do Si no processo de hidrólise.

No estudo conduzido por Staudt (2019), foi verificada a influência da adição de fonte externa de sílica solúvel no sistema, através da adição de silicato de sódio residual da cinza de casca de arroz, analisado com base em modelo estatístico. No cenário matemático, destacou-se a interação com os parâmetros de cura térmica, em que o acréscimo de temperatura foi benéfico para o desenvolvimento de resistência, independentemente da quantidade de sílica adicionada. No entanto, ocorre à tendência de queda de resistência à compressão ao longo do tempo, quando a cura térmica atinge o patamar de 100 °C (Figura 11). Isso indica que a dissolução inicial da sílica e da alumina ocorre de forma acelerada com o incremento de energia com a adição de sílica solúvel, que pode acabar prejudicando a completa dissolução das partículas.

Figura 11 - Influência do módulo de sílica na resistência à compressão em amostras com relação solução/aglomerante de 0,45 e 12 mol

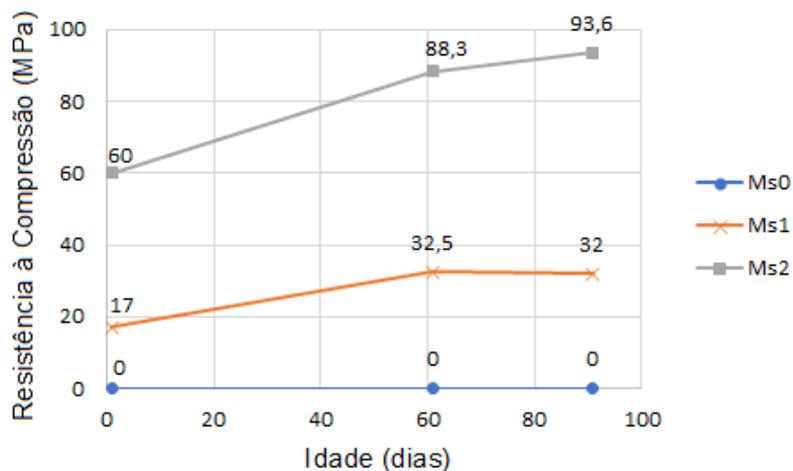


Fonte: adaptado de Staudt (2019)

Conduto, a adição de sílica no sistema se mostrou mais efetiva sem a combinação com a cura térmica, ou seja, com a cura a temperatura ambiente (20 °C). Conforme descrito por Nadoushan e Ramezani pour (2016), as ligações Al-O-Al são mais frágeis em relação às ligações de Si-O-Si, o que resulta na maior dificuldade de dissolver o dióxido de silício em baixas temperaturas de cura enquanto que o Al estaria disponível no sistema. O silicato de sódio residual disponibiliza Si para reagir com o Al, viabilizando as reações de polimerização na faixa dos 20 °C, o que não ocorre com a solução de hidróxido de sódio.

A Figura 12 apresenta o detalhamento do desenvolvimento de resistência, ao longo do tempo, ao variar o módulo de sílica em temperatura ambiente (20 °C) durante a cura. Conforme supracitado, o desenvolvimento de resistência à 20 °C só ocorre com a adição de silicato de sódio no sistema, que antecipa o início do processo de polimerização.

Figura 12 - Influência do Ms na resistência à compressão de pastas curadas a 20 °C



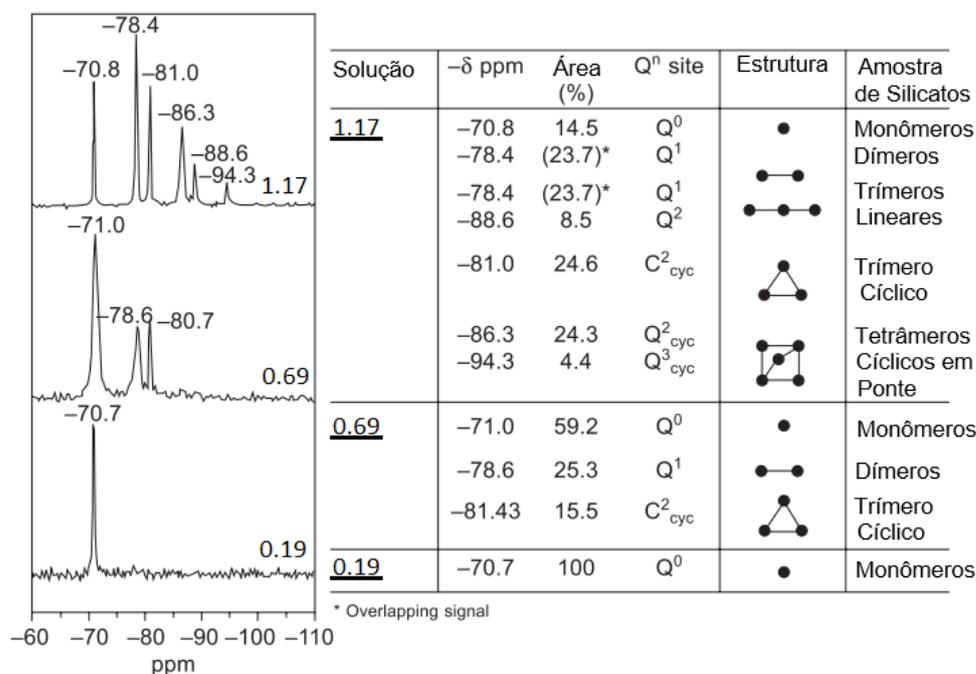
Fonte: adaptado de Staudt (2019)

Outro aspecto positivo na adição de silicato de sódio no sistema, corresponde a melhora na interface entre o gel e as partículas do material precursor que não são completamente dissolvidas, que acabam atuando como fíler na matriz. Esses fatores aumentam o grau de polimerização e melhoram as propriedades mecânicas no material (ROBAYO-SALAZAR; DE GUTIÉRREZ; PUERTAS, 2017).

Em um estudo conduzido por Criado et al. (2008), foi analisado o efeito do módulo de sílica ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) no grau de polimerização da matriz cimentícia. A Figura 13 ilustra a diferença no grau de polimerização das amostras. Na amostra com o menor módulo de sílica (0,19), observou-se a formação apenas de monômeros. À medida que o módulo de sílica aumentou, além da formação de monômeros, foram identificados picos característicos de dímeros e trímeros cíclicos. Na amostra com uma relação de 1,17, a polimerização foi mais intensa, resultando na formação de monômeros, dímeros, trímeros lineares e tetrâmeros cíclicos em ponte. Essa variação no grau de polimerização tem efeitos significativos na cinética das reações e na formação inicial do gel N-A-S-H. A formação de monômeros acelera a precipitação do gel, enquanto os dímeros aceleram ainda mais, embora

tornem o gel menos estável. Por outro lado, a formação de trimeros cíclicos retarda o processo de reação, mas resulta em géis mais estáveis.

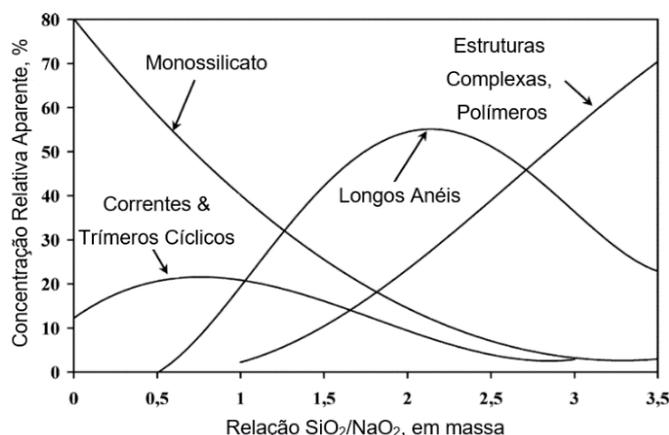
Figura 13 - Influência do silicato de sódio na estrutura



Fonte: adaptado de Criado et al. (2008)

Segundo Panias, Giannopoulou e Perraki (2007), os silicatos solúveis são essenciais no processo de polimerização e o módulo de sílica interfere na formação da estrutura aniônicas do silicato, modificando o sistema de monossilicatos, cadeias e trimeros cíclicos para estruturas mais complexas, como demonstra a Figura 14. O uso de silicato de sódio gera um efeito positivo no desenvolvimento de resistência mecânica nos materiais álcali-ativados, principalmente quando utilizado em estado líquido (GÖRHAN; KÜRKLÜ, 2014).

Figura 14 - Diagrama de fases influenciado pelo módulo de sílica.



Fonte: adaptado de Panias, Giannopoulou e Perraki (2007)

O efeito benéfico do aumento do módulo de sílica apresenta um limite determinado pelo aumento da viscosidade da pasta álcali-ativada, que dificulta a homogeneização e por consequência, reduzindo a dissolução do material precursor. Além do aumento da presença de partículas que não foram completamente dissolvidas, ocorre a redução da trabalhabilidade e moldabilidade, prejudicando o desempenho mecânico do material. Esse comportamento foi observado no estudo conduzido por Panias, Giannopoulou e Perraki (2007), em que foram analisadas misturas com seis diferentes módulos de sílica, apresentando crescimento linear do comportamento mecânico, até ocorrer uma queda brusca na resistência à compressão.

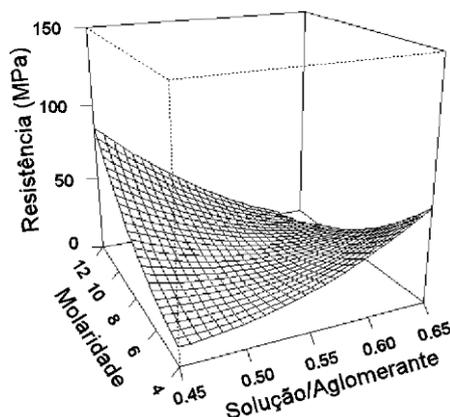
Em contrapartida, Fernández-Jiménez (2009) afirma que os materiais álcali-ativados confeccionados com hidróxido de sódio são mais cristalinos em comparação aos produzidos com silicato de sódio. Ele acrescenta que quanto mais cristalina for a estrutura, maior será a resistência do material a ambientes agressivos, devido à formação de uma estrutura mais estável e com ligações cruzadas.

Nos cimentos álcali-ativados, a redução do teor de água resulta em um aumento na concentração de álcalis na fase aquosa. Isso, por sua vez, acelera a dissolução do material precursor, reduz a porosidade e melhora as propriedades mecânicas do material. No entanto, é importante notar que a hidrólise dos cimentos ativados por álcalis ocorre em um ambiente aquoso. Portanto, quando os teores de água são muito baixos, a homogeneização e a dissolução do material podem ser prejudicadas, o que limita o desenvolvimento da resistência mecânica (BARBOSA;

MACKENZIE; THAUMATURGO, 2000; PANIAS; GIANNOPOULOU; PERRAKI, 2007).

No cenário apresentado na Figura 15, Staudt (2019) simula a interação entre a molaridade e a relação solução/aglomerante. É possível observar que, para combinações com molaridade mais elevadas, é recomendado que a relação solução/aglomerante seja baixa, o que também é válido no cenário oposto, invertendo os extremos. Segundo o modelo matemático, para otimizar a resistência à compressão de misturas com relação solução/aglomerante 0,45, é indicado a utilização de um ativador alcalino com elevada concentração de álcalis, pois ativadores com baixa molaridade levam a um desempenho mecânico limitado. No entanto, ao utilizar a relação solução/aglomerante 0,65 o cenário é oposto, sendo sugerida a utilização de ativadores com menor molaridade, pois com 12 mol a tendência é não desenvolver resistência mecânica.

Figura 15 - Interação entre a molaridade e a relação solução/aglomerante.



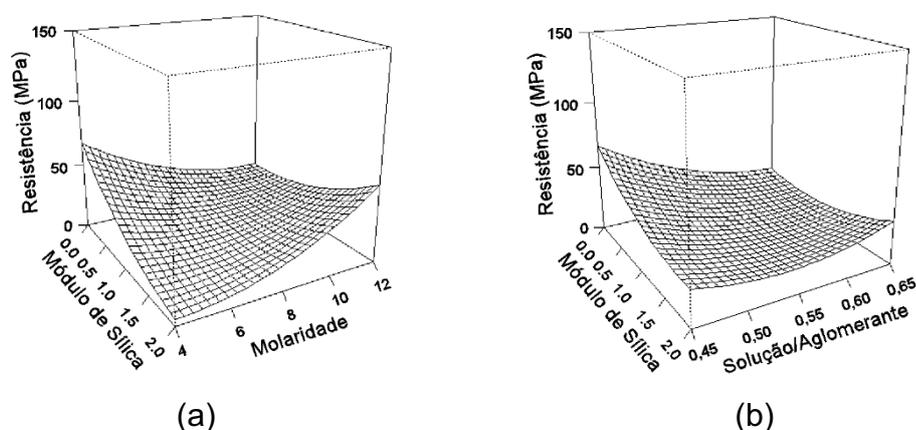
Fonte: adaptado de Staudt (2019)

Quanto às interações entre o módulo de sílica e a molaridade, e o módulo de sílica e a relação solução/aglomerante, ambas apresentam comportamentos similares, com pequena variação de resistência ao variar os níveis dos parâmetros, conforme estimado por Staudt (2019). Este comportamento indica a influência preponderante do módulo de sílica em relação à molaridade e a relação solução/aglomerante.

Na Figura 16(a) é exibido o desempenho da matriz cimentícia para a interação entre o módulo de sílica com a molaridade, onde é possível identificar que a melhor combinação indica os parâmetros no valor mínimo, 0 e 4, respectivamente. Neste cenário, ao elevar a concentração do ativador alcalino é observado uma

redução na expectativa de resistência de aproximadamente 70%, sendo necessário, também, elevar o módulo de sílica para o nível máximo do parâmetro. Conforme supracitado é observado comportamento equivalente na interação entre o módulo de sílica e a solução/aglomerante, apresentado na Figura 16(b), em que os melhores cenários ocorrem com ambos os parâmetros no nível mínimo, ou ambos no nível máximo, estabelecido no estudo, com valores intermediários apresentando menor potencial de resistência.

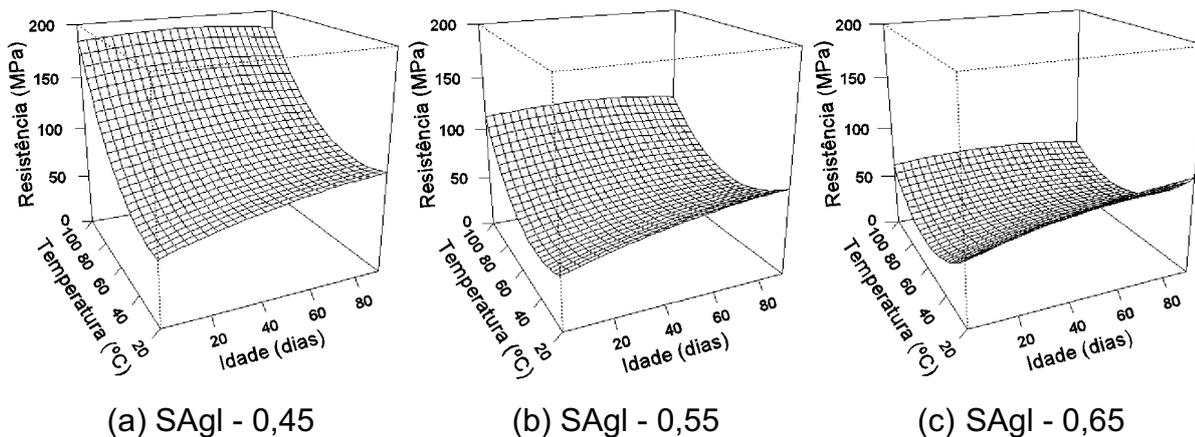
Figura 16 - Interações: (a) Módulo de sílica x molaridade; (b) Módulo de sílica x Solução/Aglomerante.



Fonte: adaptado de Staudt (2019)

Staudt (2019) também observou a interação entre a relação solução/aglomerante e a temperatura de cura das amostras. Em pastas de cimento curadas a temperaturas mais elevadas (100 °C), ocorre uma redução na expectativa de resistência com o aumento da relação solução/aglomerante. Esse efeito pode estar relacionado à formação de fissuras na matriz do material após o desenvolvimento de resistência, devido à geração de tensões internas resultantes da perda de água. No entanto, ao realizar a cura térmica em temperaturas mais baixas (20 °C), a projeção de resistência é menor em comparação com as amostras expostas a maior energia térmica, exceto quando a relação solução/aglomerante é igual a 0,65. Outra característica observada é que, com a menor temperatura de cura, o desenvolvimento de resistência é contínuo. Ambos esses comportamentos estão representados na Figura 17.

Figura 17 - Influência da relação solução/aglomerante na resistência à compressão.

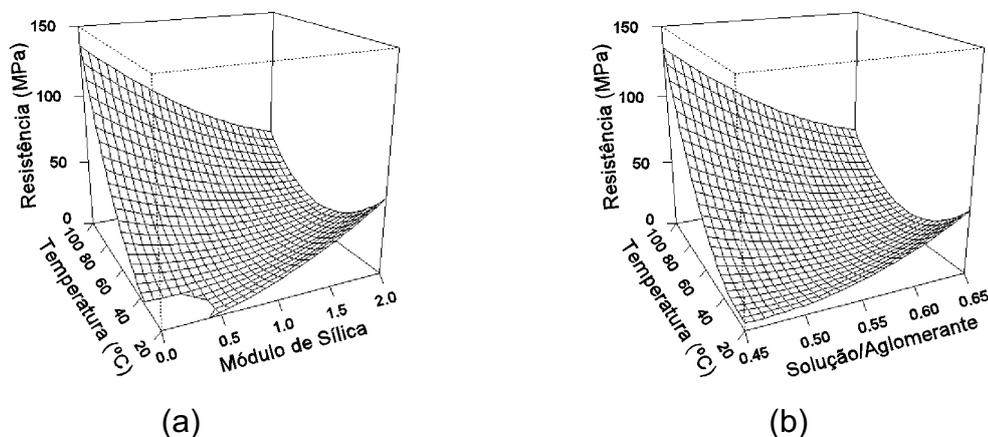


Fonte: adaptado de Staudt (2019)

A temperatura de cura também influencia a interação com o módulo de sílica e a relação solução/aglomerante, apresentando comportamentos semelhantes em ambas as simulações. Nos dois cenários, é necessário aumentar a temperatura de cura para desenvolver resistência nas combinações sem a adição de sílica solúvel (Ms 0) ou em baixas relações solução/aglomerante (0,45). No entanto, não é possível observar uma dependência clara da temperatura para o desenvolvimento de resistência em combinações com relação solução/aglomerante de 0,65 e adição de sílica solúvel (Ms 2), onde o ponto mínimo da concavidade é registrado em uma temperatura intermediária.

A redução no desenvolvimento de resistência em combinações curadas em temperaturas e módulo de sílica elevados, observado na Figura 18(a), pode ser atribuída à dificuldade em dissolver por completo o material precursor devido à velocidade com que as reações de polimerização ocorrem. Já o comportamento registrado na Figura 18(b), pode ser atribuído à fissuração da matriz devido ao aumento da perda de água presente no material ao elevar a relação solução/aglomerante.

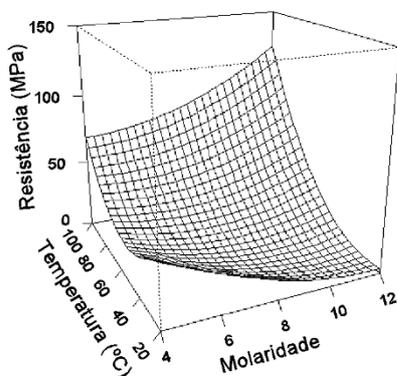
Figura 18 - Interações: (a) Temperatura x módulo de sílica; (b) Temperatura x Solução/Aglomerante.



Fonte: adaptado de Staudt (2019)

Quando analisado a interação entre a temperatura de cura e a molaridade, apresentada na Figura 19, é observado comportamento similar ao supracitado, reforçando a influência da temperatura em relação aos demais fatores. As combinações constituídas por ativadores alcalinos com elevada molaridade apresentam dificuldade no desenvolvimento de resistência. No entanto, ao aumentar a incidência de energia térmica no material é desenvolvida a resistência máxima neste cenário. Staudt (2019) destaca que o comportamento observado na sua projeção é contraditório com a literatura, pois o aumento da concentração de álcalis tenderia a melhorar a dissolução do material e o desenvolvimento de resistência, mesmo em temperaturas inferiores.

Figura 19 - Interação entre a temperatura e a molaridade



Fonte: adaptado de Staudt (2019)

2.1.3 Produção de Álcali-Ativados

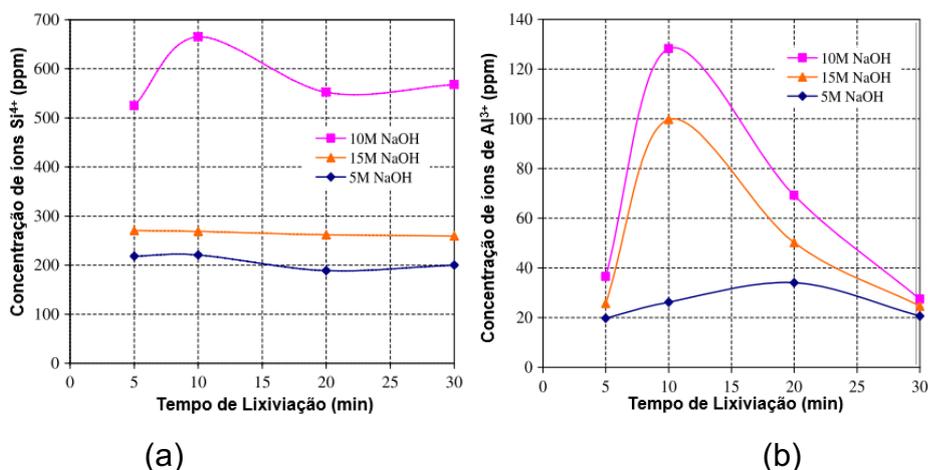
O concreto álcali-ativado possui a capacidade de apresentar desempenho igual ou até mesmo superior ao concreto produzido com cimento Portland. Ele exibe características de resistência a altas temperaturas e a ataques químicos, como sulfato e cloreto. Além disso, o concreto álcali-ativado demonstra um ganho acelerado de resistência nas idades iniciais e oferece versatilidade na obtenção de matéria-prima para sua produção (MENDES et al., 2021). No entanto, é importante observar que os materiais ativados por álcalis podem apresentar algumas limitações, como redução da trabalhabilidade, resistência à compressão e a necessidade de cura térmica (HASSAN; ARIF; SHARIQ, 2019).

Os materiais álcali-ativados podem ser produzidos de duas formas, a mistura em uma única parte ou a mistura em duas partes. O método de mistura em uma única parte consiste em realizar a homogeneização dos materiais sólidos no estado seco (material precursor, hidróxido de sódio e o silicato de sódio) e posteriormente realizar a adição de água. Já o método de mistura em duas partes consiste em preparar o ativador alcalino e então realizar a mistura com o material precursor (PROVIS, 2018).

Provis (2018) afirma que o método de mistura em duas partes é o mais comumente utilizado, apesar de representar um desafio maior na preparação e no uso do ativador alcalino no local da produção. Em contraste, o método de uma única parte é mais viável para a produção em larga escala e para a distribuição em massa, possibilitando a comercialização em sacos, semelhante ao cimento Portland. Vale ressaltar que o método em duas partes tem potencial de escalabilidade na indústria de pré-moldados, onde os controles de qualidade e a manipulação de produtos químicos são mais rigorosos.

Outro fator importante no preparo do material é o tempo de mistura. No estudo realizado por Rattanasak e Chindaprasirt (2009) foi analisado a quantidade de sílica e alumina dissolvida da cinza volante por diferentes concentrações de NaOH em três tempos de misturas: 5, 10, 20 e 30 min. Como pode ser observado na Figura 20, os resultados indicaram que o tempo de mistura entre 5 min e 10 min é suficiente para que ocorra a lixiviação dos íons de Si^{4+} e Al^{3+} , visto que com o aumento do tempo de mistura para 20 min e 30 min, não teve um aumento significativo na concentração desses íons.

Figura 20 – Análise da taxa de dissolução de sílica e alumina em cinza volante por diferentes concentrações de NaOH no ativador alcalino: (a) Silício; (b) Alumínio



Fonte: adaptado de Rattanasak e Chindaprasirt (2009)

Na pesquisa realizada por Suwan, Fan e Braimah (2016), o preparo da pasta de cimento foi iniciado ao misturar o ativador alcalino e o material precursor por 90 segundos em baixa velocidade (140 ± 5 rpm), realizando uma parada de 30 segundos para a retirada do material aderido no misturador, e retomada a mistura por mais 90 segundos. No entanto, Longhi et al. (2016) realizaram o preparo da pasta de cimento em um misturador mecânico de forma contínua por seis minutos. A água presente na mistura apenas exerce função de meio para que ocorra a hidrólise do material precursor, posterior a essa fase, a sua remoção do sistema é necessária para que ocorra o desenvolvimento de resistência mecânica (KONG; SANJAYAN, 2010).

Após o processo de moldagem do material, a etapa de cura desempenha um papel fundamental na cinética das reações químicas dos materiais, influenciando as reações de polimerização e, conseqüentemente, as propriedades da pasta alcali-ativada (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014; ROBAYO-SALAZAR; GUTIÉRREZ, 2018; VARGAS et al., 2014). De acordo com Criado, Fernández-Jiménez e Palomo (2010), as condições de cura desempenham um papel significativo no desenvolvimento dos produtos das reações de ativação das cinzas volantes, influenciando a formação da microestrutura e nanoestrutura dos materiais.

É importante destacar que o material curado sob uma umidade relativa superior a 90% tende a desenvolver uma microestrutura densa e compacta, resultando em um bom desenvolvimento de resistência mecânica ao longo do

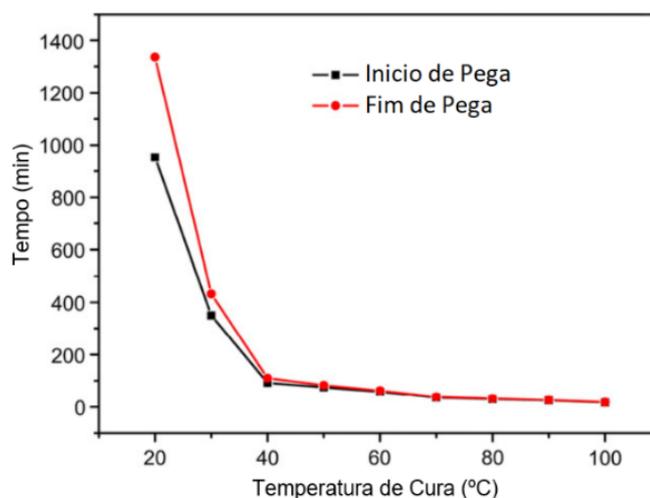
tempo. Por outro lado, a cura em baixa umidade relativa leva à formação de um material poroso e granular, resultando em um desempenho mecânico inferior (CRIADO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2010).

Segundo Walkley et al. (2016) e Oh et al. (2010), com o aumento do tempo da cura térmica e da temperatura, o grau de polimerização é elevada e as ligações cruzadas do C-(N)-A-S-H intensificadas. Contudo, Vargas et al. (2011) observou a necessidade de o ativador formar o gel de aluminossilicato para que as condições de cura possam atuar no comportamento mecânico.

Outro fator que corrobora com a cura térmica nos materiais álcali-ativados é a tendência de reduzir a formação de eflorescência na superfície dos materiais com a realização de cura térmica. Esse comportamento pode ser justificado pelo aumento do grau de polimerização da matriz somado com a interferência na cinética das reações (TEMUUJIN; VAN RIESSEN; WILLIAMS, 2009).

Görhan e Kürklü (2014) indicam que a produção de materiais álcali-ativados pode ocorrer em temperatura ambiente, porém, nesse caso, o processo de polimerização é mais lento, o que limita o desenvolvimento da resistência do material. Um estudo conduzido por Mo et al. (2014), que utilizou metacaulim como material precursor, identificou a influência da cura térmica nas reações de polimerização. De acordo com os autores, o aumento da temperatura altera o tempo de início e término da pega do material. A 20 °C, o tempo registrado para o início e término da pega foi de 953 minutos e 1336 minutos, respectivamente, enquanto a 100 °C, o período necessário foi de apenas 20 minutos para o início e término da pega, conforme demonstrado na Figura 21.

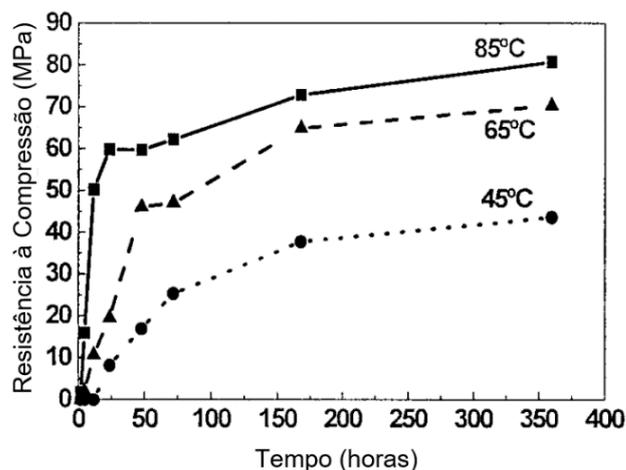
Figura 21 – Influência da temperatura de cura no tempo de início e término de pega em material ativado por álcalis utilizando metacaulim como material precursor.



Fonte: adaptado de Mo et al. (2014)

O acréscimo da temperatura e do tempo de cura propicia o aumento no grau de polimerização, resultando no crescimento da resistência à compressão, porém a taxa de crescimento da resistência é mais intensa nos tempos iniciais do processo. O tempo e a temperatura estão correlacionados. Ao analisar a Figura 22, pode-se observar que do aspecto mecânico, uma semana a 65 °C ou 24h a 85 °C é suficiente para que ocorram as reações de polimerização, tendo em vista que nessas idades ocorre o ponto de inflexão do crescimento da resistência. Os produtos formados acabam cobrindo o material que não reagiu, e por ser denso e compacto dificulta a sua completa dissolução. Esse mecanismo justifica o rápido desenvolvimento de resistência e a posterior estabilização (PALOMO; ALONSO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2004).

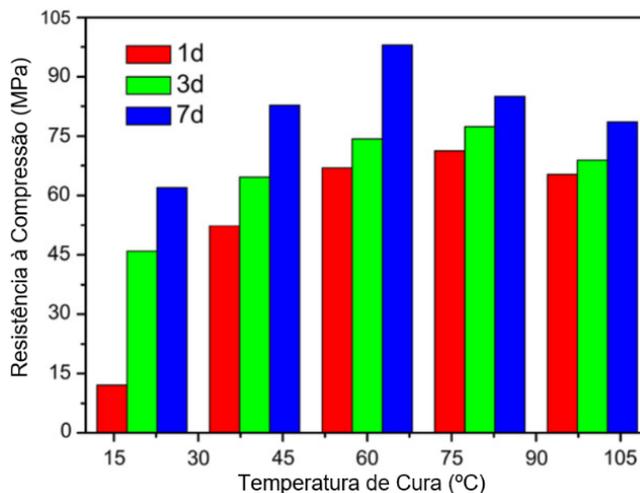
Figura 22 – Taxa de desenvolvimento de resistência em materiais ativados por álcalis em relação ao período e temperatura de cura térmica



Fonte: adaptado de Palomo, Alonso e Fernández-Jiménez (2004)

Mo et al. (2014) e Dias (2012) também analisaram o efeito da temperatura na resistência à compressão em matrizes de materiais ativados por álcalis, encontrando resultados que indicavam que ao aumentar a temperatura de cura, as amostras apresentavam uma melhora na resistência à compressão. Esse comportamento foi observado até a temperatura de 60 °C, em temperaturas superiores, notou-se um decréscimo na resistência, representando um efeito negativo aos corpos de prova. Ao atingir a temperatura de 80 °C e 100 °C, a cura térmica pode ter causado desidratação e retração excessiva, causando a redução da resistência das amostras quando comparado aos valores obtidos com a temperatura de 60 °C, como pode ser observado na Figura 23.

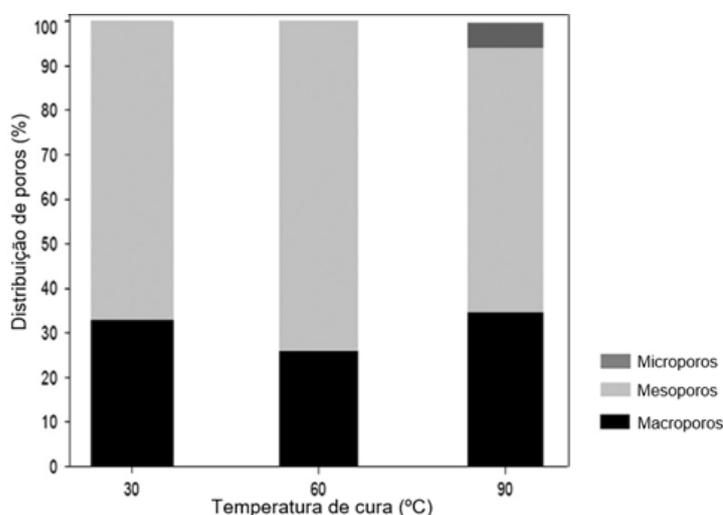
Figura 23 – Influência da temperatura de cura na resistência à compressão



Fonte: adaptado de Mo et al. (2014)

Através de ensaios de microtomografia de Raios X, utilizando fontes de luz sincrotron, Provis et al. (2012) sugerem a influência das condições de cura na formação dos poros e nas propriedades da microestrutura no material endurecido. Muñoz-Villarreal et al. (2011) quantificaram o volume de poros em materiais curados em três temperaturas diferentes, e como pode ser observado na Figura 24, a amostra curada a 60 °C apresentou menor quantidade de macroporos e maior concentração de mesoporos, enquanto as amostras submetidas a 30 °C e 90 °C, apresentaram uma elevada quantidade de macroporos e de materiais que não foram dissolvidos no processo de ativação alcalina.

Figura 24 - Distribuição do tamanho de poros



Fonte: adaptado de Muñoz-Villarreal et al. (2011)

O percentual de material precursor não dissolvido nas amostras de 30 °C, 60 °C e 90 °C foram: 51%, 43% e 54% respectivamente. As amostras submetidas a temperaturas de 30 °C e 90°C, demonstraram ineficiência na dissolução das partículas e na formação de oligômeros, portanto as reações de polimerização não foram estabelecidas adequadamente, resultando em baixa resistência à compressão e elevada porosidade. Segundo Duxson et al. (2005), as partículas do material precursor que não foram completamente dissolvidas acabam gerando defeitos pontuais na microestrutura, que resulta na concentração de tensões e antecipando o seu colapso. Corroborando com esta análise, Hassan, Arif e Shariq (2019) afirmam que a realização da cura térmica melhora o processo de polimerização, contudo, o ganho de resistência precoce, reduz o potencial de desempenho mecânico do material em idades posteriores, formando uma estrutura com poros grosseiros e

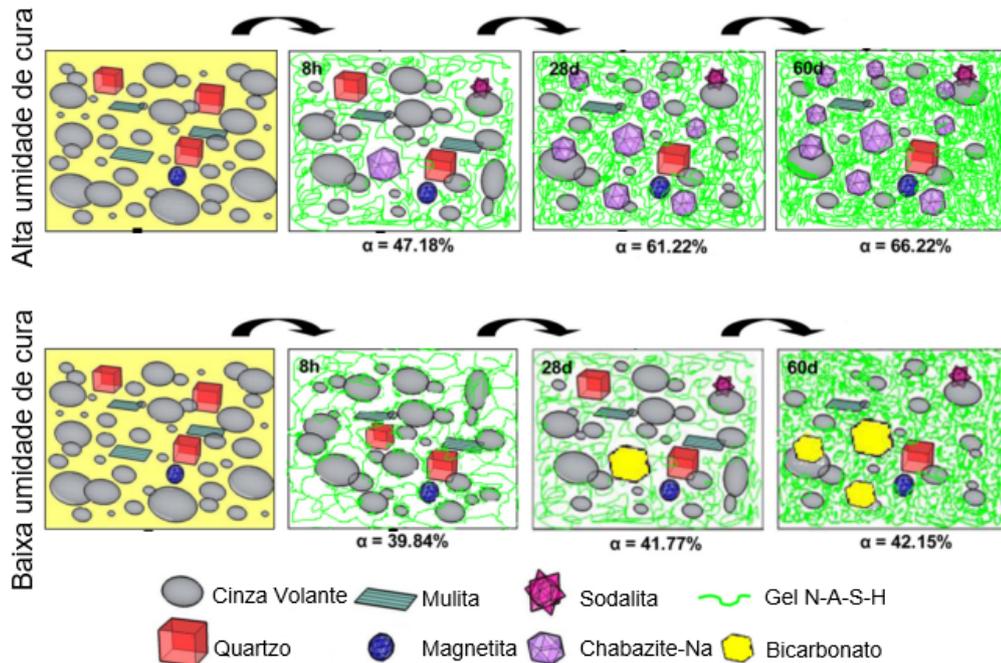
microestrutura heterogênea, devido a rápida reação de dissolução e polimerização. A amostra submetida à cura térmica de 90 °C obteve menor eficiência ao dissolver o material precursor, devido a rápida reação entre a solução alcalina e a superfície do metacaulim, que formou uma camada de géis de Si^{4+} e Al^{3+} em torno das partículas dificultando a sua dissolução. Em contrapartida, as reações cinéticas a 30 °C ocorrem de forma muito lenta, com a taxa de dissolução baixa e retendo água nos poros, impedindo a formação dos géis e da microestrutura, resultando na maior quantidade de macroporos. A técnica de calorimetria e a análise de lixiviação corroboraram com a investigação da distribuição de poros, para determinar a temperatura de cura ideal em 60°C para a polimerização e o desenvolvimento das propriedades mecânicas (MUÑIZ-VILLARREAL et al., 2011).

Criado, Fernández-Jiménez e Palomo (2010) propuseram um modelo gráfico para descrever a evolução das fases dos materiais precursores e os produtos formados durante o mecanismo de ativação alcalino em amostras curadas em ambiente de baixa e alta umidade. Ao realizar cura úmida, o material precursor dissolvido reage rapidamente e após 8h é produzido o gel rico em alumínio com predominância de unidades Q4 (4Al) e Q4 (3Al), com o passar do tempo ocorre o aumento gradual de Si, até a relação molar Si/Al do gel N-A-S-H esteja próximo a 2. A cura realizada em condições de baixa umidade favoreceu a carbonatação inicial, a perda de água e a redução do pH, dissolvendo o material vítreo mais lentamente e formando o gel rico em alumínio com prevalência de unidades de Q4 (4Al) e Q4 (3Al), com relação molar Si/Al de 1,64 aos 60 dias. A diferença na relação molar Si/Al alterou as ligações entre o tetraedro de silício e os átomos de alumínio, onde em condições úmidas o tetraedro de silício é cercado por dois ou três átomos e em condições de baixa umidade é cercado por três átomos de alumínio.

Na Figura 25 pode-se observar a ilustração que representa as variações a nível microscópico, tendo o material inicial sendo composto por cinzas volantes, mulita e magnetita. A ativação alcalina induz a precipitação do gel N-A-S-H, a formação de zeólitas e bicarbonatos alcalinos, após 8 h já ocorre a diferença no grau das reações das amostras, tendo na cura úmida reagido 47,18% do material precursor, enquanto na cura seca apenas 39,84%. Com 60 dias, a amostra curada com alta umidade desenvolveu um sistema denso e compacto, enquanto a amostra curada em baixa umidade apresentou grande porosidade e esferas de cinza volante não reagida. Em ambos os sistemas foram detectados o gel N-A-S-H e as zeólitas,

entretanto, na amostra curada com umidade observou a formação de sodalita hidratada e chabazite-Na, enquanto na amostra curada a seco foram observados bicarbonatos alcalinos e uma pequena quantidade de sodalita (CRIADO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2010).

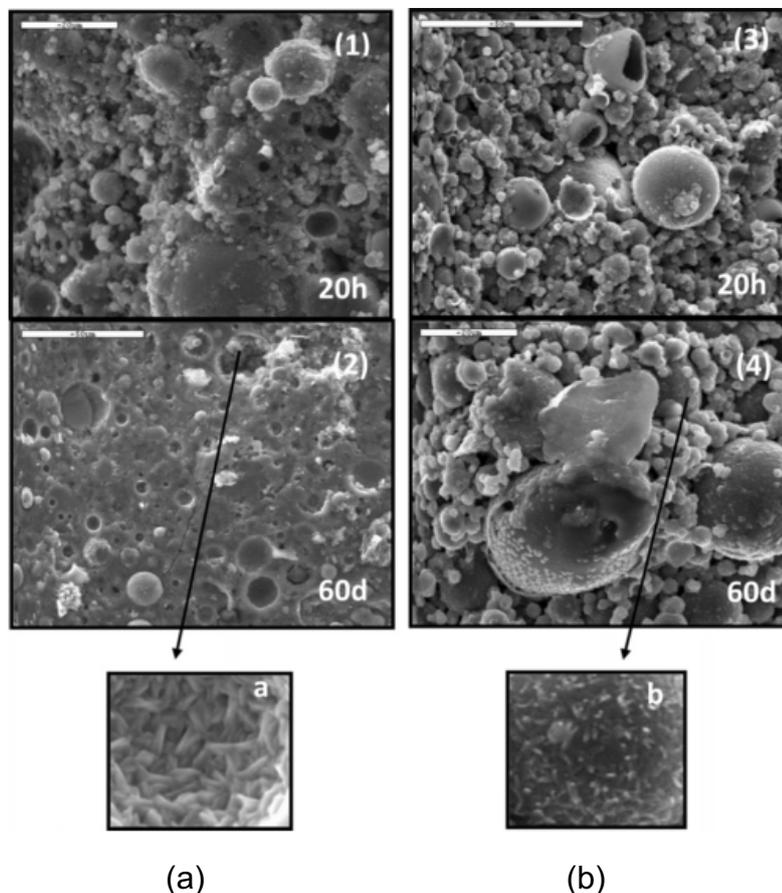
Figura 25 - Alterações na microestrutura de pastas de cimento ativadas por álcalis tendo cinza volante como material precursor



Fonte: adaptado de Criado, Fernández-Jiménez e Palomo (2010)

A Figura 26 exibe as diferenças morfológicas e microestruturais descritas no esquema anterior. Na Figura 26(a) pode-se observar uma matriz porosa, com grau moderado de reações e inúmeras esferas de cinzas volantes intactas após 20h de cura úmida, entretanto ao avançar o tempo de cura, a matriz desenvolveu consistência mecânica e formou pequenos cristais de zeólitas. A Figura 26(b) apresenta a amostra curada a seco, que apresentou uma estrutura muito porosa e pouco compacta, com um elevado número de partículas de cinzas volantes não reagidas, sendo que o tempo de cura pouco alterou o cenário das reações. As condições de cura interferiram na formação de bicarbonatos alcalinos, o que levou o material curado a seco a desenvolver uma morfologia granular. As alterações na morfologia e microestrutura resultaram em variações na resistência à compressão, fazendo com que as amostras curadas com umidade obtivessem o dobro de resistência à compressão (CRIADO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2010).

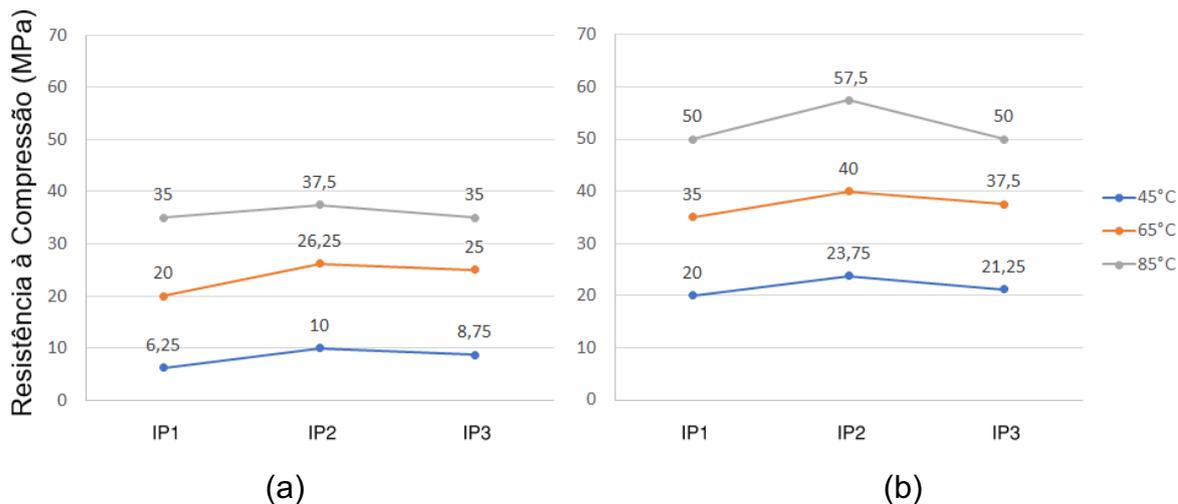
Figura 26 - Diferenças morfológicas e microestruturais de pastas de cimento ativados por álcalis tendo cinza volante como material precursor: (a) Cura úmida; (b) Cura Seca.



Fonte: adaptado de Criado, Fernández-Jiménez e Palomo (2010)

As amostras que são mantidas em ambiente com umidade relativa do ar acima de 95% antes de realizar a cura térmica, apresentam uma melhora no desempenho, tendo em vista que a cura hidrotérmica previne a formação de microfissuras (ALLAHVERDI; KANI, 2013; KANI; ALLAHVERDI, 2009; KOMNITSAS; ZAHARAKI; PERDIKATSI, 2009). O estudo realizado por Komnitsas, Zaharaki e Perdikatsis (2009) demonstrou que a realização de pré-cura durante dois dias melhora a resistência à compressão em quase 30%. Corroborando com esta narrativa, o estudo conduzido por Kani e Allahverdi (2009), demonstrou que o aumento do período de pré-cura e da temperatura é benéfico às propriedades dos álcali-ativados à base de pozolanas naturais, como pode ser observado na Figura 27.

Figura 27 - Efeitos da diferença de temperaturas e de pré-cura: (a) 1 dia; (b) 7 dias



Fonte: adaptado de Kani e Allahverdi (2009)

Portanto, a produção de materiais álcali-ativados apresenta um considerável potencial de aplicação na indústria da construção civil. No entanto, é fundamental compreender o comportamento dos principais fatores de ativação e sua interação com os materiais precursores.

2.1.4 Durabilidade

Os materiais cimentícios são utilizados em diversas áreas e com aplicações distintas, sendo exposto a diferentes condições ambientais. Nesse contexto, os parâmetros de durabilidade buscam avaliar o comportamento e a capacidade dos materiais atuando em cenários adversos, considerando o desempenho mecânico, estabilidade química e dimensional dos sistemas que vierem a compor.

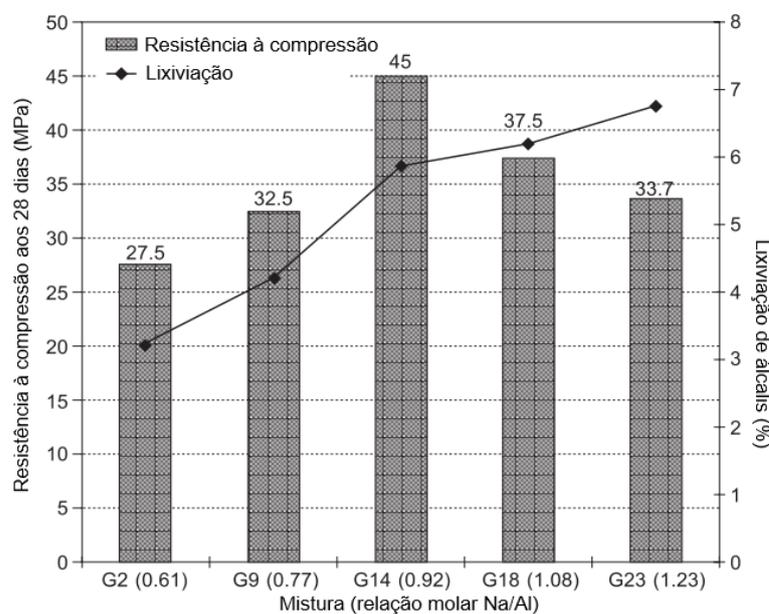
Os materiais álcali-ativados surgem como uma alternativa ao uso do cimento Portland, apresentando como característica o ganho acelerado de resistência nas idades iniciais, resistência a altas temperaturas, baixa condutividade térmica e resistência a ataques químicos. Contudo, essas características não são inerentes a todas as formulações de álcali-ativados. Segundo Mendes et al. (2021) e Wang et al. (2020), estas condições podem ser modificadas ou melhoradas de acordo com ajustes na composição e na técnica de produção utilizada, que resultam em alterações no processo de formação da microestrutura do material. A interação entre a ampla variedade de composição química e mineralógica dos precursores, somada com as diferentes possibilidades de ativadores alcalinos, pode resultar em

modificações na formação de géis e na estrutura dos materiais, apresentando comportamentos distintos que afetam a durabilidade. Segundo Vargas et al. (2014), os materiais álcali-ativados apresentam propriedades mecânicas, de durabilidade e ambiental satisfatórias, porém dependendo da composição química do ativador alcalino e dos materiais precursores, é observada instabilidade mecânica ao longo do tempo, tendo uma redução da resistência à compressão.

Os materiais álcali-ativados podem apresentar eflorescência na superfície devido às características físico-químicas do material precursor e ao tipo e quantidade do ativador alcalino utilizado. A formação de eflorescência está diretamente relacionada aos parâmetros de dosagem da mistura, que afetam a quantidade de álcalis livres, densidade, porosidade e capacidade de absorção de água do produto. A formação da eflorescência é um indicativo do desequilíbrio estequiométrico entre o precursor e o ativador alcalino, resultando na presença de íons alcalinos (Na^+ ou K^+) em excesso no interior da matriz cimentícia com capacidade de mobilidade e com potencial de cristalizar (DIAS, 2012; LONGHI et al., 2020).

Para Najafi, Allahverdi e Provis (2012), os ativadores alcalinos com uma relação alta $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ podem provir óxidos de sódio na mistura sem a completa reação com o material precursor. Dias (2012) destaca o cuidado necessário para que a relação molar entre o Al/Na ou Al/K não seja superior a 1, tendo em vista que os cátions alcalinos ficam retidos eletricamente para equilibrar as cargas do tetraedro AlO_4 e os íons em excesso ficam disponíveis para reagir com o CO_2 . Corroborando com essa análise, Allahverdi et al. (2015) observaram, em seus estudos, que a maior resistência à compressão obtida foi com a relação 0,92 Na/Al e que o aumento nesta relação resulta no acréscimo de álcalis liberados no processo de lixiviação dos materiais álcali-ativados, conforme apresentado na Figura 28. Além deste fato, segundo Škvára et al. (2009) a fraca ligação entre os íons de sódio (Na^+) e o alumínio da cadeia Si-O-Al também contribuem para o comportamento de lixiviação observado nos materiais álcali-ativados.

Figura 28 - Influência da relação Na/Al na lixiviação de álcalis e na resistência à compressão.

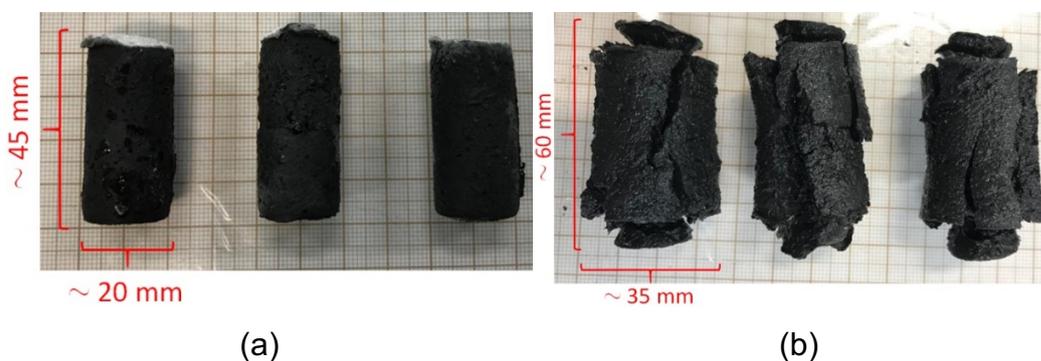


Fonte: adaptado de Allahverdi et al. (2015)

Ao substituir alguns íons de Si^{4+} por Al^{3+} na estrutura, ocorre a imobilização dos íons de Na^+ no equilíbrio de carga, reduzindo a tendência de dissolução e lixiviação. A insuficiência de alumina reativa durante o processo de polimerização dos materiais álcali-ativados pode desencadear uma série de limitações na durabilidade do material, tanto no desenvolvimento de resistência à compressão, como na resistência à água, sendo possível estabelecer um vínculo entre as características de estabilidade de fase e resistência, com uma razão molar máxima $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ para formar uma fase amorfa estável a longo prazo (SAGOE-CRENTSIL; SILVA, 2015; SILVA; SAGOE-CRENTIL, 2008; REDDEN; NEITHALATH, 2014; TENNAKOON et al., 2016).

Segundo Koppe (2021), o comportamento de deterioração documentado por Staudt (2019) em amostras de pasta de cimento álcali-ativado mantidas em contato constante com a água por 24h, pode estar relacionado com um baixo teor de Al^{3+} reativo disponível no processo de polimerização do material. A expansão equivalente a 3x o volume da amostra, apresentada na Figura 29, pode ser consequência de redes fracamente formadas, e em alguns casos, associadas com um comportamento mecânico pobre, que resultaram na durabilidade inadequada do material.

Figura 29 - Amostras submersas em água por 24h: (a) Estado das amostras antes do contato com a água; (b) Estado das amostras após o contato com a água.



Fonte: adaptado de Staudt (2019)

Para analisar o comportamento de deterioração de pastas de cimento álcali-ativadas, Staudt (2019) estruturou uma matriz de combinações de parâmetros da composição química do ativador alcalino e das condições de cura, e pode observar diferentes comportamentos e intensidade de desintegração e expansão nas amostras, como pode ser observado na Figura 30. Aproximadamente 32% dos traços analisados sofreram uma degradação moderada, com pequenas deformações e /ou fissuras, enquanto em 57% das amostras analisadas ocorreu uma reação intensa de expansão, resultando na completa degradação.

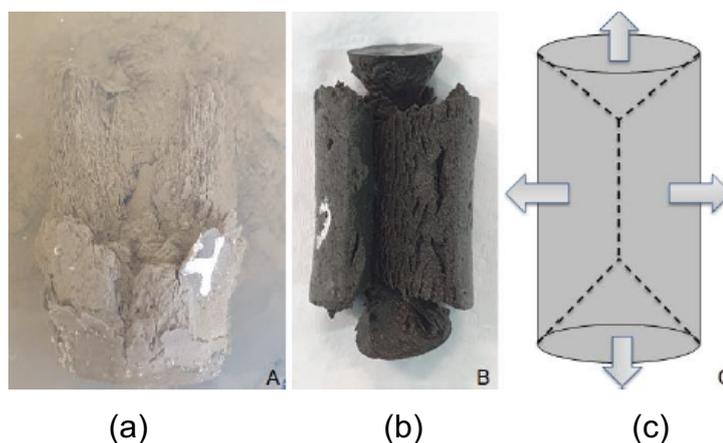
Figura 30 - Diferentes comportamentos de amostras de pastas de cimento em contato com película de água



Fonte: adaptado de Staudt (2019)

Koppe (2021) descreve o processo de deterioração em corpos de prova totalmente submersos em água como passível de apresentar dois comportamentos distintos. Em alguns corpos de prova é observado o fenômeno de desmanche ou desintegração da estrutura, onde o exemplar perde por completo a sua forma, sendo transformado em pequenas partículas dissolvidas na água, como pode ser observado na Figura 31A. O segundo comportamento observado é o aumento de volume ou expansão, este fenômeno é caracterizado pelo rompimento lateral da amostra e dilatação da matriz, com fraturas similares a escamas, assumindo forma bicônica e bifaturada lateralmente, como pode ser observado na Figura 31B e Figura 31C.

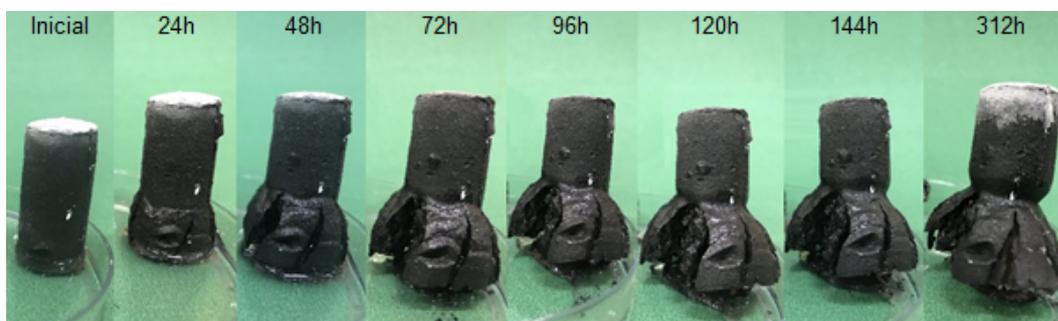
Figura 31 - Forma de deterioração das amostras: (a) Desintegração; (b) Expansão; (c) Forma bicônica e bifaturada observada na expansão.



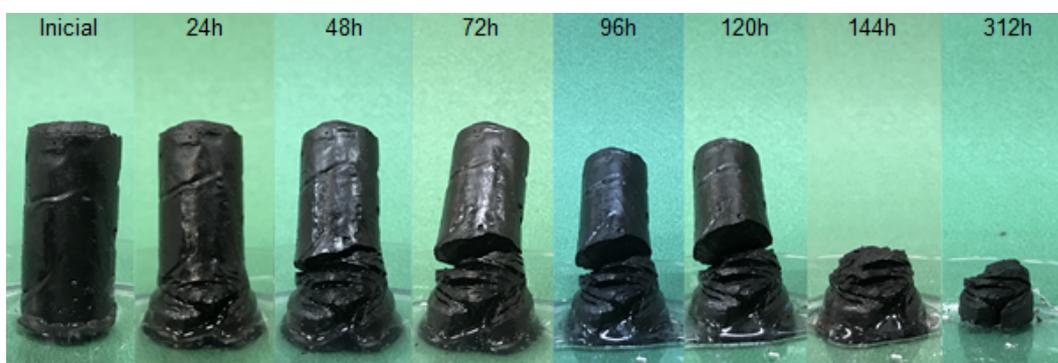
Fonte: adaptado de Koppe (2021)

Staudt (2019) também registrou a diferença na evolução visual do processo de deterioração entre duas composições. A Figura 32 descreve o comportamento do momento inicial da amostra ao entrar em contato com a lâmina de água ao período final onde a amostra encontra-se seca novamente. Após 24 h em contato com água, já é possível observar modificações na base das amostras, com uma rápida evolução até 72 h, a partir desse período há indícios visuais de redução da taxa de expansão das amostras. No entanto, é notável a existência de dois comportamentos visuais de deterioração, onde a Figura 32(a) apresenta maior fissuração no sentido vertical com aumento volumétrico no sentido horizontal da amostra, enquanto a Figura 32(b) apresenta expansão com intensa fissuração no sentido horizontal ao ponto de seccionar a amostra.

Figura 32 - Evolução da expansão: (a) Comportamento de fissuração vertical com aumento volumétrico horizontal; (b) Comportamento de intensa fissuração horizontal com a amostra seccionada



(a)



(b)

Fonte: adaptado de Staudt (2019)

Staudt (2019) observou que mesmo em amostras com elevada resistência à compressão, o fenômeno de desintegração e expansão poderia ocorrer quando a amostra fosse submetida ao contato com água. Corroborando com este cenário, Buchwald, Oesterheld e Hilbig (2010) afirmam que a resistência à compressão não é um parâmetro definitivo na formação de estruturas estáveis, pois combinações na mesma faixa de resistência podem apresentar deformações distintas ao entrar em contato com a água, devido à modificação na composição química.

O comportamento de deterioração, ao entrar em contato com a água, pode estar relacionado com a formação de géis instáveis devido à insuficiência de alumina reativa na sua constituição. Segundo Buchwald, Oesterheld e Hilbig (2010) a composição dos géis com relação Si/Al inferior a seis formam uma estrutura de gel mais forte, que inibe a sua dissolução em água. Sagoe-Crentsil e Silva (2015) acrescentam que o aumento na relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ até aproximadamente 4, resulta no aumento da resistência à compressão, formando uma microestrutura com fases

homogêneas e densas, enquanto sistemas com baixo teor de Al é observado a formação de fases zeolíticas cristalinas, que resultam em uma microestrutura porosa e com menor resistência à compressão.

Neste contexto, a elevada resistência à compressão no estado seco das pastas de cimento álcali-ativados produzidas com vidro vulcânico, como observado por Staudt (2019), na faixa dos 180 MPa aos 28 dias, pode ser atribuída à formação de carbonatos de sódio, como a thermonatrita e a trona, e silicatos de sódio. Estes compostos são resistentes no estado seco, mas tornam-se solúveis na presença de água. Segundo Tchadjé et al. (2016), as fases solúveis são formadas a partir da combinação entre o excesso de álcalis (Na^+) livres da matriz e o silicato solúvel presente no ativador alcalino. Redden e Neithalath (2014) também afirmam que a despolimerização da SiO_2 em géis de silicato de sódio está relacionada com o módulo de sílica do gel produzido, que corresponde a composição química do material precursor e do ativador alcalino. Redden e Neithalath (2014) descrevem o processo de despolimerização iniciando com a lixiviação do sódio e a formação de grupos silanol e de hidroxila, como representado na Equação 1. O pH da água aumenta devido a alcalinidade produzida pela reação inicial, desencadeando a quebra das ligações de sílica descritas nas Equações 2 e 3.

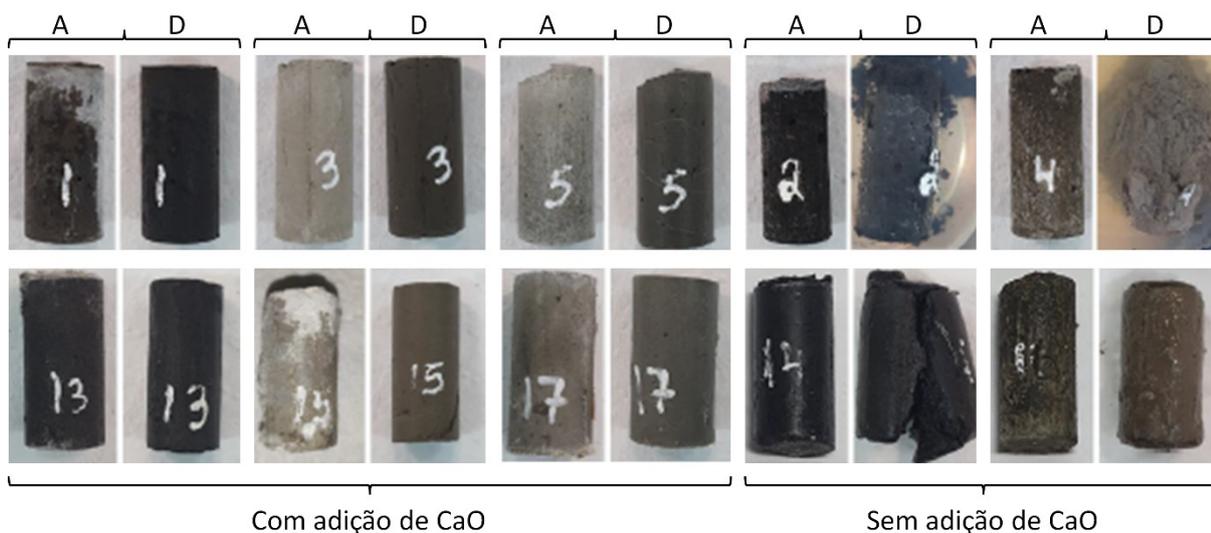


As rochas vulcânicas ácidas apresentam predominantemente elevada razão molar $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, devido à baixa fração de Al_2O_3 reativo. Para que os vidros vulcânicos sejam utilizados como material precursor na produção de materiais cimentícios álcali-ativados, deve ser fornecido uma fonte alternativa de Al^{3+} , ou outro modificador de rede (Ca^{2+} e Mg^{2+}), caso contrário, não serão obtidos resultados satisfatórios quanto ao comportamento mecânico e até mesmo à consolidação da microestrutura (KOPPE, 2021).

No estudo desenvolvido por Koppe (2021), foi analisada a influência da adição de 10% CaO na composição do material precursor a partir de rochas

vulcânicas em relação ao mecanismo de deterioração em contato com a água, sendo identificadas amostras que sofreram degradação e outras permaneceram intactas, contudo, os exemplares com maior degradação não haviam sido suplementadas com CaO. A Figura 33 apresenta as amostras antes e depois de serem imersas em água, podendo comparar o comportamento das amostras com adição de CaO e sem adição de CaO em contato com a água. Neste cenário, a adição de CaO colaborou para a formação de rede mais estável, sendo o fator de maior influência na mitigação dos danos analisados, enquanto o excesso de silicatos e a falta de modificadores de rede foram as principais variáveis para a ocorrência da desintegração das amostras

Figura 33 - Comparação de comportamento de amostras imersas em água por 24h constituídas por rochas vulcânicas coletadas em diferentes afloramentos: antes (A) e depois (D).



Fonte: adaptado de Koppe (2021)

De acordo com Koppe (2021), a adição de 10% de CaO mostrou-se eficaz na formação de matrizes híbridas com o precursor vulcânico. No entanto, o gel formado durante a ativação alcalina não é considerado estável, o que pode sugerir que o percentual adicionado pode não ter sido suficiente para estabilizar completamente o produto formado. Por outro lado, Redden e Neithalath (2014) afirmam que é possível produzir ligantes álcali-ativados com pó de vidro, mas recomendam a suplementação do sistema com a adição de alumina reativa para aumentar a formação de gel de aluminossilicato de sódio (N-A-S-H). Eles apontam que a escória

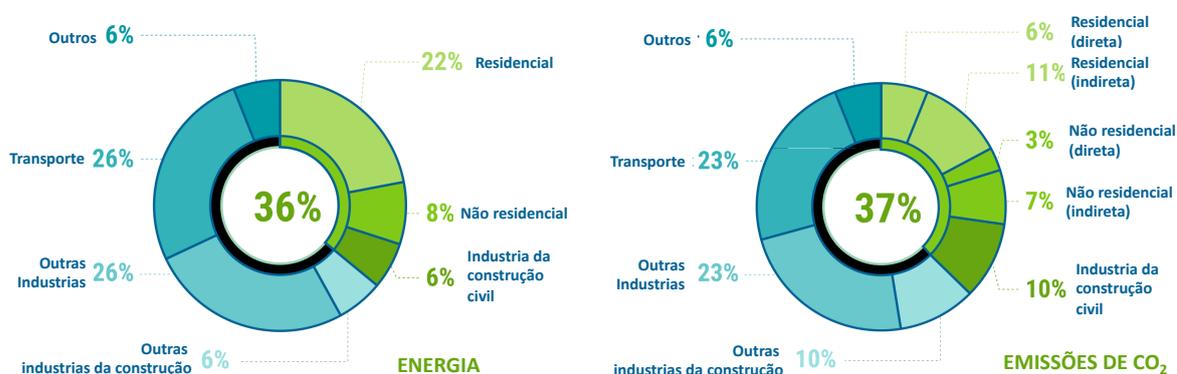
de alto forno e o metacaulim são os principais materiais utilizados para criar uma estrutura com um sistema híbrido entre C-A-S-H e N-A-S-H.

Dessa forma, a durabilidade dos materiais álcali-ativados pode ser afetada devido à composição do material precursor, tornando necessário realizar ajustes nos teores de cálcio e/ou alumínio a fim de assegurar a formação de estruturas estáveis. Essas medidas visam garantir o comportamento adequado do material quando exposto à umidade.

2.2 IMPACTOS AMBIENTAIS

O relatório *Global Status Report for Buildings and Construction* publicado pela *Global Alliance for Buildings and Construction*, revela que em 2020 o setor de construção civil foi responsável por 36% do consumo energético global e por 37% das emissões globais de CO₂. Analisando o histórico do indicador, nota-se uma queda de 10% nas emissões em comparação com o ano de 2019, atingindo o nível mais baixo desde 2007. É importante ressaltar que essa redução foi ocasionada pela desaceleração econômica resultante da pandemia de COVID-19, e não necessariamente pela descarbonização do setor da construção civil. As informações detalhadas sobre os impactos do setor estão expostas na Figura 34 (GLOBALABC, 2023).

Figura 34 - Detalhamento dos impactos ambientais relacionados ao setor da construção civil.



Fonte: adaptado de Globalabc (2023)

Os elevados índices de consumo de energia e emissões de CO₂ associados ao setor da construção civil destacam a necessidade do desenvolvimento de materiais de construção alternativos com desempenho ambiental superior. O

concreto, sendo o material predominante na execução de edificações e obras de grande porte, atualmente é o segundo recurso mais consumido pelo ser humano, ficando apenas atrás da água. O principal constituinte do concreto é o cimento Portland, que é responsável por 7% das emissões globais de CO₂, tornando-o um dos principais ofensores ambientais (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A principal etapa do processo produtivo do cimento Portland consiste na sinterização de materiais calcários, juntamente com fontes de alumina e sílica a uma temperatura de aproximadamente 1.450 °C ~ 1.550 °C, tendo como produto deste processo o clínquer. As emissões de CO₂ do cimento Portland estão atreladas à combustão de combustíveis fósseis necessárias para atender a elevada demanda de energia térmica para os fornos de sinterização, somadas ao processo químico de decomposição térmica dos carbonatos, que resultam na liberação de dióxido de carbono (ABDULKAREEM et al., 2021; MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE; BROOKS, 2013; NIDHEESH; KUMAR, 2019). Segundo o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável [2022?], os cimentos com maiores impactos ambientais, de alto teor de clínquer, são os principais ligantes utilizados na indústria para a produção de blocos de concreto, tendo como justificativa a demanda pelo ganho de resistência nas horas iniciais.

Neste cenário de elevada demanda por cimento Portland, somado ao alto impacto ambiental atrelado à sua produção, se criou a necessidade do desenvolvimento de um produto para atender aos requisitos de construções mais sustentáveis. Para Ganjian, Jalull e Sadeghi-Pouya (2015), a redução e/ou substituição do consumo de cimento Portland por outros aglomerantes com menor geração de dióxido de carbono, pode resultar em uma redução significativa da pegada ecológica do concreto.

Os materiais mais ecológicos, como os materiais álcali-ativados, começaram a ser desenvolvidos com o intuito de melhorar os indicadores ambientais do setor da construção civil (GARCES et al., 2021; HASSAN; ARIF; SHARIQ, 2019). A avaliação da sustentabilidade ambiental dos concretos álcali-ativados, realizada por Neupane (2022), destaca quatro principais pilares, sendo: a baixa emissão de gases do efeito estufa, a utilização de materiais residuais de outras indústrias para a sua produção, a redução da utilização de materiais extraídos (materiais virgens) e a vida útil longa das estruturas. Corroborando com estes pilares de sustentabilidade, Hassan, Arif e

Shariq (2019), acrescentaram outros aspectos positivos considerando as suas perspectivas de análise, que foram apresentados na da Figura 35.

Figura 35 - Perspectiva esquemática dos aspectos positivos dos concretos álcali-ativados.



Fonte: adaptado de Hassan, Arif e Shariq (2019)

É importante considerar que, apesar dos benefícios em termos de eficiência ambiental, a utilização de concretos álcali-ativados também apresenta desafios em relação à segurança. Hassan, Arif e Shariq (2019) alertam para os riscos associados à alta alcalinidade das soluções, o que pode exigir um uso mais rigoroso de Equipamentos de Proteção Individual (EPI). Além disso, apontam a falta de procedimentos de preparação claros, destacando a necessidade de desenvolver metodologias acessíveis para tornar a aplicação desses materiais viável em diversas áreas da construção civil.

2.2.1 Desempenho Ambiental

O setor da construção civil apresenta notoriedade pela capacidade de absorver resíduos provenientes de outras industriais tornando-a uma plataforma para transformar resíduos e subprodutos em materiais viáveis para o desenvolvimento de infraestruturas sustentáveis (SRIVIDYA; RAJKUMAR, 2022). Segundo El-Salamony, Mahmoud e Shehata (2020), a utilização de resíduos industriais é considerada uma ferramenta eficaz para a redução dos impactos ambientais em diferentes indústrias, inclusive a indústria de cimento.

A produção de cimento Portland ainda depende da extração de matérias-primas de fontes naturais e do uso de combustíveis fósseis, como petróleo e carvão, em seu ciclo de produção. Isso resulta em emissões significativas de gases poluentes e esgota os recursos naturais. No entanto, estão sendo implementadas iniciativas para reverter essa situação e reduzir a pegada ecológica. Uma delas é a inclusão de adições minerais como substituição parcial, mas ainda depende da presença de clínquer para desenvolver propriedades aglomerantes (NEUPANE, 2022). Isso demonstra a busca por alternativas mais sustentáveis na indústria do cimento.

O cimento álcali-ativado apresenta capacidade de mitigação ambiental ao utilizar resíduos como material precursor, conforme já descrito no item 2.1.1. Shehata et al. (2022) e Hassan, Arif e Shariq (2019) destacam que a maioria dos materiais precursores tem origem em resíduos sólidos de diferentes indústrias e pode ser utilizado como controle para grandes quantidades de resíduos, como escórias de alto forno e cinzas volantes. Somado a isso, segundo Nath (2020), o concreto álcali-ativado possui a capacidade de imobilizar metais pesados e resíduos tóxicos, o tornando uma possível solução sustentável para a mitigação de situações complexas, contudo, o entendimento sobre o mecanismo exato de imobilização por ligação química e encapsulamento físico não está consolidado, demandando novos estudos.

O estudo realizado por Petrillo et al. (2016) corrobora esse cenário ao identificar um impacto ambiental positivo na produção de materiais álcali-ativados. Eles observaram que a utilização de resíduos na composição desses materiais contribui para a mitigação dos impactos negativos associados ao processo produtivo, incluindo a redução da extração de matérias não renováveis, emissões de

CO₂, consumo energético e uso de combustíveis fósseis. Isso indica o potencial dos materiais álcali-ativados em reduzir a pegada ecológica da indústria da construção civil por meio da otimização dos materiais básicos utilizados.

Estudos indicam uma redução de 26% a 90% das emissões de CO₂ no processo produtivo do concreto ao utilizar os cimentos álcali-ativados em relação ao cimento Portland. Contudo, é necessário que o desenvolvimento do material seja projetado para que tenha baixo impacto ambiental, caso contrário, pode ocasionar um aumento nas emissões em relação ao produto à base de cimento Portland (DAVIDOVITS, 2015; GARCES et al., 2021; HABERT et al., 2011; PROVIS, 2014; PROVIS, 2018; TURNER; COLLINS, 2013).

Embora os materiais álcali-ativados apresentem potencial para tornar o setor da construção menos agressivo ao meio ambiente, a definição dos procedimentos e sua composição podem inviabilizar ambientalmente a sua produção. A definição das condições de cura ou a concentração do ativador alcalino em excesso podem resultar em um produto com acréscimo de 138,6% em emissões de CO₂ quando comparado ao cimento Portland para uma mesma classe de resistência. (TALLAT; EMAD; KOHAIL, 2023).

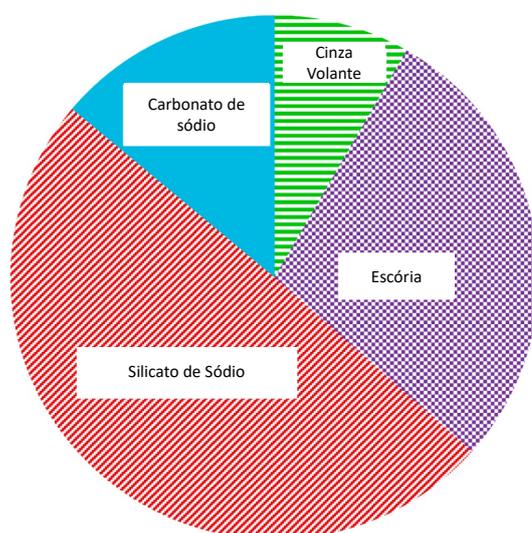
Conforme destacado por Tallat, Emad e Kohail (2023), o ativador alcalino representa a maior parcela do impacto ambiental dos materiais álcali-ativados, e a variação nos parâmetros de dosagem, como molaridade e concentração da solução utilizada, pode resultar em mudanças significativas nas contribuições ambientais. Por exemplo, a substituição da fonte de NaOH utilizada pode levar a um aumento de até 3,5 vezes nas emissões da solução alcalina. No entanto, é importante ressaltar que, mesmo ao buscar fontes alternativas para a produção do ativador alcalino visando à redução da pegada ambiental, deve-se considerar que a realização de processos de cura térmica prolongados pode resultar em emissões elevadas de CO₂. Portanto, é imperativo encontrar um equilíbrio na escolha do ativador alcalino e na implementação de um processo de cura eficaz, a fim de garantir a viabilidade ambiental na produção de concretos álcali-ativados.

De acordo com Garces et al. (2021), o melhor desempenho ambiental é alcançado através da redução do consumo e da concentração do ativador alcalino, bem como pela eliminação da necessidade de cura térmica em temperaturas elevadas. Eles sugerem que as características ambientais do concreto álcali-ativado devem ser avaliadas da mesma forma que o desempenho em outros parâmetros,

como resistência mecânica e durabilidade, destacando a importância de analisar e otimizar o impacto ambiental desses materiais.

O estudo realizado por Neupane (2022) avaliou as contribuições individuais dos constituintes dos cimentos álcali-ativados nas emissões de carbono, conforme apresentado na Figura 36. Os resultados confirmam a perspectiva de que o ativador alcalino é a principal fonte de emissões de carbono, respondendo por cerca de dois terços das emissões totais, enquanto a cinza volante, que representa 50% em massa do aglomerante, contribui com apenas 8% das emissões de carbono.

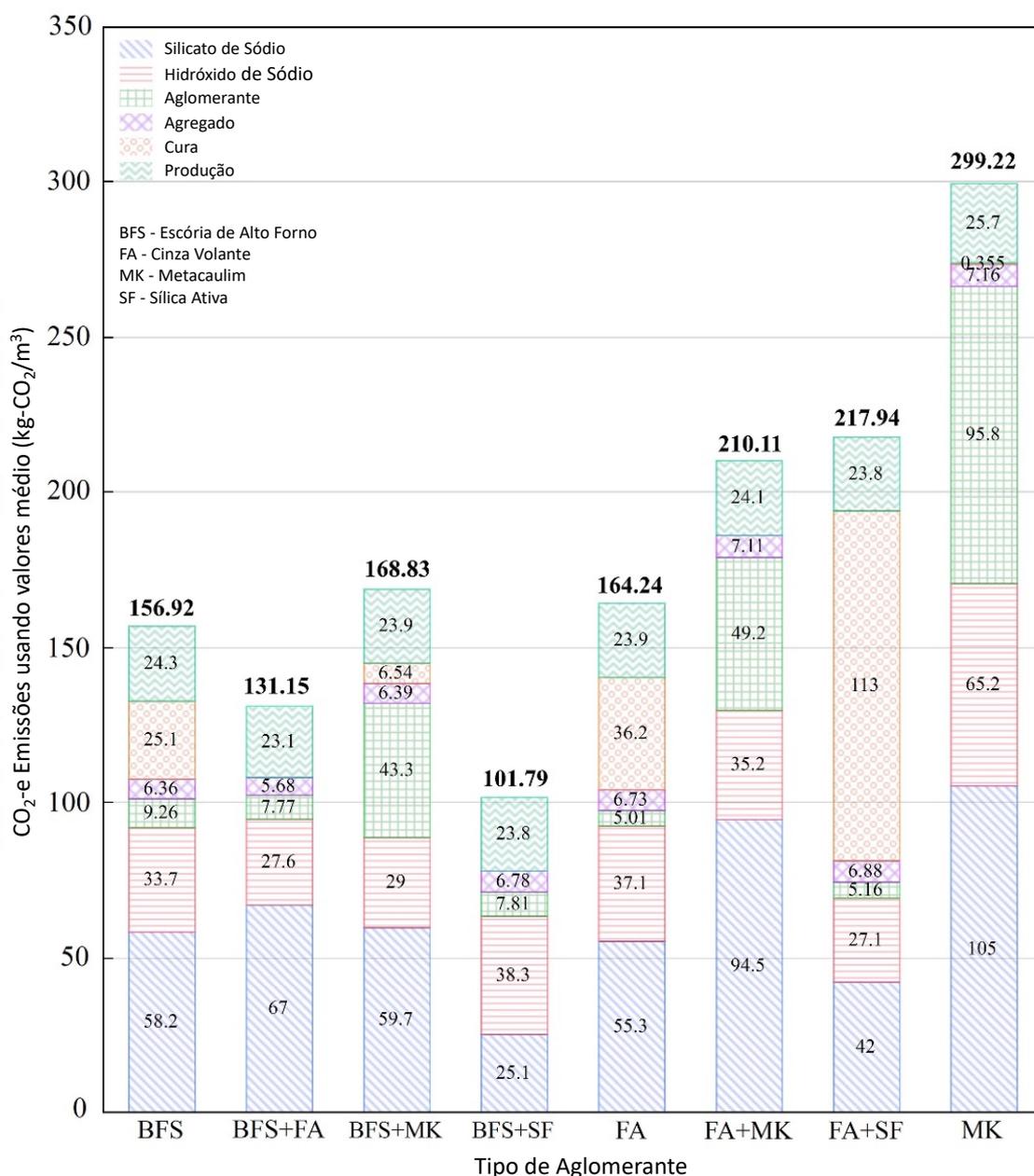
Figura 36 - Contribuição de carbono dos constituintes dos cimentos álcali-ativado



Fonte: adaptado de Neupane (2022)

O silicato de sódio, quando utilizado, é um dos principais contribuintes para o aumento nos impactos ambientais, como as emissões de CO₂, além de ter um elevado custo para aquisição (ABDULKAREEM et al., 2021; HABERT et al., 2011; MELLADO et al., 2014; PASSUELLO et al., 2017; RODRIGUEZ et al., 2013). No estudo conduzido por Tallat, Emad e Kohail (2023), as emissões foram estimadas para diferentes composições de aglomerantes álcali-ativados e segmentado por cada constituinte, conforme apresentado na Figura 37. Em todos os cenários do estudo, o silicato de sódio foi o principal emissor de carbono, exceto em uma das combinações, onde a cura térmica realizada por 24h teve maior contribuição, onde os resultados estão alinhados com as observações relatadas na literatura.

Figura 37 - Emissões de dióxido de carbono para diferentes composições de aglomerantes álcali-ativados.



Fonte: adaptado de Tallat, Emad e Kohail (2023)

Davidovits (2015) apresentou a evolução na eficiência do ativador alcalino ao longo do tempo na produção de concretos com cura ambiente, como pode ser observado na Tabela 7. Ao analisar a composição do material em 1985, pode-se observar que a presença de silicato de potássio correspondia a 50% da massa do material, enquanto em 2006, o teor reduziu para 14% em uma mistura com resistência à compressão de 100 MPa e 10% para o material com 40 MPa de resistência à compressão.

Tabela 7 - Evolução na eficiência do uso de silicato de potássio na produção de concretos álcali-ativados

Material	Ano	Resistência à compressão	Teor de Silicato de Potássio
Geopolymite 50	1987	-	50%
Pyrament	1985	-	50%
À base de rochas	1997	100 MPa	20%
À base de rochas	2002	50 MPa	17%
À base de cinzas volantes	2006	100 MPa	14%
À base de cinzas volantes	2006	40 MPa	10%

Fonte: adaptado de Davidovits (2015)

Talaat, Emad e Kohail (2023) indicam que o desempenho ambiental dos materiais álcali-ativados não apresenta uma correlação direta com as características mecânicas do material, ou seja, o aumento nos indicadores de impacto ambiental não necessariamente irá garantir o aumento na resistência do produto. Portanto, é possível desenvolver um concreto ecologicamente correto sem comprometer o desempenho mecânico.

2.2.2 Análise do Ciclo de Vida

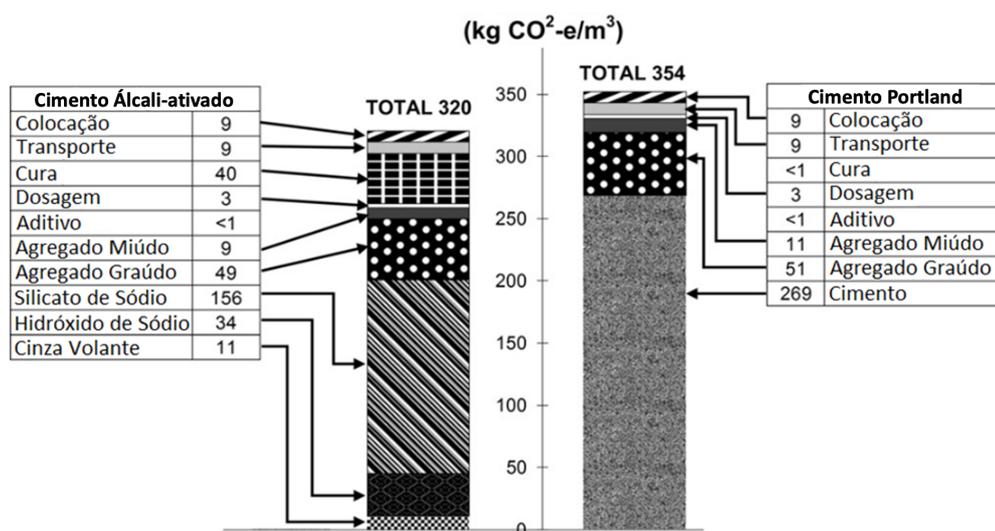
O ciclo de produção do cimento Portland demanda um processo de sinterização de rochas calcárias, que resulta na liberação de um grande volume de dióxido de carbono, tanto na queima de combustíveis fósseis, para gerar energia no processo de sinterização, quanto devido ao fenômeno de descarbonatação do calcário. Além dessas características intrínsecas ao processo produtivo do cimento Portland, é necessária a extração de matérias primas virgens para a sua produção (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEUPANE, 2022).

A literatura apresenta severas divergências entre autores com relação às análises do ciclo de vida dos materiais álcali-ativados. Davidovits (2015), um dos pioneiros no desenvolvimento deste cimento, afirma que estudos apresentam erros de cálculos e de metodologia na obtenção dos valores de emissão de CO₂, além de criticar a utilização de seus resultados como referência em outros estudos sem análise crítica.

O estudo conduzido por Turner e Collins (2013), avaliou as emissões de CO₂ em todas as etapas da fabricação do concreto, considerando a obtenção da matéria-

prima, fabricação do concreto e a posterior utilização na construção. O resultado da comparação registrou uma redução de apenas 9% nas emissões do concreto álcali-ativado em relação ao cimento Portland, tendo o ativador alcalino (hidróxido de sódio + silicato de sódio) responsável por aproximadamente 60% das emissões totais do concreto álcali-ativado, como pode ser observado na Figura 38.

Figura 38 - Comparação das emissões de CO₂ entre concretos produzidos com cimento Portland e Álcali-ativado.



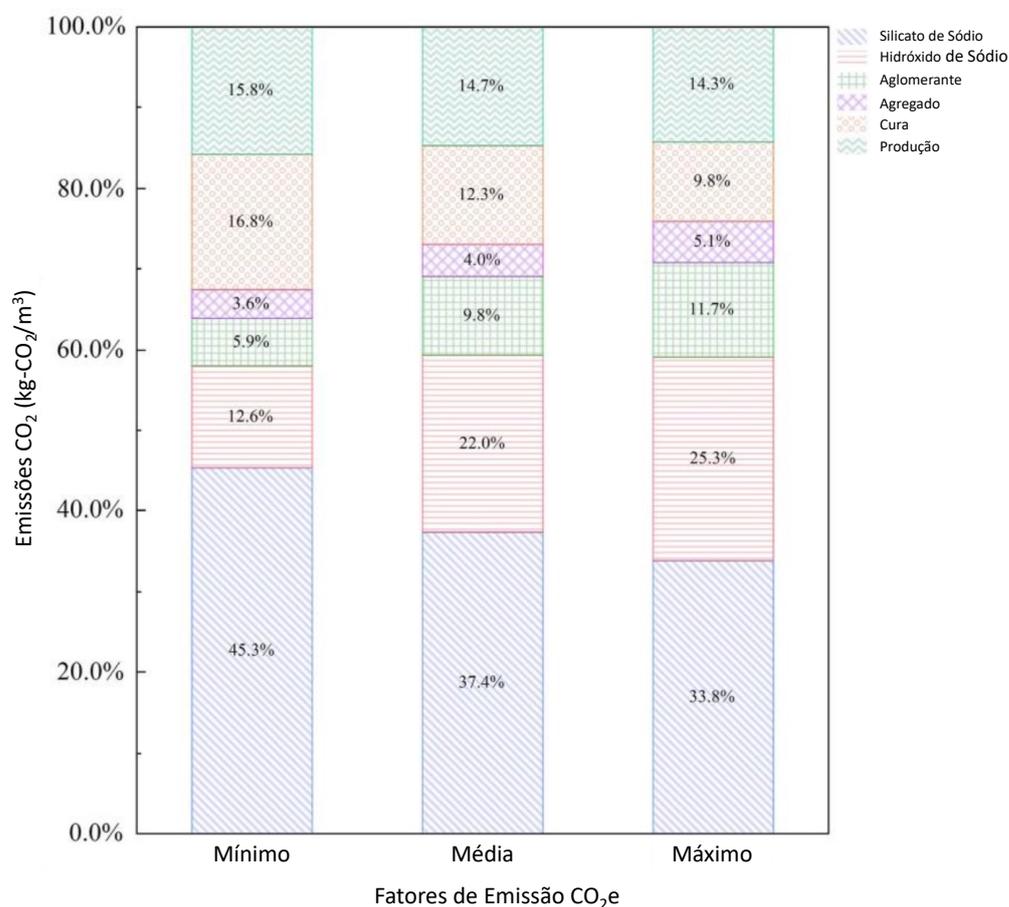
Fonte: adaptado de Turner e Collins (2013)

Davidovits (2015) contesta o cálculo das emissões relacionadas ao silicato de sódio elaborado por Turner e Collins (2013), argumentando que eles consideraram erroneamente o valor integral da solução como silicato de sódio, quando na verdade apenas 45% do volume corresponde ao sólido. Isso reduziria as emissões atribuídas de 156 kg CO₂/m³ para 69,01 kg CO₂/m³. Os novos valores obtidos reduziriam em 27% as emissões do concreto álcali-ativado indicado por Turner e Collins (2013).

Conforme destacado por Rodriguez et al. (2013) e Villaquirán-Caicedo et al. (2015), o processo de produção do silicato de sódio comercial é um fator determinante na avaliação da viabilidade ambiental dos materiais álcali-ativados. Esse processo envolve a calcinação do carbonato de sódio e do quartzo a temperaturas elevadas, geralmente entre 1400 °C e 1500 °C, o que resulta na emissão significativa de dióxido de carbono (CO₂) durante a descarbonatação e no alto consumo de energia. Essa semelhança no processo produtivo do silicato de sódio com a clinquerização do cimento Portland justifica seu impacto na energia incorporada e nas emissões dos materiais ativados por álcalis. O estudo de Talaat,

Emad e Kohail (2023) ilustra o impacto do silicato de sódio em diferentes composições de concretos álcali-ativados, conforme evidenciado na Figura 39.

Figura 39 – Fatores de emissão de CO₂ para os constituintes do concreto álcali-ativado.



Fonte: adaptado de Talaat, Emad e Kohail (2023)

O estudo desenvolvido por McLellan et al. (2011) também foi contestado por Davidovits (2015). McLellan et al. sugeriram uma ampla variação no desempenho ambiental dos cimentos álcali-ativados, indicando que esses materiais poderiam reduzir as emissões de CO₂ em até 97% em comparação com a matriz de cimento Portland. No entanto, também apontaram a possibilidade de aumento em 14% na geração de dióxido de carbono. Davidovits (2015) questionou principalmente a distância de deslocamento necessária para adquirir o silicato de sódio usado nos cálculos, enfatizando que a localização é um fator crítico que afeta a sustentabilidade geral do produto.

O desempenho ambiental do material álcali-ativado é melhor na maioria dos cenários estudados, embora a literatura apresente grandes divergências e variações

de resultados. Mesmo assim, há o consenso de ser um ligante altamente eficiente em termos de liberação de carbono ao meio, quando comparado ao cimento Portland, principalmente quando não é necessário o processo de cura térmica e o uso racionalizado do silicato de sódio e do hidróxido de sódio (NEUPANE, 2022; TALAAT; EMAD; KOHAIL, 2023).

Portanto, a obtenção de indicadores que descrevam o impacto ambiental na produção em escala industrial de materiais álcali-ativados é um desafio complexo. A obtenção de informações precisas sobre emissões de CO₂ e energia incorporada nesse contexto deve ser considerada com cautela, devido à falta de uma infraestrutura de suporte estruturada para uma indústria ainda em desenvolvimento, onde a transição de estudos laboratoriais para a aplicação em escala industrial está em seus estágios iniciais.

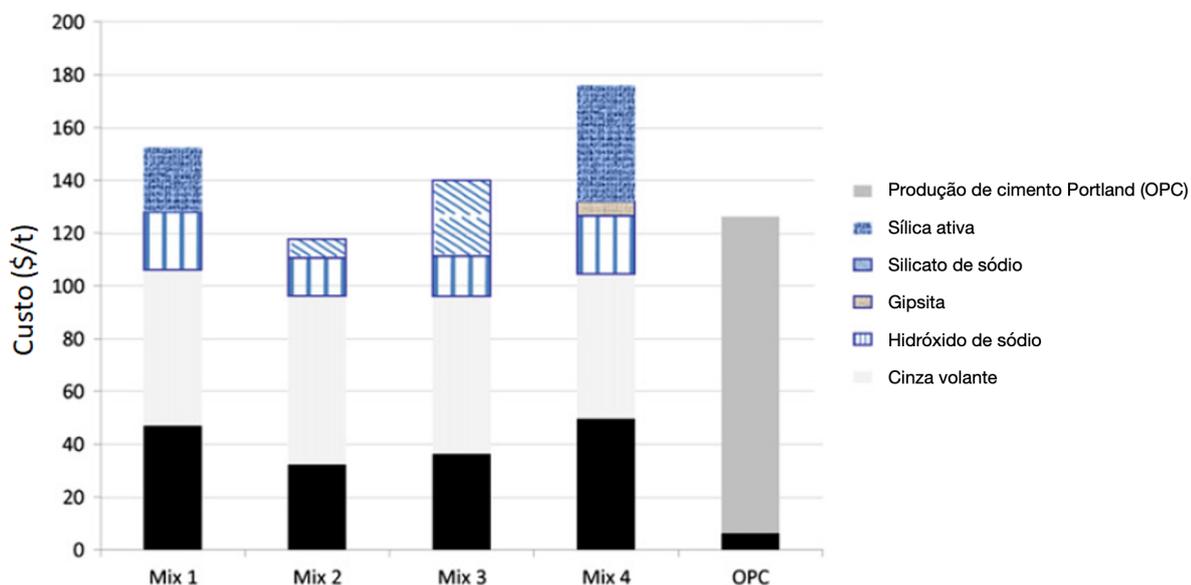
2.3 ANÁLISE DE CUSTOS

As etapas de produção do cimento ativado por álcalis e as etapas de produção do cimento Portland são diferentes e demandam infraestruturas distintas. O processo produtivo do cimento Portland é mais complexo e a etapa de sinterização das rochas calcárias demanda a estruturação da operação de fornos de extrema alta temperatura, o que aumenta o capital inicial de investimento para a aquisição de equipamentos e implantação de uma planta fabril (DAVIDOVITS, 2015).

Os cimentos álcali-ativados também apresentam vantagem econômica em relação a sua fonte de material precursor. A ampla variedade de aluminossilicatos naturais, recursos geológicos disponíveis em todos os continentes, e os aluminossilicatos residuais, coprodutos de outras indústrias, contribuem para a disponibilidade de matéria prima para os cimentos álcali-ativados.

Para McLellan et al. (2011), os maiores desafios econômicos dos materiais álcali-ativados encontram-se na otimização do ativador alcalino, redução da necessidade de transporte e na obtenção matérias-primas residuais de menor custo. A ampla variedade de composições e resultados (Figura 40), demanda que seja realizada uma análise sobre a viabilidade de produção, tanto no aspecto de desempenho técnico, ambiental e econômico.

Figura 40 - Comparação de custo (em dólares australianos) entre pastas produzidas com cimento álcali-ativado e cimento Portland.



Fonte: adaptado de McLellan et al. (2011)

O aspecto da viabilidade econômica espelha os mesmos desafios da viabilidade ambiental, pois o desenvolvimento de materiais álcali-ativados pode levar a uma ampla variação nos custos. Por exemplo, estudos como o de McLellan et al. (2011) indicam que os custos podem ser reduzidos em até 72%, enquanto em outros cenários, os custos podem aumentar até oito vezes. Embora os materiais precursores em si geralmente tenham custos relativamente baixos, o ativador alcalino, como o hidróxido de sódio (representando 41%) e o silicato de sódio (representando 19%), pode se tornar o principal componente de custo nos materiais álcali-ativados. Portanto, como indicado por Neupane (2022), o desenvolvimento de uma matriz cimentícia álcali-ativada que seja mais econômica, com menor emissão de carbono e menor consumo energético (especialmente através da eliminação do processo de cura térmica) depende do uso mais eficiente de materiais como o silicato de sódio e o hidróxido de sódio.

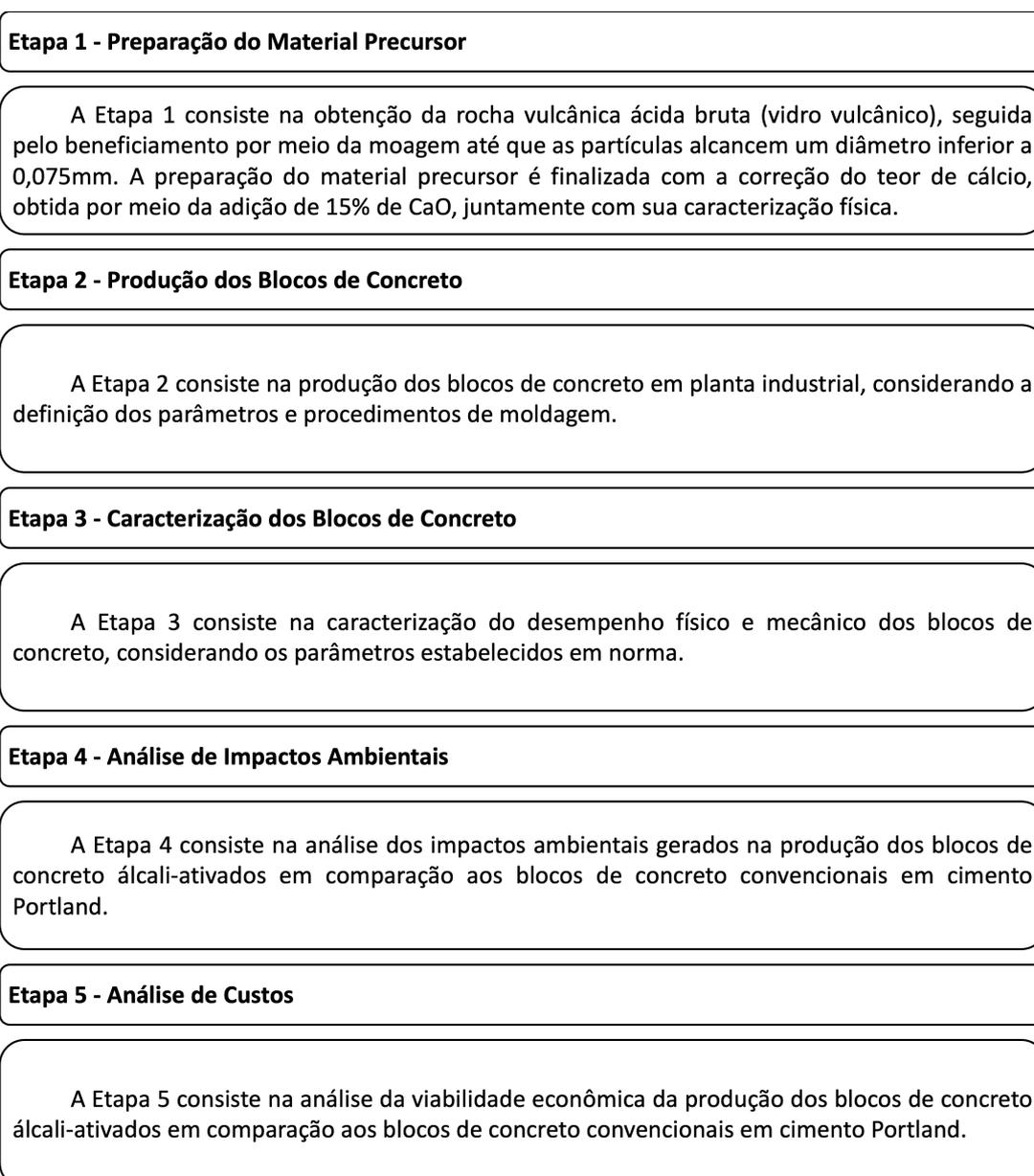
É fundamental destacar que, apesar da primordial importância da análise dos custos associados à fabricação de concretos álcali-ativados e da avaliação de seu desempenho ambiental, existe uma notável lacuna na literatura científica quanto à investigação abrangente que englobe simultaneamente os aspectos técnicos, ambientais e econômicos, especialmente em uma escala de produção industrial. No âmbito deste estudo, que utiliza rocha vulcânica ácida como matéria-prima e que

tem sido extensivamente investigado em escala laboratorial como pasta de cimento, no contexto do grupo de pesquisa ao qual este trabalho está associado, não foram encontrados registros de pesquisas que abordem esses elementos de maneira integrada, com o objetivo de viabilizar a produção de componentes de concreto em uma escala industrial.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, a metodologia que foi desenvolvida para alcançar os objetivos estabelecidos é apresentada. Inicialmente, foi conduzido um estudo piloto para validar alguns parâmetros de produção, como descrito na seção 3.1. Em seguida, o programa experimental foi dividido em cinco etapas para estruturar o processo de fabricação, começando com a obtenção e preparação do material precursor e culminando com a análise de desempenho dos blocos de concreto. A Figura 41 oferece um resumo das atividades em cada uma dessas etapas.

Figura 41 - Quadro resumo das etapas do programa experimental



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

3.1 ESTUDO PILOTO

A aplicação de pastas de cimento álcali-ativado à base de vidro vulcânico, que foram desenvolvidas e caracterizadas em estudos anteriores pelo grupo de pesquisa, para a produção de blocos de concreto álcali-ativado em escala industrial, representou um desafio significativo. Para validar os parâmetros de produção, foi necessário realizar um estudo piloto. Esse estudo piloto, que deu origem ao trabalho de Kreutzer (2022), confirmou a estabilidade do material em relação aos processos de deterioração por dissolução quando em contato com a água, uma preocupação inicialmente identificada por Staudt (2019). Além disso, o estudo piloto permitiu validar as correções na composição química do vidro vulcânico, conforme sugerido por Koppe (2021).

3.1.1 Composição do Traço e Produção de Concreto Álcali-ativado

Os parâmetros adotados para a elaboração dos traços utilizados no ensaio piloto foram determinados com base nas pesquisas conduzidas por Staudt (2019) e Koppe (2021), além de considerar informações fornecidas pela fábrica de blocos parceira. Os detalhes das formulações dos traços piloto podem ser encontrados na Tabela 8. Para a preparação da solução alcalina, utilizou-se NaOH com um grau de pureza de 97%, em uma concentração de 6 molar, e a relação entre a solução e o aglomerante foi de 0,6.

Tabela 8 – Traços unitários, em massa, dos concretos ativados por álcalis utilizados no estudo piloto.

Traço	10%	15%
Vidro vulcânico	0,9	0,85
Óxido de cálcio	0,1	0,15
Areia média	4,75	4,75
Brita 0	2,5	2,5
Pó de brita	4,5	4,5

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

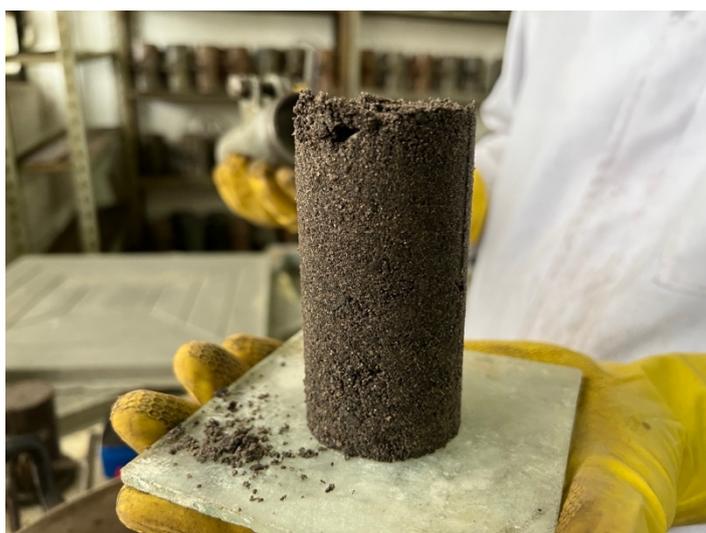
O processo de produção teve início com a introdução dos agregados no misturador de eixo vertical e a adição de água para atingir a condição dos agregados saturados com a superfície seca, com homogeneização por 5 minutos. Em seguida,

o material precursor foi adicionado e homogeneizado por mais 5 minutos. O processo foi concluído com a adição do ativador alcalino, sendo homogeneizado por mais 3 minutos.

Foi possível validar a viabilidade do processo de moldagem e desmoldagem do concreto álcali-ativado, utilizando vidro vulcânico como material precursor. Após a moldagem, as amostras foram compactadas manualmente, conforme diretrizes da NBR 7215 (ABNT, 2019). Em seguida, foram submetidas a um processo de cura térmica em estufa a uma temperatura de 80 °C por um período de 17 horas. Posteriormente, as amostras foram armazenadas em um ambiente controlado, com temperatura mantida a 23 °C ± 2 °C e umidade relativa do ar de 60%, até a data de rompimento. Neste ponto, as amostras foram retificadas e submetidas a ensaios de compressão uniaxial.

A Figura 42 ilustra uma amostra que foi desformada imediatamente após a sua moldagem. É evidente que a superfície superior sofreu danos ao ser retirada do molde. Essa ocorrência provavelmente se deve à ineficiência do processo de compactação manual que foi utilizado, não proporcionando a energia de compactação necessária para uma desmoldagem imediata adequada.

Figura 42 – Amostra de concreto álcali-ativada desmoldada imediatamente após moldagem do corpo de prova.



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

As amostras foram ensaiadas em três idades: 1 dia, 7 dias e 28 dias. Os resultados do comportamento mecânico do ensaio piloto estão expostos na Tabela 9.

Tabela 9 – Resultados do ensaio de resistência à compressão do teste piloto. As resistências potenciais obtidas são apresentadas em itálico, e as médias em negrito.

Idade	Descrição	10%	15%
1 dia		<i>2,6</i>	<i>5,3</i>
	Resistência (MPa)	<i>2,4</i>	<i>4,4</i>
		4,4	5,8
	Média (MPa)	3,1	5,2
	Desvio Padrão	1,1	0,7
7 dias		<i>4,5</i>	<i>6,2</i>
	Resistência (MPa)	<i>4,1</i>	<i>4,8</i>
		5,7	6,4
	Média (MPa)	4,8	5,8
	Desvio Padrão	0,8	0,9
28 dias		<i>4,2</i>	<i>7,2</i>
	Resistência (MPa)	<i>5,0</i>	<i>7,5</i>
		5,9	7,6
	Média (MPa)	5,0	7,4
	Desvio Padrão	0,9	0,2

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

Além da avaliação do comportamento mecânico, a estabilidade dimensional das amostras do projeto piloto também foi investigada em contato com a água, seguindo a mesma abordagem utilizada por Staudt (2019) e Koppe (2021), conforme ilustrado nas Figura 29 a Figura 33. A Figura 43 apresenta as amostras do projeto piloto após 24 horas submersas em água, indicando a possível estabilidade dimensional do material, uma vez que não apresentaram deformações visíveis na intensidade das deformações observadas por Staudt (2019).

Figura 43 – Ensaio de estabilidade dimensional: (a) Amostras de concreto álcali-ativado do traço de 10% após 24 horas submersas; (b) Amostras de concreto álcali-ativado do traço de 15% após 24 horas submersas.



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

Por meio do ensaio piloto, foi possível confirmar a hipótese proposta por Koppe (2021) de que a inclusão do óxido de cálcio evita as reações prejudiciais ao concreto álcali-ativado produzido com rochas vulcânicas ácidas, corrigindo o comportamento deletério observado em formulações anteriores de pastas de cimento que não continham óxido de cálcio. Devido à limitação de material precursor disponíveis para a pesquisa, não foi viável avaliar adições intermediárias de CaO. Ambas as composições demonstraram estabilidade dimensional, contudo, as amostras com adição de 15% de CaO apresentaram um desempenho mecânico superior, sendo, portanto, selecionada para a produção dos blocos neste estudo.

3.2 PREPARAÇÃO DO MATERIAL PRECURSOR

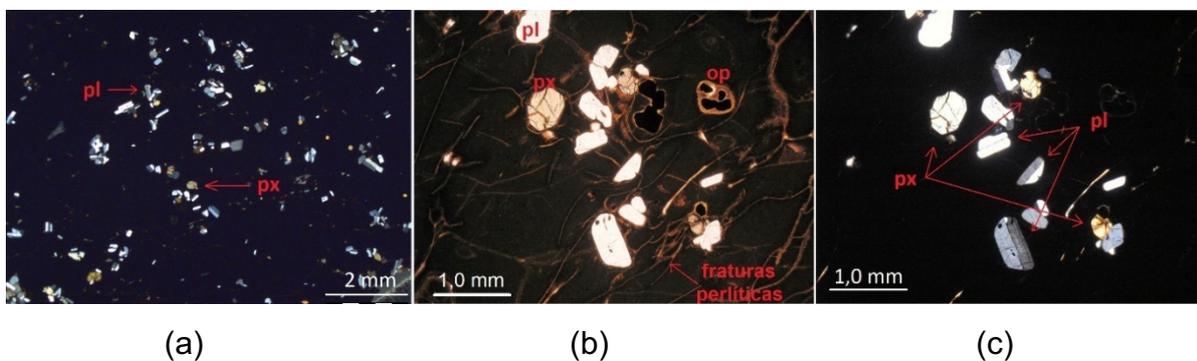
O material precursor utilizado para a produção do cimento álcali-ativado foi produzido a partir do vidro vulcânico, também denominado de forma mais específica como obsidiana, amplamente utilizado nos estudos desenvolvidos pelo grupo de pesquisa GMat - Grupo de Pesquisa em Materiais e Reciclagem da Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Este material é originário de um afloramento rochoso situado na cidade de Caxias do Sul - RS, com descrição geológica pertencente ao grupo Palmas, subtipo Jacuí.

A análise petrográfica observou que o exemplar de rocha vulcânica ácida coletado se encontra em estado vítreo, com aproximadamente 80% da matriz sendo composta por material amorfo. A rocha exibe uma textura microporfirítica, na qual

microfenocristais de plagioclásio e clinopiroxênio, possivelmente andesina e augita, respectivamente, estão presentes.

Na Figura 44 são identificados os microfenocristais de plagioclásio (pl), clinopiroxênio (px) e minerais opacos (op), esses últimos, podem ser hematita e/ou magnetita. Em geral, são subédricos (bem formados) com grãos finos imersos em vidro, com dimensões inferiores a 0,5 mm. A porção castanho escuro na Figura 44(b) representa a porção de vidro na amostra, apresentando fraturas perlíticas e poucos cristálitos, indicando a ausência de devitrificação na amostra.

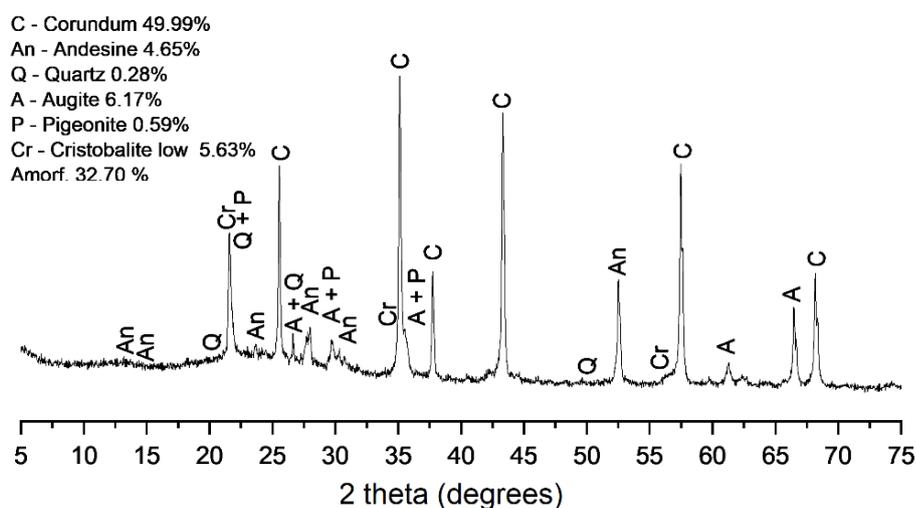
Figura 44 - Análise petrográfica do vidro vulcânico coletado na cidade de Caxias do Sul



Fonte: adaptado de Staudt et al. (2017)

No estudo realizado por Koppe (2021), o vidro vulcânico de Caxias do Sul foi caracterizado por meio de análise de DRX associado ao refinamento de Rietveld. Os resultados indicaram que aproximadamente 65,4% da composição do vidro corresponde à fase amorfa. Na análise qualitativa foram identificadas cinco fases cristalinas: andesina, quartzo, augita, pigeonita e cristobalita low. A caracterização da amostra é indicada na Figura 45. O mineral corundum presente neste difratograma, corresponde ao fator de controle para viabilizar a quantificação das demais fases cristalinas.

Figura 45 - Difratoograma de DRX com refinamento de Rietveld do vidro vulcânico de Caxias do Sul.



Fonte: adaptado de Koppe (2021)

Os resultados do refinamento de Rietveld do estudo de Koppe (2021) estão apresentados na Tabela 10. A fração amorfa de 65,4% do material em questão corresponde à parcela vítrea da amostra. Cristais como augita, cristobalita low e andesina representam as maiores fases cristalinas do precursor. A pigeonita e, principalmente, o quartzo, apresentam-se em menor percentual, sendo a soma entre eles inferior a 2% do total da amostra.

Tabela 10 - Composição de fases da rocha de Caxias do Sul.

Fase	% em peso original da rocha
Andesina	9,289
Quartzo	0,552
Augita	12,335
Pigeonita	1,180
Cristobalita low	11,248
Amorfo	65,400

Fonte: adaptado de Koppe (2021)

No estudo desenvolvido por Koppe (2021) foi verificada a composição da fração reativa à ativação alcalina através da técnica de digestão da rocha bruta em solução alcalina com posterior análise de FRX para identificar a proporção cristalina dos óxidos SiO_2 e Al_2O_3 , apresentados na Tabela 11. Considerando apenas a parcela reativa que compõe a rocha vulcânica, a proporção molar $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$

corresponde a 9,34. A autora identificou, também, que a fase de CaO presente na amostra se encontra na sua totalidade na fase cristalina.

Tabela 11 - Quantificação da fração reativa do vidro vulcânico

Material	Fase amorfa (%)	SiO ₂ amorfo (%)	Al ₂ O ₃ amorfo (%)	SiO ₂ /Al ₂ O ₃ (razão Molar)
Caxias do Sul	65,40	47,85	8,70	9,34

Fonte: adaptado de Koppe (2021)

O processo de cominuição da rocha para utilização como material precursor neste estudo começou com a trituração inicial usando um triturador mandíbula. Em seguida, a umidade presente na rocha foi removida em uma estufa antes de ser submetida ao moinho de bolas horizontal, que operou a uma rotação aproximada de 50 rpm. Essa etapa foi realizada em lotes de 3 kg de material, devido à capacidade limitada do jarro cerâmico de 7,5 dm³, que também continha 1,5 kg de esferas de alumina de 20 mm e 1,5 kg de esferas de 10 mm. O tempo total de moagem foi definido como 2 horas, mas o parâmetro de controle principal era a dimensão máxima das partículas passantes na peneira 200 (0,074 mm). O material mais grosseiro, que não atendia a esse critério, era coletado e reinserido no moinho de bolas. A Figura 46 apresenta o material beneficiado resultante, que serviu como material precursor.

Figura 46 - Rocha beneficiada.



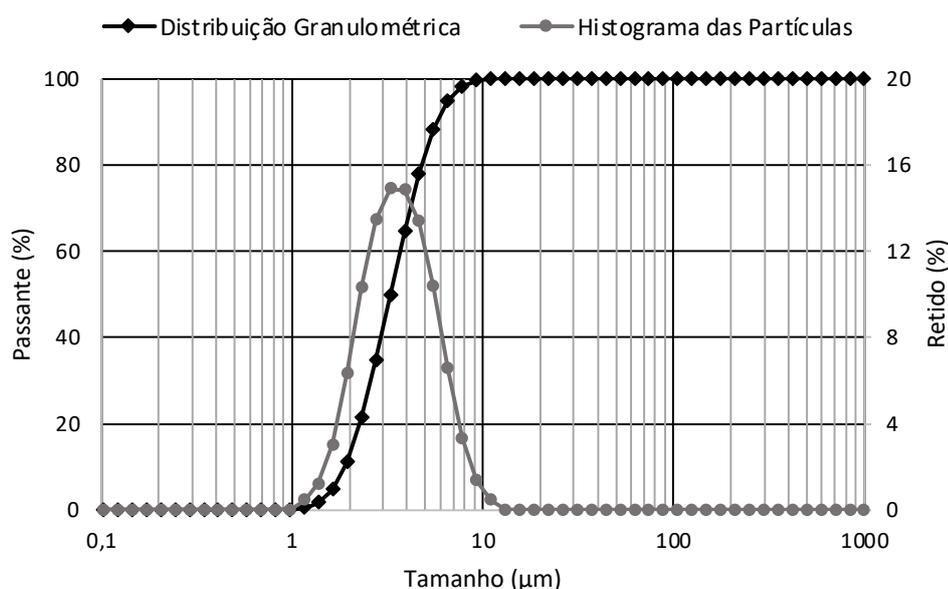
Fonte: elaborado pelo autor (2023)

A determinação da composição do material precursor foi definida com base no estudo piloto e nas pesquisas conduzidas por Staudt (2019) e Koppe (2021).

Para corrigir o teor de cálcio na rocha vulcânica ácida, foi adicionado e homogeneizado 15% de óxido de cálcio (de origem PA, com grau de pureza de 97%), em relação à massa do vidro vulcânico. Esta correção química teve como objetivo aperfeiçoar o desempenho mecânico e de durabilidade dos blocos de concreto em contato com a água, através da estabilidade do produto formado no processo de polimerização do cimento álcali-ativado.

A caracterização física do material precursor, já com a adição do CaO, foi realizada no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVMat) da Universidade do Vale do Rio dos Sinos. A curva granulométrica do material precursor foi determinada através do ensaio de granulometria a laser, utilizando a técnica de difração de luz laser com o analisador de partículas da marca Microtrac S3500, seguindo a ISO 13320 (ISO, 2020). O ensaio foi realizado por via úmida, utilizando como dispersante de partículas o hexametáfosfato de sódio $(\text{NaPO}_3)_6$, ultrassom externo (100W por 1440s) e ultrassom interno (40W por 300s). Na Figura 47 é apresentada a curva de distribuição granulométrica e o histograma dos diâmetros das partículas do vidro vulcânico.

Figura 47 - Distribuição granulométrica das partículas do material precursor com o CaO homogeneizado.



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

A determinação da área superficial das partículas de cimento sucedeu pelo método BET (Braunauer, Emmet e Teller), que consiste em analisar a adsorção de nitrogênio, utilizando o equipamento TriStar II PLUS da Micromeritics. A preparação da amostra ocorreu com a secagem em estufa a 105 ± 5 °C e posteriormente submetida ao equipamento VacPrep 061, também da Micromeritics, para o aquecimento (105 °C) e evacuação.

A massa específica do material foi determinada através do picnômetro a gás Hélio da marca Micromeritics, modelo AccuPyc II 1340. O material em análise é inserido dentro de um recipiente metálico e fechado, com uma tampa porosa. Em seguida o gás Hélio é inserido no recipiente e, com base no volume de ar presente no cilindro de ensaio e a massa, é determinada a massa específica do material. Os resultados da caracterização física estão resumidos na Tabela 12. A área superficial do material precursor, que consiste no vidro vulcânico com a adição de óxido de cálcio, obtido neste estudo é aproximadamente 4,3 vezes menor do que a obtida por Staudt (2019), enquanto o diâmetro médio das partículas é aproximadamente duas vezes maior.

Tabela 12 - Características físicas do material precursor

Característica	Vidro Vulcânico	
Área Superficial (cm²/g)	37.709 ± 128	
Massa Específica (g/cm³)	2,4119	
Análise Granulométrica (µm)	D10	1,901
	D50	3,28
	D90	5,71
	DMédio	3,50

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

3.3 PRODUÇÃO DOS BLOCOS DE CONCRETO DE ALVENARIA

Neste item são abordadas as definições de preparação do ativador alcalino adotado no trabalho e os procedimentos e condicionantes do processo de produção dos blocos de concreto em planta industrial.

3.3.1 Composição do Traço

O traço utilizado na produção do concreto foi adotado com base nos estudos desenvolvidos por Staudt (2019), Koppe (2021) e Kreutzer (2022), e complementados com as definições utilizadas na planta industrial para a produção dos blocos de concreto convencional (cimento Portland). O traço do concreto álcali-ativado adotado tem como base a composição do concreto com cimento Portland utilizado para a produção dos blocos convencionais, com apenas a substituição da matriz cimentícia utilizada. O traço unitário utilizado está exposto na Tabela 13.

Tabela 13 - Traço Unitário do concreto utilizado para a produção dos blocos de concreto álcali-ativado.

Material	Referência	Álcali-ativado
Cimento Portland (CP V)	1	-
Cimento Álcali-ativado	-	1
Areia Industrial	4,22	4,22
Areia Natural	2,44	2,44
Granilha	2,44	2,44
Pedrisco	2	2

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

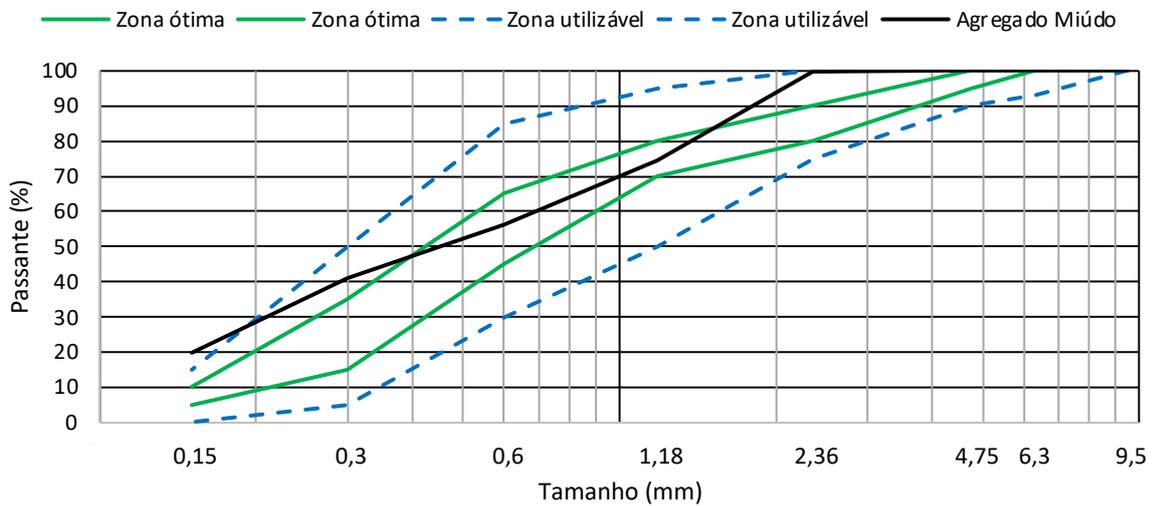
O ativador alcalino utilizado foi constituído por hidróxido de sódio P.A. (NaOH) com pureza mínima de 97% e água, com concentração de 6 mol. A sua preparação se deu através da mistura da água com o hidróxido de sódio por 60 segundos. O ativador alcalino homogeneizado com o material precursor resultou em uma relação água/material precursor igual a 0,45.

A umidade dos agregados utilizados na planta industrial variou de 0% a 8%, com a areia natural apresentando a maior umidade (8%), seguida pela areia industrial (6%), granilha (2%) e pedrisco (0%). Durante o processo de preparação do ativador alcalino, a umidade presente nos materiais foi reduzida da água disponibilizada para a solução. No entanto, essa correção resultou em um aumento da concentração de hidróxido de sódio na mistura, o que pode ter dificultado a sua dissolução e aumentado a intensidade das reações exotérmicas. Esse aumento na concentração de hidróxido de sódio pode também ter dificultado a completa homogeneização do ativador alcalino com o material precursor.

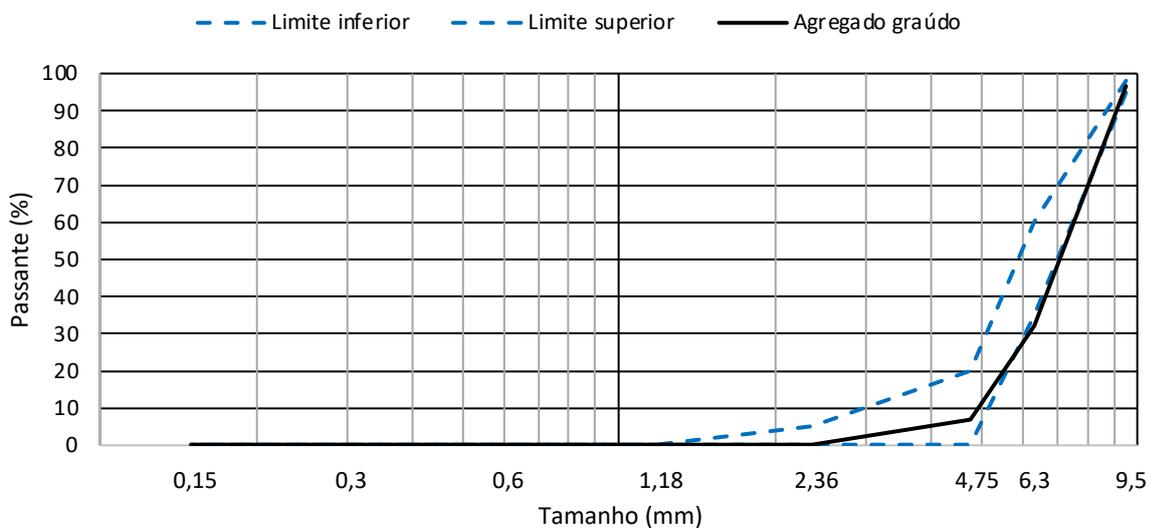
A areia natural, a areia industrial e a granilha foram classificadas como agregados miúdos, enquanto o pedrisco foi classificado como agregado graúdo, de acordo com os critérios estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2022). A norma também estabelece critérios para a distribuição granulométrica dos agregados utilizados na produção do concreto. A Figura 48(a) apresenta a curva granulométrica da composição do agregado miúdo, enquanto a Figura 48(b) apresenta a curva granulométrica do agregado graúdo (pedrisco).

Figura 48 - Distribuição granulométrica: (a) Composição do agregado miúdo; (b) Agregado graúdo.

(continua)



(a)

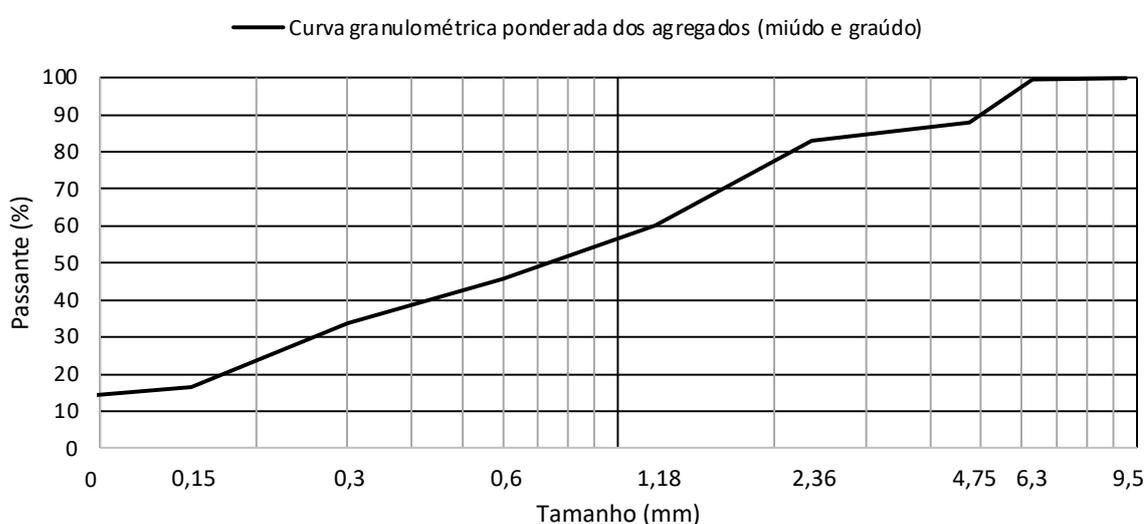


(b)

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

A análise da granulometria dos materiais utilizados revela que a composição do agregado miúdo ultrapassa o limite superior dos parâmetros definidos em norma, enquanto o pedrisco fica abaixo do limite inferior estabelecido. Isso indica que os agregados utilizados não estão em conformidade com os padrões estabelecidos pela norma. A Figura 49 apresenta a granulometria consolidada e ponderada dos quatro agregados, destacando a heterogeneidade nas dimensões das partículas, o que pode contribuir para um empacotamento mais eficiente das partículas.

Figura 49 – Compilação da distribuição granulométrica dos agregados utilizados



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

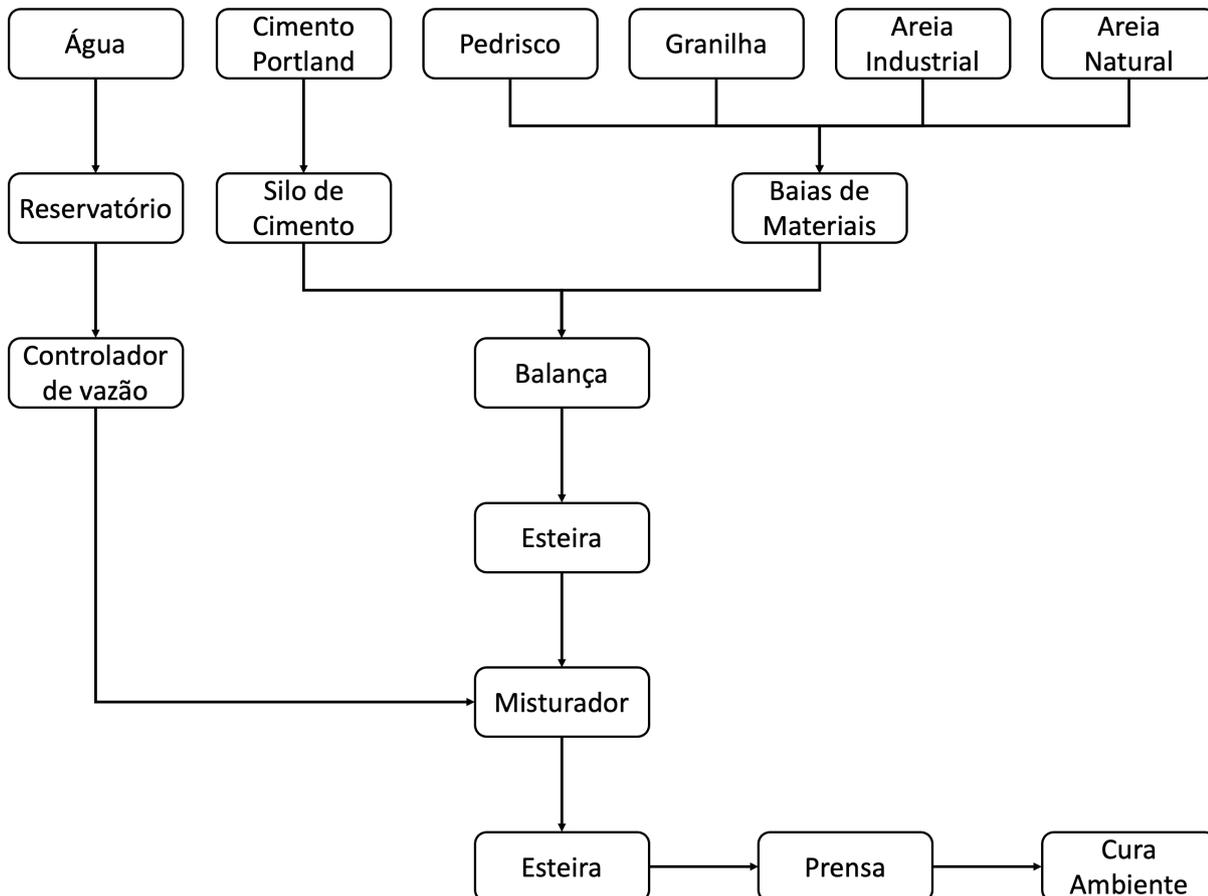
Devido ao fato de estarem fora dos limites estabelecidos para o diâmetro máximo e mínimo, a norma NBR 7211 (ABNT, 2022) sugere que os agregados passem por uma análise de viabilidade antes de serem utilizados na produção de concreto. No entanto, uma vez que o objetivo deste estudo é manter os parâmetros de produção utilizados na planta industrial, com a única substituição sendo o aglomerante, optou-se por empregar os agregados mencionados, apesar das variações em suas características granulométricas.

3.3.2 Fabricação de Blocos de Concreto com Cimento Portland

A produção dos blocos de concreto foi realizada em planta industrial, em escala real, com o apoio da empresa Millato, localizada em São Pedro da Serra, RS. A fábrica de artefatos de concreto conta com infraestrutura robusta, com central

dosadora e misturador industrial. A Figura 50 apresenta o fluxograma do processo produtivo dos blocos de concreto convencional, utilizando cimento Portland.

Figura 50 - Fluxograma do processo produtivo dos blocos de concreto com cimento convencional.

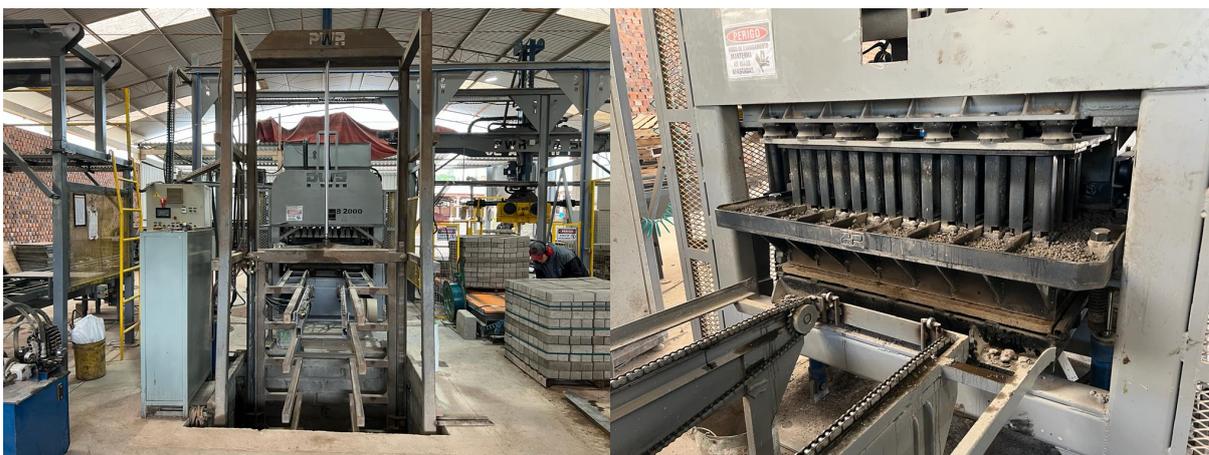


Fonte: elaborado pelo autor (2023)

Os agregados utilizados na produção dos blocos de concreto são dispostos em baias individuais, enquanto o cimento Portland é armazenado em um silo exclusivo. Os materiais a serem utilizados na produção do concreto são separados de forma autônoma em acordo com as definições (*input*) do traço na central dosadora, e posteriormente direcionado ao misturar através de uma esteira rolante.

Após a separação e transporte dos materiais até o misturador por meio da esteira rolante, é efetuada a correção da umidade da mistura e a homogeneização dos componentes em um misturador industrial por cerca de 2 minutos. Em seguida, o concreto produzido é conduzido a uma prensa hidráulica automática, modelo MAB 2000 da marca PWR, conforme ilustrado na Figura 51, para a fabricação dos blocos, utilizando vibração e pressão para compactação.

Figura 51 – Prensa hidráulica para moldagem dos blocos de concreto



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

Os blocos de concreto moldados então são dispostos em prateleiras e armazenados em área coberta para a realização do processo de cura em condições ambiente. A empresa não realiza o controle de temperatura e umidade neste ambiente. A Figura 52 apresenta o armazenamento dos blocos de concreto em período de cura.

Figura 52 - Armazenamento dos blocos em cura ambiente.

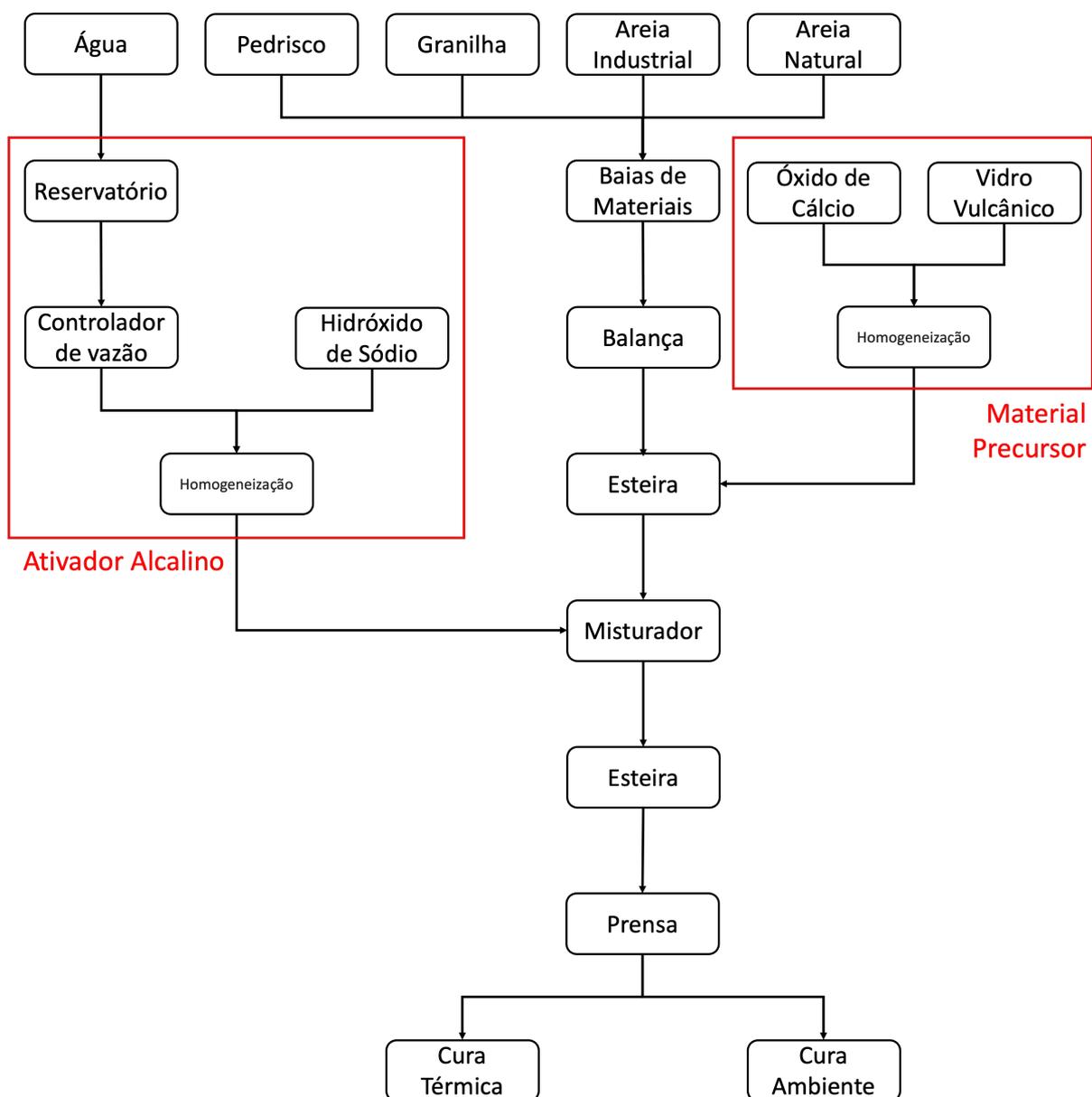


Fonte: elaborado pelo autor (2023)

3.3.3 Fabricação de Blocos de Concreto com Cimento Álcali-ativado

A metodologia adotada para a produção dos blocos de concreto com cimento álcali-ativado foi adaptada do processo produtivo observado na planta fabril da empresa Millato e descrita no item 3.3.2. A Figura 53 apresenta o fluxograma do processo produtivo adaptado para a produção dos blocos de concreto com cimento álcali-ativado.

Figura 53 - Fluxograma do processo produtivo dos blocos de concreto com cimento álcali-ativado.



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

A produção dos blocos de concreto utilizando cimento álcali-ativado teve início com a homogeneização prévia do CaO e o vidro vulcânico, para garantir a correta dispersão uniforme do óxido de cálcio por todo o material precursor. O cimento álcali-ativado foi adicionado à esteira manualmente, juntamente com os agregados liberados pela central dosadora. O ativador alcalino foi preparado previamente e adicionado diretamente ao misturar industrial, que realizou a homogeneização por aproximadamente 2 minutos e direcionou à mistura para a moldagem dos blocos na prensa hidráulica.

O molde, utilizado na prensa hidráulica automática, corresponde à produção de blocos com as dimensões de 140 mm x 190 mm x 390 mm (largura x altura x comprimento). Foram produzidos 51 blocos de concreto com cimento álcali-ativado, que podem ser observados na Figura 54 ao saírem do processo de moldagem.

Figura 54 - Blocos de concreto álcali-ativado



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

As amostras foram divididas em dois grupos e acondicionadas no período de cura em condições distintas, intituladas de cura ambiente e cura térmica. Os blocos submetidos à cura ambiente permaneceram nas mesmas condições a que os blocos de concreto convencional foram expostos, ou seja, sem a realização do controle de temperatura e umidade neste período, conforme apresentado na Figura 52. A cura térmica foi realizada na câmara de secagem utilizada no processo de produção dos

blocos cerâmicos. A Figura 55 indica o início do deslocamento das vagonetas no forno de secagem.

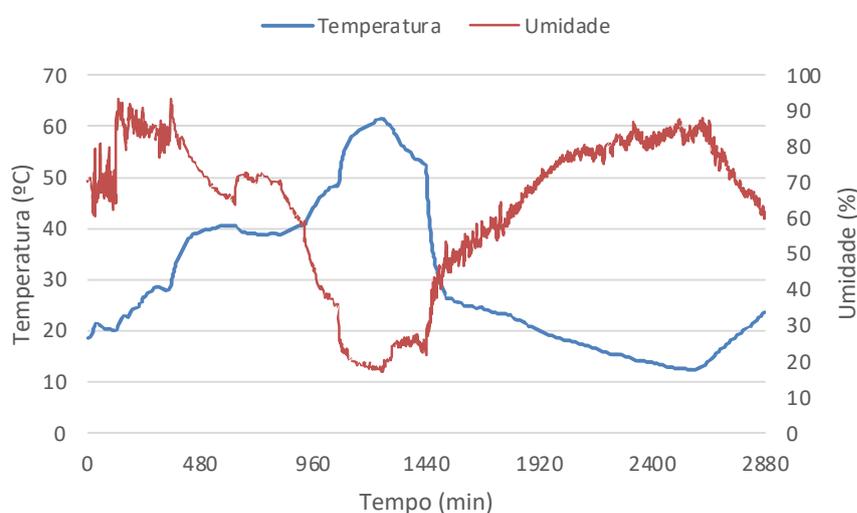
Figura 55 - Blocos de concreto álcali-ativado iniciando o período de cura térmica



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

A temperatura e a umidade relativa do ar foram monitoradas por 48 horas durante o processo de cura térmica na câmara de secagem de blocos cerâmicos, nas condições de operação padrão da câmara. Conforme apresentado na Figura 56, nas primeiras 8h aproximadamente, a umidade se manteve elevada, chegando a cerca de 90%, enquanto a temperatura aumentou de 20 °C a 40 °C. Nas 8h seguintes, a temperatura se manteve a 40 °C e a umidade relativa entre 60% e 70%. Após este período, inicia um novo aumento de temperatura, chegando ao pico de 60 °C, acompanhado de uma rápida redução da umidade, chegando próximo a 20% (mínimo) após 24h. Nas 24h seguintes, a temperatura volta à condição ambiente enquanto a umidade gradativamente retorna para próximo de 90%.

Figura 56 – Monitoramento de temperatura e umidade na câmara de secagem relativa no período de cura térmica na indústria



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS DE CONCRETO

A NBR 6136 (ABNT, 2016) define blocos de concreto como sendo o componente para execução de alvenaria, podendo exercer ou não a função estrutural na edificação, sendo necessariamente vazado em suas superfícies superior e inferior, resultando em uma área líquida igual ou inferior a 75% da área bruta. Além disso, determina os requisitos físicos e mecânicos para a classificação em três grupos, sendo A e B com função estrutural e a C sem função estrutural. A Tabela 14 apresenta os requisitos para os parâmetros de resistência à compressão, absorção e retração dos blocos de concreto.

Tabela 14 - Requisitos físico-mecânicos dos blocos de concreto

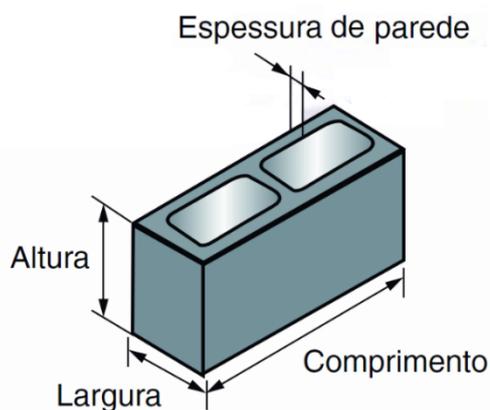
Classificação	Classe	Resistência característica à compressão axial (MPa)	Absorção (%)				Retração (%)
			Agregado Normal		Agregado Leve		
			Individual	Média	Individual	Média	
Com função estrutural	A	$f_{bk} \geq 8,0$	$\leq 9,0$	$\leq 8,0$			
	B	$4,0 \leq f_{bk} < 8,0$	$\leq 10,0$	$\leq 9,0$			
Com ou sem função estrutural	C	$F_{bk} \geq 3,0$	$\leq 11,0$	$\leq 10,0$	$\leq 16,0$	$\leq 13,0$	$\leq 0,065$

Fonte: adaptado de NBR 6136 (ABNT, 2016)

3.4.1 Análise Dimensional

Os blocos foram caracterizados quanto à análise dimensional obedecendo a NBR 12118 (ABNT, 2013). Para cada dimensão do corpo de prova (largura, comprimento e altura, conforme apresentado na Figura 57), foram realizadas três determinações em pontos distintos na face de maior espessura das paredes do bloco, duas determinações de espessura em cada parede longitudinal do bloco e uma determinação em cada parede transversal, expressas em milímetros, conforme recomendações de norma. As dimensões dos furos foram determinadas a partir de duas medições no centro de cada furo do bloco, sendo uma na direção longitudinal e outra na direção transversal.

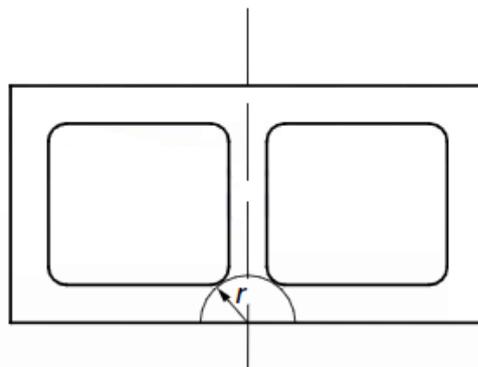
Figura 57 - Análise Dimensional



Fonte: adaptado de NBR 12118 (ABNT, 2013)

Os blocos das classes A e B devem atender ao requisito de dimensão mínima do furo (D_{furo}), sendo ≥ 70 mm para blocos com largura nominal de 140 mm e ≥ 110 mm para blocos com largura nominal de 190 mm. Recomenda-se que os blocos das classes A e B tenham mísulas com raio (r) mínimo de 40 mm, enquanto os blocos Classe C tenham mísulas com raio mínimo de 20 mm. A Figura 58 apresenta a representação do bloco.

Figura 58 - Mísulas Bloco



Fonte: adaptado de NBR 6136 (ABNT, 2016)

3.4.2 Absorção de Água e Área Líquida

O ensaio de absorção de água avalia a relação entre a massa de água presente no bloco saturado em relação à massa do bloco após a secagem em estufa até atingir a constância de massa. Esse ensaio foi realizado 28 dias após a moldagem, seguindo as diretrizes estabelecidas na norma NBR 12118 (ABNT, 2013). Os blocos passaram por um processo de secagem em estufa a uma temperatura de 110 ± 5 °C por 24h e depois por ciclos de 2h até a constância de massa (variação inferior a 0,5% em dois ciclos). Após o processo de secagem, os blocos foram resfriados naturalmente até temperatura ambiente e, então, submersos por 24h para se obter a massa saturada. A massa aparente dos blocos foi determinada quando submersos em água por meio de balança hidrostática. A absorção de água do bloco de concreto foi obtida através da Equação 4, enquanto a área líquida do bloco pela Equação 5.

$$a = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

a é a absorção de água, expressa em porcentagem (%);

m_1 é a massa do corpo de prova seco em estufa, expressa em gramas (g);

m_2 é a massa do corpo de prova saturado, expressa em gramas (g).

$$A_{liq} = \frac{m_2 - m_3}{h \cdot \gamma} \times 1000 \quad (5)$$

Onde:

A_{liq} é a área líquida, expressa em milímetros quadrados (mm^2);

m_2 é a massa do corpo de prova saturado, expressa em gramas (g);

m_3 é a massa aparente do corpo de prova, expressa em gramas (g);

h é a altura média do corpo de prova, expressa em milímetros (mm);

γ é a massa específica da água utilizada no ensaio, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm^3).

3.4.3 Resistência à Compressão

A determinação da resistência à compressão dos blocos segue as normas NBR 12118 (ABNT, 2013), e os requisitos da NBR ISO 7500-1 (ABNT, 2016). Foram realizados ensaios de caracterização mecânica em 3 amostras para cada cenário, nas idades de 8, 28 e 92 dias. Os cenários compreendem aos blocos de concreto de cimento Portland, aos blocos de concreto de cimento álcali-ativado submetidos à cura ambiente e aos blocos de concreto de cimento álcali-ativado submetidos à cura térmica. Além disso, aos 28 dias, foram conduzidos ensaios de caracterização mecânica em 4 amostras de cada cenário, as quais foram submetidas ao ciclo de saturação e secagem descrito no item 3.4.2.

3.4.4 Resistência à Água

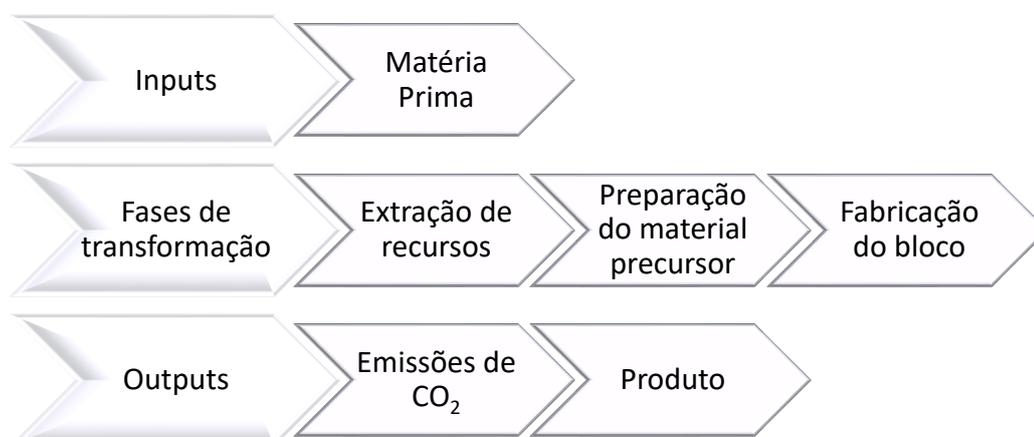
A avaliação do comportamento dos blocos de concreto sob condições de umidade foi conduzida por meio da comparação do desempenho mecânico de amostras submetidas ao ciclo de saturação e secagem, conforme detalhado no item 3.4.2, em relação a amostras mantidas em condições ambientais. Para complementar esse ensaio, realizou-se uma análise visual para verificar a presença de eflorescência na superfície das amostras.

3.5 ANÁLISE DE IMPACTOS AMBIENTAIS

A escolha da metodologia para a análise ambiental dos blocos de concreto álcali-ativado levou em consideração o cenário apresentado por Davidovits (2015), que descreve a dificuldade em obter resultados precisos relacionados aos impactos ambientais desses materiais devido à falta de procedimentos e metodologias padronizadas para a obtenção de indicadores. Essa complexidade é corroborada por Talaat, Emad e Kohail (2023), que apontam que a estimativa precisa dos valores é afetada pela grande quantidade de variáveis envolvidas na avaliação do desempenho ambiental. Portanto, a análise dos impactos ambientais associados a esse material deve ser considerada como uma indicação do desempenho ambiental.

Os impactos ambientais gerados pela produção de blocos de cimento álcali-ativados foram avaliados em comparação com os blocos de cimento Portland através da quantificação das emissões geradas no processo produtivo do produto em estudo. A Figura 59 apresenta o escopo adotado para a obtenção do indicador ambiental do ciclo de produção, sendo dividido em três categorias: *inputs*, fases de transformação e *outputs*. Foram consideradas, para esta análise, as contribuições das diferentes matérias-primas industrializadas adicionadas ao sistema, as fases de transformação para a confecção do cimento álcali-ativado e o processo produtivo do bloco de concreto.

Figura 59 - Fatores considerados na obtenção do indicador ambiental.



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

A pegada ambiental do produto foi estimada com base na soma das contribuições dos constituintes e do processo de produção, considerando os impactos embutidos na matéria-prima até o término do processo produtivo dos blocos de concreto, tendo como unidade funcional (UF) a produção de uma unidade de bloco de concreto. A análise do desempenho ambiental do concreto álcali-ativado foi realizada considerando as emissões de CO₂ e do consumo de energia incorporada por unidade funcional produzida, ou seja, os impactos ambientais atrelados à produção de uma unidade de bloco de concreto. A estimativa da pegada ambiental do ligante e de seu processo produtivo foram obtidos a partir de dados disponibilizados na literatura e através do Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção - Sidac (MME, 2022).

As categorias e itens adotados para obter o indicador do impacto ambiental dos blocos de concreto álcali-ativado foram definidos a partir do item *Bloco de concreto estrutural fbk 6 MPa (14 x 19 x 39) cm* presente no Sidac e descrito no Anexo C, substituindo o quantitativo dos insumos utilizados na fábrica; os dados referenciais adotados neste estudo estão apresentados na Tabela 15. O banco de dados que compõe o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção apresenta os valores mínimos e máximos para a contribuição de dióxido de carbono e consumo energético com intervalo de confiança no nível de 95%, considerando as incertezas do berço ao portão.

Tabela 15 – Contribuição do impacto ambiental dos constituintes na produção dos blocos de concreto com base em dados coletados no Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção e literaturas complementares,

(continua)

Constituinte	Energia incorporada (MJ)		Emissão de Carbono (kg)		Fonte do dado
	Min	Máx	Min	Máx	
Água (L)	0	0	0	0	Sidac
Areia processada (kg)	0	0,1934	0	0,01251	Sidac
Gás Natural (m ³)	41,57	41,57	2,33	2,33	Sidac
Gás liquefeito de petróleo (kg)	46,47	46,47	2,93	2,93	Sidac
Lenha não renovável (st)	5061	5061	566	566	Sidac
Lenha renovável (st)	5061	5061	0	0	Sidac
Óleo diesel (L)	35,21	35,21	2,29	2,29	Sidac

(conclusão)

Constituinte	Energia incorporada (MJ)		Emissão de Carbono (kg)		Fonte do dado
	Min	Máx	Min	Máx	
Eletricidade da rede pública (kwh)	5,22	5,22	0,07	0,07	Sidac
Brita (kg)	0,002051	0,09613	0	0,004669	Sidac
Fíler calcário (kg)	0,01865	0,3546	0,000618	0,007223	Sidac
Cal virgem comum (kg)	5,035	6,409	0,7245	1,115	Sidac
Cimento Portland – CPV (kg)	0,7764	0,9943	3,534	6,278	Sidac
Hidróxido de sódio (kg)		10,8		0,625	Neupane (2022)
Cura térmica (60 °C por 24h)		146*		39,97*	Neupane (2022)

*equivalente a 1m³

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

Apesar de o banco de dados do Sidac não conter informações específicas para alguns dos elementos que compõem a produção do bloco de concreto alcali-ativado, foram utilizados dados de insumos semelhantes disponíveis na plataforma, juntamente com informações adotadas a partir do estudo de Neupane (2022). O impacto relacionado ao óxido de cálcio foi considerado equivalente à cal virgem comum. O processo de obtenção e cominuição do material precursor (vidro vulcânico) foi equivalente ao impacto da obtenção do fíler calcário. A areia natural utilizada considerou as informações referentes à areia processada, e a soma dos agregados graúdos foi considerada como brita. Os quantitativos de cada constituinte adotado no cálculo estão expostos na Tabela 16.

Um dos parâmetros de fonte externa adotado corresponde ao processo de cura térmica, na qual Talaat, Emad e Kohail (2023) afirmam que os fatores de impacto para o período de 24 horas são padronizados na literatura,

Tabela 16 – Quantitativo de insumos utilizados para a produção de uma unidade de bloco de concreto

(continua)

Constituinte	Quantidade	Origem do valor
Cal virgem comum (kg)	0,126	Dosagem
Hidróxido de sódio (kg)	0,196	Dosagem
Agregado graúdo (kg)	2,157	Dosagem
Agregado miúdo (kg)	8,039	Dosagem
Fíler calcário (kg)	0,816	Dosagem

Constituinte	Quantidade	(conclusão)
		Origem do valor
Água (L)	0,425	Dosagem
Cura térmica (60 °C por 24h)	0,00568056	Dosagem
Óleo diesel (L)	0,005	Sidac
Gás liquefeito de petróleo (kg)	0,0037	Sidac
Eletricidade da rede pública (kwh)	0,055	Sidac
Gás Natural (m ³)	0,00058	Sidac
Lenha não renovável (st)	0,000002	Sidac
Lenha renovável (st)	0,000002	Sidac
Cimento - CP V (kg)	0,882	Sidac

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

Adicionalmente, no que diz respeito à influência do processo de cura térmica, a temperatura de cura não foi considerada. De acordo com Talaat, Emad e Kohail (2023), a literatura não distingue a contribuição do processo de cura com base na temperatura, devido à carência de informações detalhadas sobre a potência da fonte e os tipos de combustíveis utilizados.

No cálculo do impacto ambiental, foi considerado o transporte dos agregados, do material precursor e do cimento Portland em carretas de cinco eixos. A distância considerada foi do ponto de extração/produção até a unidade fabril em São Pedro da Serra e o retorno ao ponto de origem. Os agregados e o material precursor foram extraídos de uma pedreira em Caxias do Sul, RS, o que representou um deslocamento de 140 km. O cimento Portland foi obtido da unidade de Canoas, RS, da Votorantim Cimentos, o que representou 152 km da unidade fabril.

O efeito local, que está relacionado ao transporte do hidróxido de sódio e do óxido de cálcio, foi excluído deste estudo devido à ausência de uma cadeia de suprimentos estruturada em comparação com a indústria consolidada de produção de cimento Portland. Essa decisão foi tomada com base nas considerações de Davidovits (2015) sobre a possível distorção nos resultados. Além disso, os processos idênticos no ciclo de produção, como a etapa de mistura e operação das esteiras de transporte de materiais, também foram excluídos desta análise. É importante observar que o banco de dados do Sidac não considera as contribuições de energia incorporada e as emissões de CO₂ relacionadas ao uso da água da rede

pública. Portanto, esse componente não foi incluído no cálculo do indicador ambiental da produção de blocos de concreto.

3.6 ANÁLISE DE CUSTOS

A avaliação do custo de produção dos blocos de concreto utilizando cimento Portland (referência) e cimento álcali-ativado, em escala industrial, foi realizada através da coleta de dados primários relacionados aos aspectos de insumos, mão de obra, energia, impostos e demais custos, conforme listado na Tabela 17.

Tabela 17 – Composição de custos para a produção de uma unidade de bloco de concreto.

Bloco Convencional	Bloco Álcali-ativado
Areia	Areia
Agregados	Agregados
Cimento Portland	-
-	Precursor
-	Hidróxido de sódio
-	Óxido de cálcio
-	Cura térmica
Mão de obra	Mão de obra
Impostos	Impostos
Energia	Energia
Outros	Outros

Fonte: elaborado pelo autor

A composição detalhada do custo de produção em escala industrial é apresentada em valores unitários em relação aos blocos de referência, a fim de evitar a desatualização dos valores monetários e preservar o sigilo de informações estratégicas da empresa que disponibilizou a infraestrutura e as informações de custo para a realização desta análise.

4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos na caracterização das propriedades físicas e mecânicas dos blocos de concreto álcali-ativado, assim como o desempenho ambiental e a análise de custos em relação ao concreto convencional.

4.1 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS

As propriedades físicas e mecânicas dos blocos de concreto foram avaliadas sobre o aspecto dimensional das amostras, absorção de água, resistência à compressão e estabilidade em água, realizando a sua classificação conforme requisitos especificados em norma.

4.1.1 Análise Dimensional

Os blocos de concreto produzidos neste estudo pertencem à família 15x40, contando com as dimensões de 140 mm de largura, 190 mm de altura, sendo moldados como blocos inteiros com 390 mm de comprimento. As dimensões estão expostas na Tabela 18.

Tabela 18 – Análise dimensional dos blocos de concreto

	Largura [mm]	Comprimento [mm]	Altura [mm]	Parede Long. [mm]	Esp. Equivalente [mm/m]	Área Bruta [mm ²]
Referência	140,3	390,3	194,0	25,9	196,0	54776,8
	141,0	390,3	187,3	25,4	197,0	55037,0
	141,0	390,0	194,0	25,7	199,7	54990,0
	140,3	390,3	192,0	26,1	199,6	54776,8
Cura Ambiente	140,0	392,0	191,8	26,3	195,7	54880,0
	141,0	390,0	195,8	25,7	201,8	54990,0
	140,0	390,7	194,0	26,3	197,0	54693,3
	140,2	390,7	197,3	25,9	197,3	54758,4
Cura Térmica	139,7	391,0	194,2	25,9	195,6	54609,7
	140,0	391,7	194,3	26,2	196,3	54833,3
	140,7	391,3	192,3	25,7	198,4	55047,6
	141,0	390,8	192,0	26,2	197,2	55107,5

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

As designações por classe da NBR 6136 (ABNT, 2016) referente às dimensões dos blocos estão descritas na Tabela 19. Os blocos de concreto produzidos atendem as Classes A, B e C, no critério dimensional. A única amostra que apresentou largura inferior a 140 mm foi referente ao traço submetido à cura térmica, contudo, a sua variação estava dentro da tolerância de 1 mm.

Tabela 19 – Designação por classe, largura dos blocos e espessura mínima das paredes dos blocos.

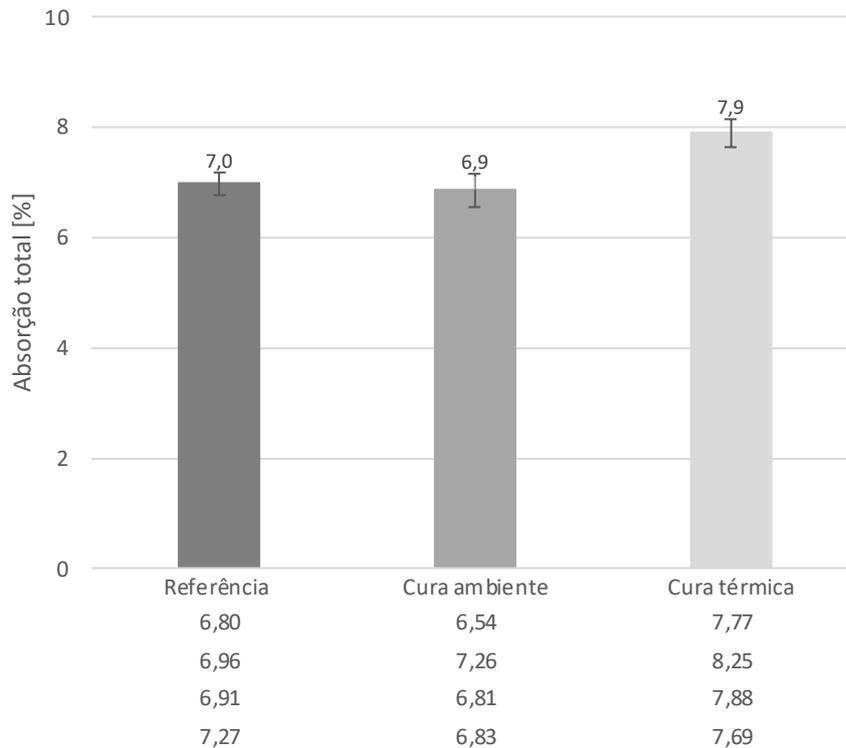
Classe	Largura [mm]	Paredes longitudinais [mm]	Paredes transversais [mm]	Espessura equivalente [mm]
A	190	32	25	188
	140	25	25	188
B	190	32	25	188
	140	25	25	188
C	190	18	18	135
	140	18	18	135
	115	18	18	135
	90	18	18	135
	65	15	15	113

Fonte: adaptado de NBR 6136 (2016)

4.1.2 Absorção de Água e Área Líquida

A Figura 60 exibe os valores médios e individuais de absorção de água dos blocos de concreto. A análise de variância (ANOVA) dos resultados (conforme apresentado no Anexo A) revela que as amostras de concreto álcali-ativado submetidas à cura ambiente exibiram um desempenho estatisticamente semelhante aos blocos produzidos com cimento Portland. Por outro lado, as amostras submetidas ao processo de cura térmica demonstraram um desempenho estatisticamente diferente em relação a ambas as composições.

Figura 60 – Absorção de água das composições de blocos de concreto aos 28 dias



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

A variação no processo de cura a que as amostras de concreto álcali-ativados foram submetidas resultou em uma diferença significativa no desempenho das amostras quanto à absorção de água. Em relação aos blocos álcali-ativados curados termicamente, apresentaram absorção total média equivalente a 7,9%, enquanto as amostras submetidas à cura ambiente apresentaram absorção total média de 6,9%, comportamento similar aos blocos de concreto com cimento Portland, com desempenho equivalente a 7%.

Ao analisar os valores obtidos para área líquida, conforme NBR 12118 (ABNT, 2013) e convertidos para volume, foi possível obter a densidade do concreto na produção dos blocos de concreto, conforme indicados na Tabela 20. A densidade média dos blocos de concreto álcali-ativado curados em temperatura ambiente foi de 2040,6 kg/m³, enquanto os blocos submetidos à cura térmica apresentaram densidade média equivalente a 1983,9 kg/m³.

Tabela 20 – Área líquida dos blocos de concreto aos 28 dias

Composição	Área líquida (mm ²)	Volume líquido (mm ³)	Massa seca (g)	Densidade (kg/m ³)
Referência	29614,3	5680555,5	11878,9	2091,1
Cura Ambiente	29001,6	5647676,8	11524,8	2040,6
Cura Térmica	29090,4	5620530,3	11150,8	1983,9

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

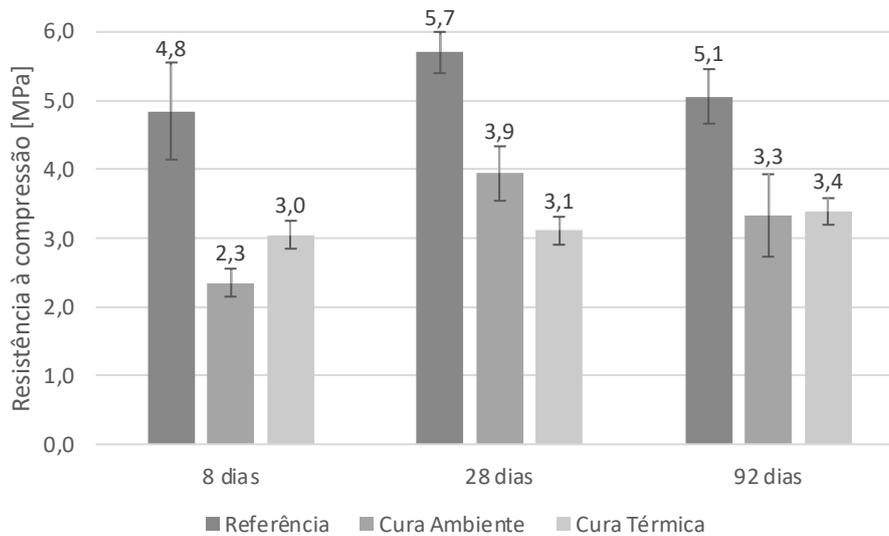
A variação na densidade dos blocos álcali-ativados é estatisticamente significativa, indicando uma possível alteração na porosidade e microestrutura do material formado decorrente do processo de cura térmica, corroborando com os resultados obtidos no ensaio de absorção de água. A maior densidade e menor absorção de água das amostras curadas em temperatura ambiente é um indicativo de que o material apresenta maior grau de polimerização da matriz cimentícia e menor teor de poros internos.

Segundo Huseien et al. (2016) e Bilim et al. (2013), a cura térmica pode resultar na ocorrência de trincas por retração e na perda excessiva de água na mistura devido ao processo de secagem, além do aumento no teor de porosidade na matriz cimentícia. Os resultados obtidos estão em acordo com as observações de Criado, Fernández-Jiménez e Palomo (2010), Muñoz-Villarreal et al. (2011) e Provis et al. (2012), sobre a influência das condições de cura na formação de poros e nas propriedades da microestrutura dos materiais no estado endurecido.

4.1.3 Resistência à Compressão

Os blocos fabricados com cimento Portland demonstraram maior resistência em comparação com os blocos produzidos com cimento álcali-ativado, em ambas as condições de cura e em todas as idades. É importante observar que essa diferença nos resultados é estatisticamente significativa, conforme evidenciado pela análise de variância realizada (Anexo A). Os valores relativos ao comportamento mecânico ao longo do tempo estão representados na Figura 61.

Figura 61 – Comportamento mecânico dos blocos de concreto produzidos no estudo.



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

A NBR 6136 (ABNT, 2016) define critérios para classificar os blocos de concreto em três categorias com base em sua resistência à compressão aos 28 dias. A Classe A é atribuída aos blocos com função estrutural e resistência superior a 8 MPa. A Classe B também se destina a blocos estruturais, mas com resistência entre 4 MPa e 8 MPa. Enquanto a Classe C engloba blocos que podem ou não ter função estrutural, com resistência mínima de 3 MPa.

O bloco de concreto de referência, fabricado com cimento Portland, alcançou uma resistência média de 5,7 MPa aos 28 dias, classificando-o como pertencente à Classe B. Já os blocos de concreto álcali-ativado podem ser categorizados como Classe C, com resistências de 3,9 MPa e 3,1 MPa, para as amostras submetidas à cura ambiente e cura térmica, respectivamente.

A menor resistência observada aos 28 dias nos blocos álcali-ativados submetidos à cura térmica está de acordo com os resultados de absorção total e densidade apresentados anteriormente (item 4.1.2). Estes blocos submetidos à cura térmica apresentaram maior absorção total (conforme ilustrado na Figura 60) e menor densidade (conforme indicado na Tabela 20). Como mencionado anteriormente, embora o aumento de temperatura normalmente acelere as reações de ativação, como evidenciado na comparação entre a cura térmica (3 MPa) e a cura ambiente (2,3 MPa) após 24 horas, a cura térmica pode ter efeitos adversos, como a ocorrência de fissuras devido à retração e uma perda excessiva de água na mistura devido ao processo de secagem. Além disso, a

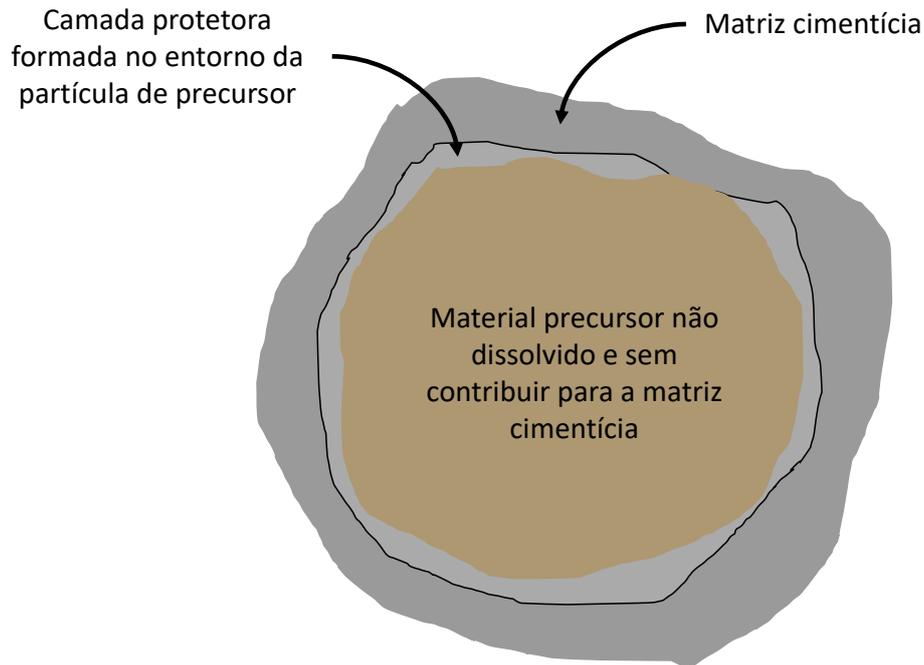
cura térmica pode resultar em um aumento no teor de porosidade na matriz cimentícia, como destacado em estudos anteriores (HUSEIEN et al., 2016; BILIM et al., 2013).

Os resultados obtidos estão em consonância com as observações de diversos pesquisadores, como Criado, Fernández-Jiménez e Palomo (2010), Muñiz-Villarreal et al. (2011) e Provis et al. (2012), que também destacaram a influência das condições de cura na formação de poros e nas propriedades da microestrutura dos materiais no estado endurecido.

Além disso, é possível notar que o comportamento mecânico ao longo do tempo se mostrou estável com o concreto álcali-ativado submetido à cura térmica. Houve um aumento de apenas 0,4 MPa na resistência aos 92 dias em comparação com os 8 dias, o que representa um aumento de aproximadamente 13%. No entanto, esse aumento não foi estatisticamente significativo.

A estagnação no desenvolvimento de resistência ao longo do tempo dessa composição pode ser explicada pelo processo acelerado das reações de dissolução e polimerização que ocorrem devido ao aumento da temperatura durante o período de cura térmica. Esse processo resulta na formação de uma camada do produto da reação de polimerização ao redor das partículas precursoras, o que paralisa o processo de dissolução e o ganho de resistência, conforme descrito por Bakharev, Sanjayan e Cheng (1999) e ilustrado na Figura 62. O mecanismo acelerado de dissolução das partículas nos estágios iniciais, além de levar à estagnação do ganho de resistência, pode resultar na presença de hidróxido de sódio não reagido na matriz cimentícia, o que pode causar eflorescência e perda de resistência com o tempo (PANIAS; GIANNOPOULOU; PERRAKI, 2007; TAKEDA et al., 2014; TCHAKOUTÉ et al., 2015).

Figura 62 – Descrição da estagnação do processo de dissolução do material precursor



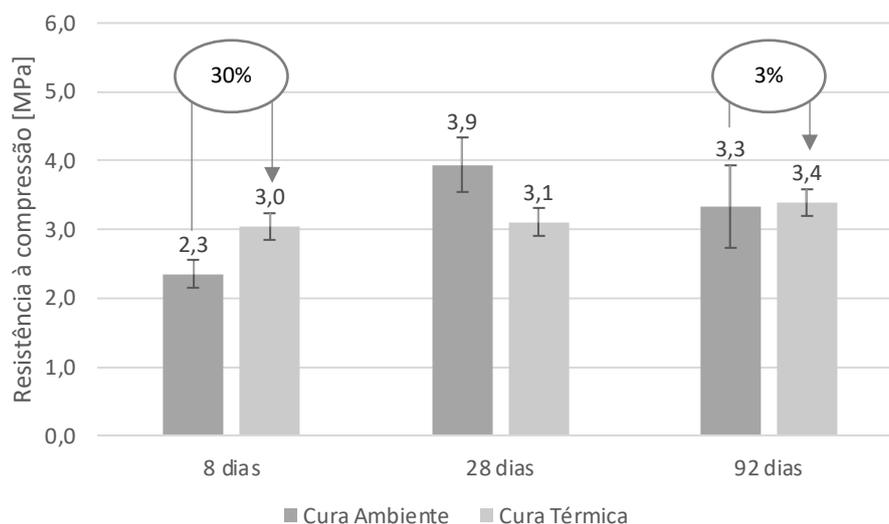
Fonte: elaborado pelo autor (2023)

Os blocos de concreto submetidos à cura ambiente mostraram um aumento na resistência nas idades iniciais, seguido de uma posterior queda, com a resistência média diminuindo de 3,9 MPa aos 28 dias para 3,3 MPa aos 92 dias. Embora a análise de variância (Anexo A) não tenha indicado um efeito estatisticamente significativo da idade sobre a resistência à compressão dos blocos, é importante observar que um comportamento de queda na resistência ao longo do tempo foi também observado em amostras de cimento álcali-ativado por Vargas et al. (2014) e Staudt (2019). Portanto, é necessário estender o período de monitoramento dos blocos de concreto álcali-ativado para validar a resistência à compressão ao longo do tempo. É importante mencionar que, embora não tenha sido significativo, um comportamento semelhante de variação de resistência foi observado nos blocos de concreto com cimento Portland, devido à variabilidade do ensaio.

O efeito dos processos de cura, tanto ambiente quanto térmica, no desenvolvimento da resistência pode ser observado na Figura 63. Ao analisar o desempenho das amostras aos 8 dias de idade, observou-se um aumento de 30% na resistência à compressão ao submeter as amostras ao processo de cura térmica em comparação com as amostras submetidas à cura ambiente. Essa variação na resistência é estatisticamente significativa. Como mencionado anteriormente, o aumento de

temperatura durante o período de cura acelera as reações nas idades iniciais, o que pode justificar essa diferença em relação aos blocos curados em temperatura ambiente.

Figura 63 – Comparação do efeito do processo de cura no comportamento mecânico dos blocos de concreto



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

Aos 28 dias a diferença no desempenho mecânico entre as amostras é significativamente diferente, com as amostras curadas em condições ambientais apresentando maior resistência, invertendo o cenário observado na idade inicial. As amostras submetidas à cura ambiente apresentaram um ganho de resistência de quase 70% no período de 20 dias entre 8 dias e 28 dias da moldagem, enquanto os blocos produzidos com cura térmica se mantiveram estáveis, como discutido anteriormente.

Aos 92 dias as amostras ativadas por álcalis não apresentam diferença significativa no comportamento mecânico, indicando apenas uma variação de 3%. A redução na média da resistência dos blocos de concreto curados em condições ambientais e a estabilização na média de resistência dos blocos de concreto submetidos à cura térmica equalizou a característica mecânica das amostras.

É importante observar que a resistência à compressão dos blocos de concreto (f_b) é determinada com base na área bruta (ou seja, largura x comprimento, incluindo a área dos furos verticais, como ilustrado na Figura 57 no item 3.4.1). Isso difere da resistência à compressão do concreto utilizado em sua produção (f_c), uma vez que é necessário considerar a força aplicada em relação à área líquida do bloco para determinar a tensão real suportada pelo material em si, como foi feito no estudo piloto (item 3.1).

Ao considerar as áreas líquidas (conforme apresentado na Tabela 20) para determinar a resistência do concreto álcali-ativado com cura ambiente e cura térmica, foram obtidas médias de 8,7 MPa e 5,4 MPa, respectivamente. Como era esperado, observa-se que o valor de resistência obtido para a cura ambiente (8,7 MPa) é semelhante ao valor potencial obtido em laboratório no estudo piloto (7,6 MPa), que foi realizado sem cura térmica e com o mesmo teor de CaO. O aumento de resistência para os blocos moldados na indústria é atribuído ao processo de compactação mecânica com vibro-prensa (item 3.3.2), que é mais eficaz do que o processo de compactação manual utilizado em laboratório. No entanto, é importante notar que pode haver interferência devido à forma das amostras, uma vez que os blocos são diferentes dos corpos de prova cilíndricos usados nos testes laboratoriais.

Algumas dificuldades na metodologia de produção foram identificadas ao alterar a escala de produção de pasta de cimento para concreto, e essas dificuldades podem ter contribuído para a redução da resistência à compressão do material. Um dos principais desafios esteve relacionado com a preparação e adição do ativador alcalino no sistema, garantindo sua homogeneização adequada com o material precursor.

A quantidade de água proveniente da umidade dos agregados utilizados foi reduzida no volume disponível durante a preparação do ativador alcalino. No entanto, essa correção resultou em um aumento na concentração de hidróxido de sódio. Esse aumento na concentração de hidróxido de sódio pode ter dificultado sua completa dissolução na solução e no aumento das reações exotérmicas. Além disso, a redução do volume do ativador alcalino pode ter gerado dificuldades na sua homogeneização eficaz com o material precursor.

É fundamental revisar os procedimentos de produção e mistura do ativador alcalino em escala industrial para garantir uma homogeneização adequada com o material precursor. Isso pode aumentar a taxa de dissolução das partículas e contribuir para a formação de uma microestrutura mais favorável, o que, por sua vez, pode melhorar os indicadores de desempenho mecânico.

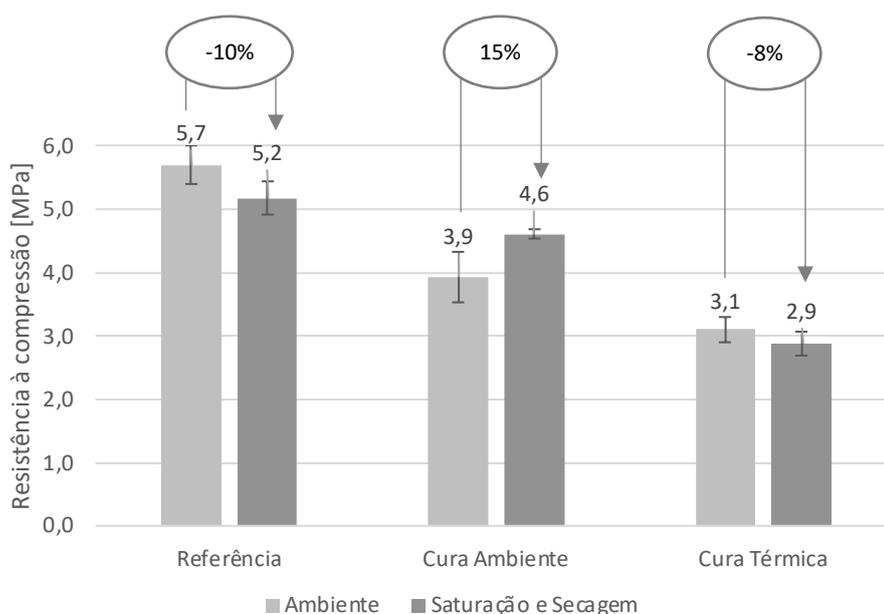
4.1.4 Resistência à água

O principal foco deste estudo com relação à durabilidade dos blocos de concreto álcali-ativado foi validar a prevenção das reações expansivas observada em estudos anteriores e o comportamento mecânico do material quando submetido ao contato com

água. Este direcionamento na pesquisa teve como base o fenômeno observado por Staudt (2019), onde 90% das combinações sofreram algum nível de deformação e/ou fissuração nos corpos de prova quando imersas em água, ocorrendo em alguns casos à desintegração total das amostras (ver item 2.1.4, Figura 29 a Figura 32).

Durante o procedimento de caracterização de absorção de água do material, os blocos foram submetidos a um ciclo de saturação seguido de secagem em estufa até atingirem a constância de massa. Isso permitiu avaliar como esse processo afetou o comportamento mecânico do material. A Figura 64 mostra a resistência à compressão dos blocos de concreto aos 28 dias que foram submetidos ao ensaio de absorção de água em comparação aos blocos mantidos em condições ambientais.

Figura 64 – Análise das resistências em amostras submetidas ao ciclo de saturação e secagem em comparação aos blocos submetidos a cura ambiente



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

Como era de se esperar, devido à correção da composição química do material precursor e à estabilização da expansão por meio da adição de CaO, os blocos de concreto álcali-ativados mantiveram um comportamento mecânico consistente e uma estabilidade dimensional adequada após serem submersos em água. Isso pode ter ocorrido devido à possível formação de C-A-S-H na matriz cimentícia.

Os blocos que passaram pelo processo de cura térmica apresentaram uma queda de 8% na resistência média de suas amostras, embora estatisticamente os valores tenham sido considerados iguais. Por outro lado, os blocos submetidos à cura ambiente

demonstraram um aumento significativo de 15% em sua resistência mecânica. É importante observar que esse aumento de resistência após o processo de saturação e secagem levaria os blocos a serem reclassificados de Classe C para Classe B, de acordo com a NBR 6136 (ABNT, 2016), o mesmo nível de desempenho dos blocos produzidos com cimento Portland.

Os resultados supracitados indicam que a correção na composição química do material precursor com a adição de óxido de cálcio garantiu a formação de géis e estruturas estáveis, evitando o desencadeamento da quebra das ligações de sílica. Este comportamento ocorreu conforme previsto por Redden e Neithalath (2014) e Koppe (2021), onde a suplementação de Ca no sistema formou uma estrutura mista entre C-A-S-H e N-A-S-H, gerando o incremento de ligações cruzadas e substituindo o Si^{4+} na estrutura por Ca^{2+} , possibilitando imobilizar o íon alcalino no equilíbrio de carga e limitando a sua dissolução.

Embora as amostras tenham mostrado resultado positivo quanto ao comportamento mecânico e estabilidade dimensional, ocorreu ainda à formação eflorescência em ambas as composições álcali-ativadas. A Figura 65 apresenta os blocos de concreto álcali-ativados 8 dias após a concretagem.

Figura 65 – Formação de eflorescência na superfície de blocos de concreto álcali-ativados com 8 dias: (a) Cura ambiente; (b) Cura térmica.



(a)

(b)

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

Segundo Longhi n (2020) o efeito da formação de eflorescência na superfície dos materiais álcali-ativados em relação a durabilidade e as propriedades mecânicas não é completamente conhecido na literatura. Contudo, este fenômeno ocorre em decorrência

do desequilíbrio estequiométrico entre o precursor e o ativador alcalino, resultando na presença de íons alcalinos (Na^+ ou K^+) em excesso no interior da matriz cimentícia com capacidade de mobilidade e com potencial de cristalizar. Embora o processo de cura térmica tenda a aumentar o grau de polimerização e, por consequência, reduzir a presença de álcalis livres, o impacto não foi efetivo para evitar a migração e carbonatação do sódio.

Os resultados obtidos em relação à resistência à água do material representam uma contribuição significativa para o avanço do conhecimento na produção industrial de blocos de concreto com cimento álcali-ativado. Esses resultados enfatizam o potencial desse material, pois demonstram um comportamento mecânico consistente e estabilidade dimensional quando exposto à água. Contudo, ainda há espaço para aprimorar a composição do ativador alcalino, uma vez que foram identificados problemas de eflorescência na superfície do material.

4.1.5 Classificação de acordo com NBR 6136:2016

A consolidação dos resultados obtidos na caracterização dos blocos resultou na classificação dos cenários de acordo com os requisitos estabelecidos na NBR 6136 (ABNT, 2016), revelando um desempenho satisfatório na análise dimensional, atendendo aos requisitos estabelecidos para a Classe A, conforme detalhado na seção de análise dimensional no item 4.1.1. No entanto, o desempenho mecânico aos 28 dias desempenhou um papel crucial na diferenciação das classes dos blocos de concreto, uma vez que o percentual de absorção de água das amostras também atenderia aos requisitos da Classe A da norma em todos os cenários avaliados neste estudo.

Com base no traço adotado neste estudo (conforme descrito no item 3.3.1), as amostras de concreto produzidas com cimento Portland alcançaram um desempenho equivalente à Classe B, que se refere a blocos com função estrutural e resistência à compressão na faixa de 4,0 MPa a 8,0 MPa, como apresentado na Tabela 21. No entanto, apesar do desempenho satisfatório em relação à absorção de água, que atenderia ao requisito da Classe A, o desempenho mecânico foi incompatível com essa classificação, resultando na redução da classe designada.

Tabela 21 – Avaliação ao atendimento dos requisitos para resistência à compressão e absorção da composição referência com cimento Portland aos 28 dias.

Classificação	Classe	Resistência característica à compressão axial (MPa)	Absorção (%)	
			Individual	Média
Com função estrutural	A	$F_{bk} \geq 8,0$	$\leq 9,0$	$\leq 8,0$
	B	$4,0 \leq f_{bk} < 8,0$	$\leq 10,0$	$\leq 9,0$
Com ou sem função estrutural	C	$F_{bk} \geq 3,0$	$\leq 11,0$	$\leq 10,0$

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

As amostras de concreto produzidas com cimento álcali-ativado apresentaram desempenho mecânico inferior aos blocos produzidos com cimento Portland (CP V - ARI), sendo enquadrados na Classe C da NBR 6136 (ABNT, 2016), conforme apresentado na Tabela 22. O processo de cura térmica não teve impacto na classificação, no entanto, as amostras submetidas à cura ambiente apresentaram uma menor taxa de absorção de água em comparação com as amostras submetidas à cura térmica.

Tabela 22 – Avaliação ao atendimento dos requisitos para resistência à compressão e absorção da composição com concreto álcali-ativado aos 28 dias.

Classificação	Classe	Resistência característica à compressão axial (MPa)	Absorção (%)	
			Individual	Média
Com função estrutural	A	$F_{bk} \geq 8,0$	$\leq 9,0$	$\leq 8,0$
	B	$4,0 \leq f_{bk} < 8,0$	$\leq 10,0$	$\leq 9,0$
Com ou sem função estrutural	C	$F_{bk} \geq 3,0$	$\leq 11,0$	$\leq 10,0$

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

As amostras dos blocos de concreto álcali-ativado, mantidos em cura ambiente, apresentaram um aumento na resistência à compressão aos 28 dias quando submetidas ao ciclo de saturação e secagem. Se a avaliação dos requisitos da norma fosse realizada com base nessas amostras, o material atenderia aos requisitos estabelecidos para a

Classe B, o que equivaleria ao desempenho dos blocos de referência produzidos com cimento Portland. No entanto, este comportamento de variação na resistência não foi observado nas amostras submetidas à cura térmica, que permaneceriam na Classe C.

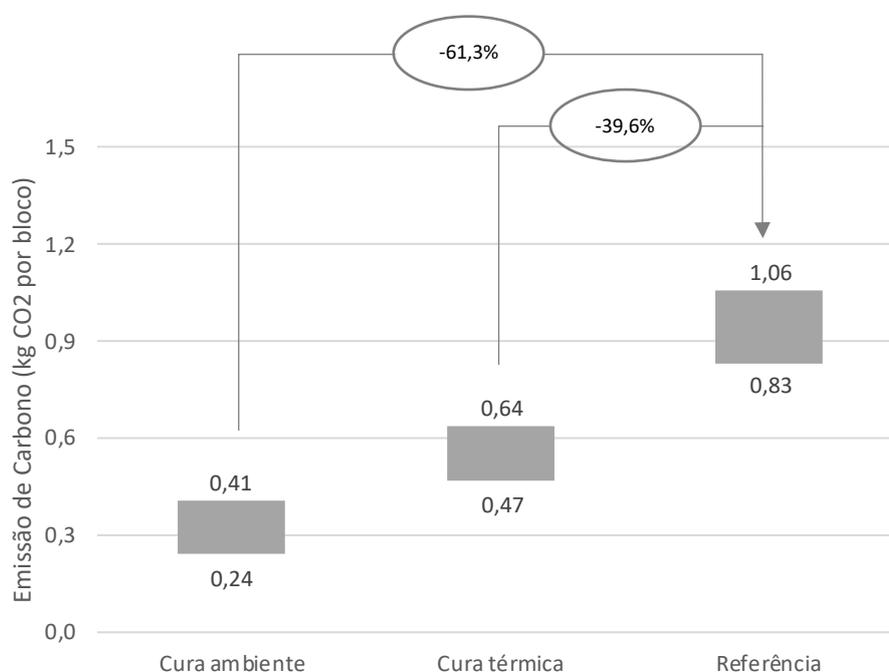
4.2 DESEMPENHO AMBIENTAL

Neste item, são apresentados os resultados do desempenho ambiental dos blocos de concreto, avaliados quanto às emissões de dióxido de carbono e à energia incorporada.

4.2.1 Emissões de Dióxido de Carbono

O indicador de emissão de carbono foi definido para o equivalente a produção de uma unidade de bloco de concreto. As estimativas da pegada de carbono atribuídas a cada uma das composições em estudo estão expostas na Figura 66, possibilitando a análise comparativa de desempenho ambiental entre as amostras.

Figura 66 – Estimativa de emissão de carbono por unidade de bloco de concreto produzido.



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

O cenário observado indica um potencial de redução nas emissões de dióxido de carbono (CO₂) de 40% a 61%, considerando os blocos de concreto álcali-ativado submetidos à cura térmica e à cura ambiente, respectivamente, em relação aos blocos de concreto produzidos com cimento Portland. Isso ocorre mesmo considerando os impactos associados à correção da composição química do vidro vulcânico e ao uso de hidróxido de sódio como ativador alcalino.

Esses resultados evidenciam o menor impacto ambiental na produção do cimento álcali-ativado em comparação com o cimento Portland. No entanto, é importante observar que o potencial de redução nas emissões de CO₂ não atingiu o mesmo nível identificado em alguns estudos anteriores, como o estudo de Neupane (2022). Apesar disso, os resultados ainda superam as expectativas observadas em outros estudos, como o de Kanagaraj et al. (2023), que estimou uma redução de apenas 15% nas emissões ao comparar as emissões de concreto com resistência de 40 MPa.

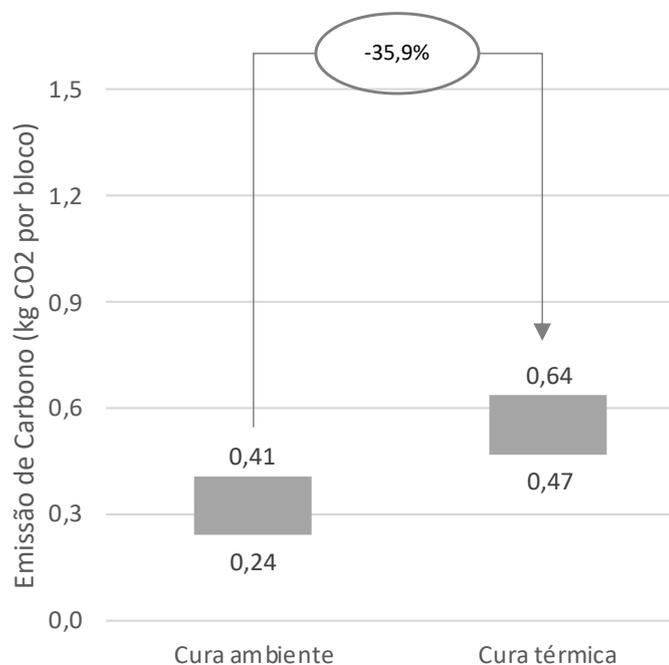
A principal diferença nas emissões de CO₂ pode ser atribuída ao processo de produção do clínquer, que é uma parte fundamental na fabricação do cimento Portland e envolve a reação de descarbonatação e a etapa de sinterização. Por outro lado, o processo de produção do cimento álcali-ativado não inclui a produção de clínquer e não requer a sinterização. Em vez disso, envolve a cominuição da rocha em estado natural e a correção de sua composição com a adição de óxido de cálcio.

Quando extrapolamos esses números para um lote de 1000 unidades de blocos de concreto, estimamos que os blocos de concreto álcali-ativado submetidos à cura ambiente emitiriam de 243 kg a 408 kg de CO₂, enquanto os blocos de concreto álcali-ativado submetidos à cura térmica emitiriam de 470 kg a 636 kg de CO₂. Em comparação, os blocos de concreto com cimento Portland representariam emissões equivalentes a 830 kg a 1058 kg de CO₂. Esses números indicam claramente a vantagem em termos de emissões de CO₂ dos blocos de concreto álcali-ativado em relação aos produzidos com cimento Portland.

Considerando os dados de massa e densidade dos blocos apresentados anteriormente (Tabela 20, item 4.1.2), as emissões de CO₂ por metro cúbico são estimadas em 146 kg a 186 kg CO₂/m³ para os blocos de concreto de cimento Portland. Por outro lado, os blocos de cimento álcali-ativado curados em temperatura ambiente emitem apenas 43 kg a 72 kg CO₂/m³, enquanto os blocos com cura térmica têm emissões entre 84 kg e 113 kg CO₂/m³. A possibilidade de evitar o processo de cura térmica na produção dos blocos de concreto álcali-ativado pode representar uma redução

de 36% nas emissões de CO₂ do produto. A Figura 67 ilustra essa variação no desempenho ambiental do material com a alteração nas condições de cura.

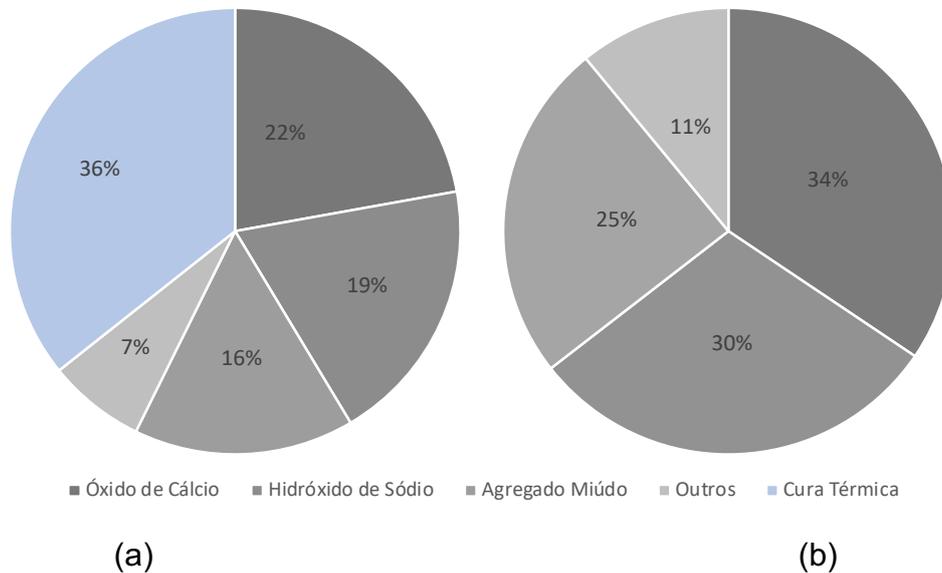
Figura 67 – Impacto dos parâmetros do processo de cura nas emissões de carbono de blocos de concreto álcali-ativados.



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

A Figura 68 apresenta as contribuições individuais dos constituintes dos blocos, caracterizando a composição de origem das emissões de carbono. O processo de cura acaba representando 36% das emissões dos blocos submetidos à cura térmica, seguido pelas emissões relacionadas ao óxido de cálcio, hidróxido de sódio e agregado miúdo, correspondendo a 22%, 19% e 16%, respectivamente. Nos blocos submetidos à cura ambiente, o principal agressor ao meio ambiente é o óxido de cálcio, com 34% das emissões de carbono do bloco, seguido por hidróxido de sódio e agregado miúdo, correspondendo a 30% e 25%, respectivamente. Sendo assim, a correção da composição química do material precursor, somado às contribuições do ativador alcalino, são os principais responsáveis pela emissão de CO₂ nos blocos de concreto álcali-ativados, acrescido das emissões do processo de cura térmica, representa 77% das emissões totais do material.

Figura 68 – Composição de origem na emissão de carbono para a produção de blocos de concreto álcali-ativado: (a) Cura Térmica; (b) Cura Ambiente.



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

Esse cenário está alinhado com os resultados obtidos por Kanagaraj et al. (2023), que identificou o meio alcalino como o principal contribuinte para o aumento dos custos, das emissões de carbono e do consumo energético dos concretos álcali-ativados. De acordo com as observações de Turner e Collins (2013) e Neupane (2022), os agregados miúdos e graúdos geralmente apresentam uma contribuição relativamente baixa nas emissões de CO₂ dos materiais ativados por álcalis, especialmente quando comparados com as emissões provenientes dos ativadores alcalinos e do cimento Portland. No entanto, neste estudo, as contribuições dos agregados representam uma parcela significativa das emissões de carbono do material, correspondendo a 17% e 27%, nos blocos submetidos a cura térmica e nos blocos submetidos a cura ambiente, respectivamente. Isso se deve, em grande parte, à utilização de teores elevados de agregados na fabricação de blocos de concreto em comparação com os teores normalmente empregados em concretos convencionais. Conforme descrito no item 3.3.1, na produção de blocos na indústria, é adotada uma relação volumétrica de aproximadamente 1:11 em massa, ou seja, 11 partes de agregados para cada parte de cimento.

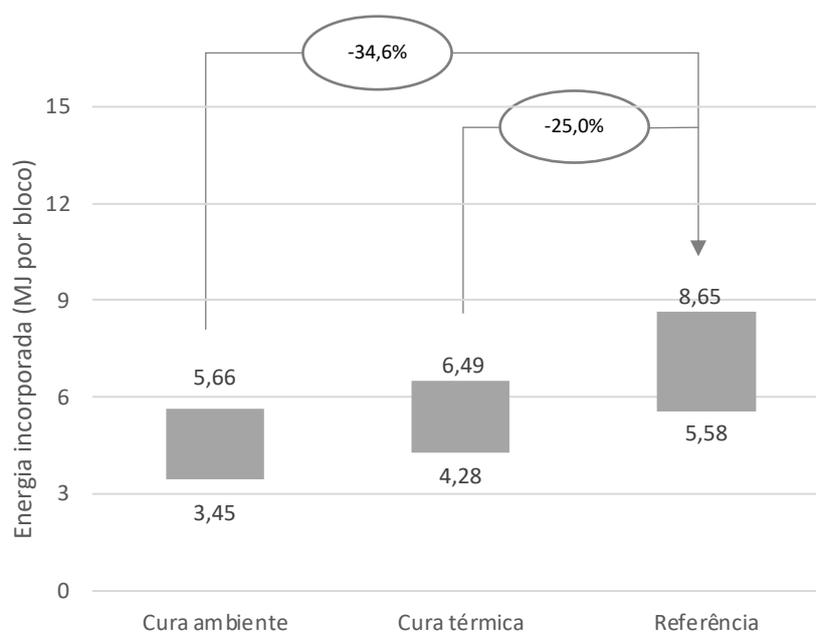
Os resultados alcançados com os blocos de concreto álcali-ativados foram positivos em comparação com os produtos à base de cimento Portland. No entanto, há ainda um considerável potencial de melhoria no desempenho ambiental ao otimizar a

dosagem do ativador alcalino, que contribuiu para a formação de eflorescências nos blocos de concreto. Além disso, a substituição do óxido de cálcio na correção da composição química do vidro vulcânico por uma fonte alternativa de cálcio pode ser uma área de pesquisa promissora para reduzir ainda mais o impacto ambiental do processo.

4.2.2 Energia Incorporada

O indicador de energia incorporada foi definido para o equivalente a produção de uma unidade de bloco de concreto. As estimativas do consumo energético atribuídas a cada uma das composições em estudo estão expostas na Figura 69, possibilitando a análise comparativa dos cenários em análise.

Figura 69 – Estimativa de energia incorporada por unidade de bloco de concreto.



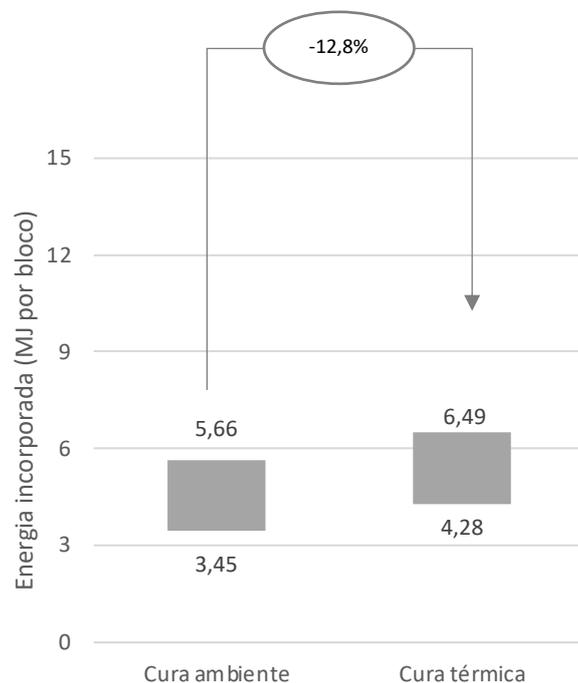
Fonte: elaborado pelo autor (2023)

O cenário observado aponta para uma potencial redução de 25% a 35% na energia incorporada ao material, considerando os blocos de concreto álcali-ativado submetidos à cura térmica e cura ambiente, respectivamente, em relação aos blocos de concreto produzidos com cimento Portland. Embora os resultados apontem para o potencial de redução da demanda energética ao substituir a matriz cimentícia em cerca de um terço, os dados obtidos por Neupane (2022) indicam a possibilidade de redução em até três vezes a energia incorporada.

Em números absolutos, quando extrapolado para o lote de 1.000 unidades de blocos de concreto, podemos atribuir uma estimativa de 3452 MJ a 5658 MJ para a produção dos blocos de concreto álcali-ativado submetidos à cura ambiente. Ao acrescentar o processo de cura térmica, o consumo energético estimado passa para 4281 MJ a 6487 MJ, enquanto as amostras produzidas com cimento Portland são apresentadas uma estimativa de demanda energética de 5575 MJ a 8651 MJ.

Considerando os dados de massa e densidade dos blocos apresentados anteriormente (Tabela 20, item 4.1.2), a energia incorporada por metro cúbico é estimada em 1282 MJ/m³ a 1810 MJ/m³ para os blocos de concreto de cimento Portland. Já os blocos de cimento álcali-ativado curados em temperatura ambiente demandam de 1154 MJ/m³ a 1471 MJ/m³, enquanto os blocos com cura térmica estão na faixa de 1308 MJ/m³ a 1626 MJ/m³. Ao evitar a etapa de cura térmica, há um potencial de redução de 12,8% no consumo energético, como ilustrado na Figura 70.

Figura 70 – Impacto dos parâmetros do processo de cura na energia incorporada em blocos de concreto álcali-ativados.

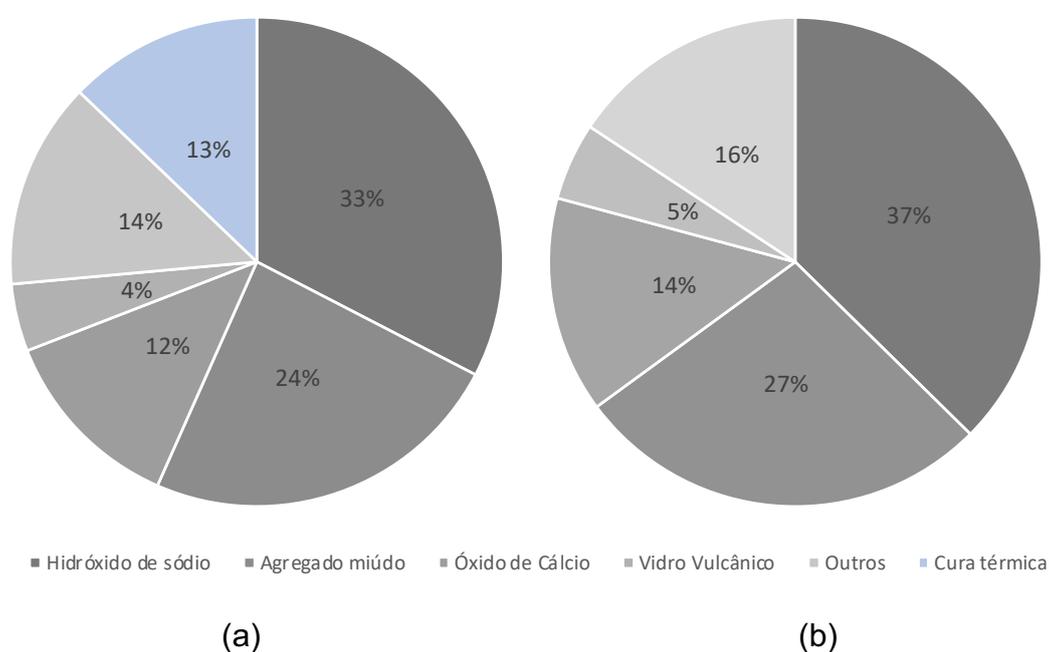


Fonte: elaborado pelo autor (2023)

A Figura 71 apresenta as contribuições individuais dos constituintes dos blocos, caracterizando a composição de origem das demandas energéticas. No aspecto de energia incorporada no material, o ativador alcalino, representado pelo hidróxido de sódio, é o principal agente agressor, em ambos os cenários de produção dos blocos de concreto

álcali-ativados, seguidos pela utilização dos agregados. Ao contrário da composição da origem de emissões de CO₂, a realização do processo de cura térmica não é o principal contribuinte na energia incorporada do material, tendo estimativa de 13% da demanda energética, enquanto o hidróxido de sódio e o agregado miúdo correspondem a 33%, e 24%, respectivamente. Os blocos de concreto submetidos à cura ambiente apresentam um perfil similar de contribuintes, contudo, os percentuais correspondem a 37% de origem na produção do hidróxido de sódio e 27% no processamento do agregado miúdo.

Figura 71 – Composição de origem da demanda energética na produção dos blocos de concreto álcali-ativado: (a) Cura Térmica; (b) Cura Ambiente.



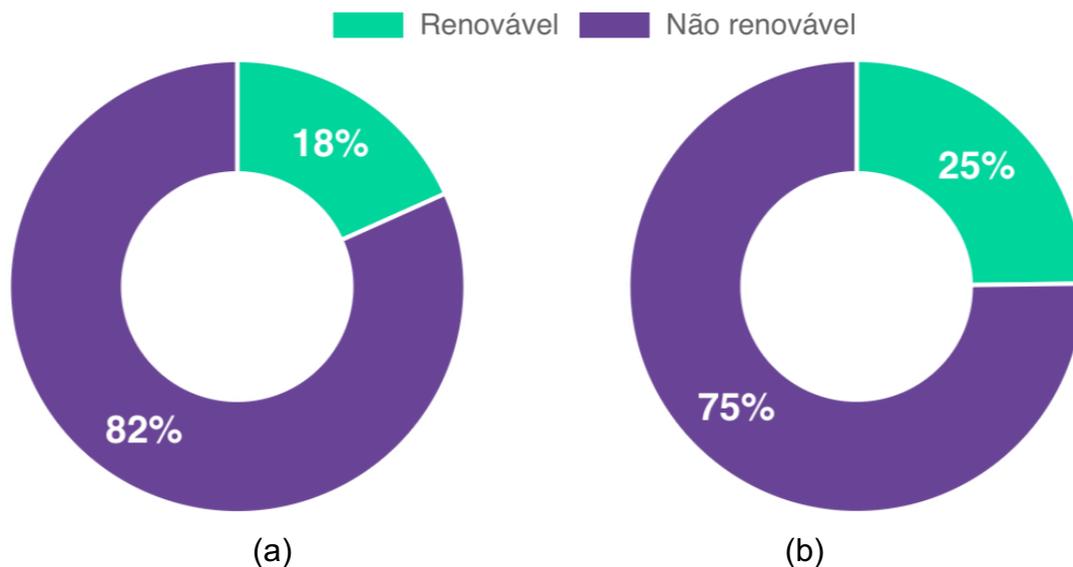
Fonte: elaborado pelo autor (2023)

O valor estimado para a contribuição do ativador alcalino está em linha com o valor obtido por Kanagaraj et al. (2023), que correspondia a uma faixa de 34% a 52% das necessidades energéticas do material. Devido a essa significativa contribuição, eles recomendaram que, para tornar os concretos álcali-ativados mais sustentáveis, a concentração das soluções alcalinas deveria ser mantida com uma molaridade inferior a 10.

Ao analisar a matriz energética utilizada na produção dos blocos de concreto com cimento Portland (Figura 72), podemos observar que apenas 18% do consumo energético é proveniente de fonte renovável, enquanto a produção do concreto álcali-ativado utiliza 25% de origem renovável. Este indicador desconsidera os impactos associados ao

hidróxido de sódio e a cura térmica, tendo em vista que o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção (Sidac) não possui tais informações no seu banco de dados para contabilizar no indicador.

Figura 72 – Desempenho em relação à energia primária: (a) Concreto Portland; (b) Concreto Álcali-ativado.



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

Nesse contexto, ao analisar a produção de um lote com 1.000 unidades de blocos, percebemos que o consumo energético de um bloco fabricado com cimento Portland, proveniente de fonte não renovável, varia entre 4906 MJ e 7613 MJ. Por outro lado, os blocos produzidos com cimento álcali-ativado têm um consumo projetado de energia variando de 2589 MJ a 4243 MJ para a cura ambiente e de 3211 MJ a 4865 MJ para a cura térmica. Considerando essa perspectiva, a redução no consumo de energia incorporada, proveniente de fonte não renovável, nas matrizes álcali-ativada submetidas à cura térmica em comparação com a matriz de cimento Portland, resultaria em uma diminuição do consumo energético de 34 a 36%. Enquanto isso, a matriz submetida à cura ambiente apresentaria uma redução de 44 a 47% no consumo de energia incorporada não renovável.

4.3 AVALIAÇÃO DE CUSTOS

A avaliação do custo produtivo dos blocos de concreto utilizando cimento Portland (referência) e cimento álcali-ativado em escala industrial contabilizou as despesas

atreladas aos aspectos de insumos, mão de obra, energia, impostos e demais custos. A composição detalhada do custo de produção em escala industrial está apresentada na Tabela 23 em valor unitário (referência = 1), a fim de evitar a desatualização dos valores monetários e preservar o sigilo de informações estratégicas da empresa que disponibilizou a infraestrutura para a realização deste estudo.

Tabela 23 – Composição de custo para a produção de uma unidade de bloco de concreto.

Insumos	Referência	Cura Ambiente	Cura Térmica
Areia	0,117	0,117	0,117
Agregados	0,416	0,416	0,416
Cimento Portland	0,255	-	-
Precursor	-	0,085	0,085
Hidróxido de sódio	-	0,160	0,160
Óxido de cálcio	-	0,033	0,033
Cura térmica	-	-	-
Mão de obra	0,052	0,052	0,052
Impostos	0,105	0,105	0,105
Energia	0,024	0,024	0,024
Outros Custos	0,030	0,030	0,030
Total	1	1,02	1,02

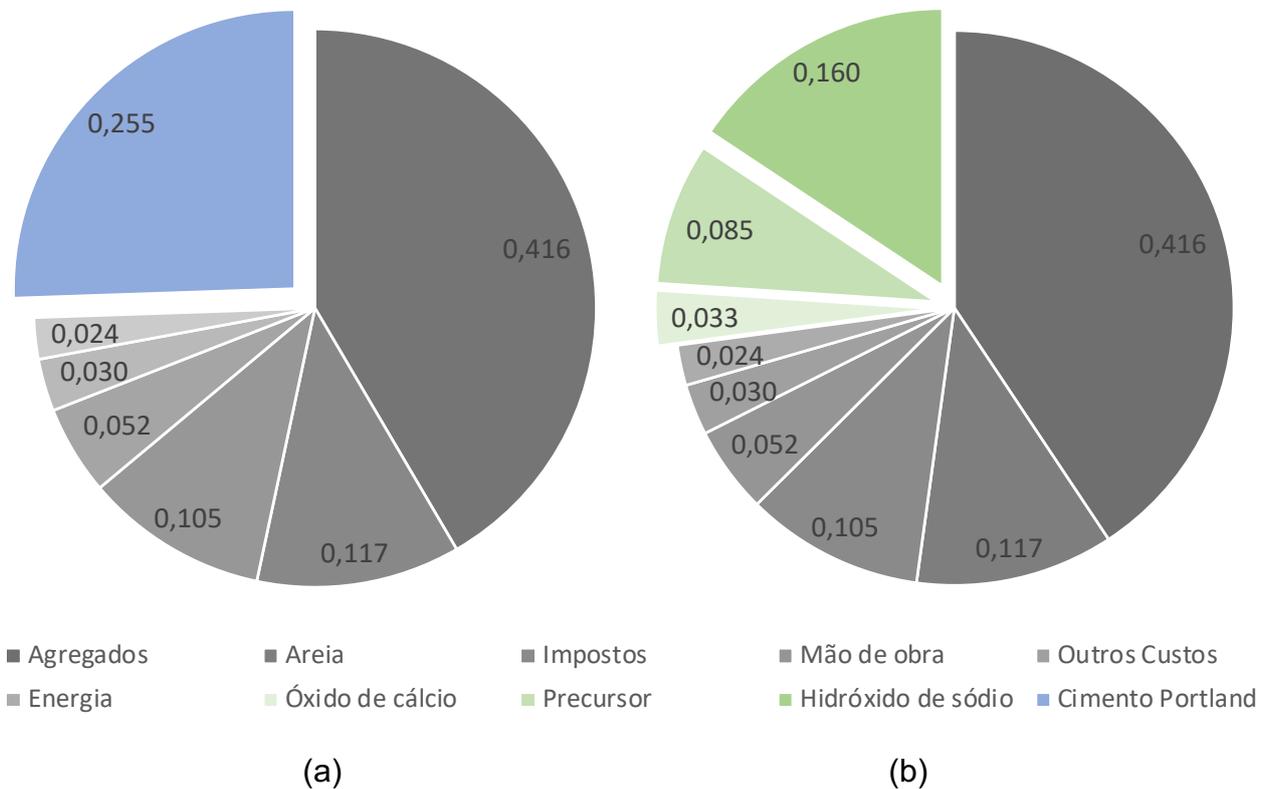
Fonte: elaborado pelo autor (2023)

A análise da composição de custos na produção de blocos de concreto em escala industrial revelou um aumento de 2% no valor unitário ao utilizar o cimento álcali-ativado em vez do cimento Portland. Esse resultado está em conformidade com as descobertas de Kanagaraj et al. (2023), que identificaram uma correlação entre o custo do material e a classe de resistência à compressão, variando de uma redução de 8,98% até um acréscimo de 8,88% no custo de produção para concretos de alta resistência (acima de 70 MPa).

Esse comportamento foi justificado por Kanagaraj et al. (2023), que apontaram a necessidade de soluções com molaridades mais elevadas em relação aos concretos de menor resistência. Como pode ser observado na Figura 73, o ativador alcalino é o principal fator que contribui para o aumento de custos, como também foi evidenciado na perspectiva ambiental. Isso destaca a importância de otimizar a composição e a dosagem do ativador alcalino, buscando reduzir o volume de solução e a sua molaridade. O elevado custo associado ao ativador alcalino pode ser mitigado por meio da utilização de fontes alternativas, como subprodutos industriais, para substituir o hidróxido de sódio e o

óxido de cálcio, com o objetivo de melhorar o desempenho econômico dos blocos álcali-ativados.

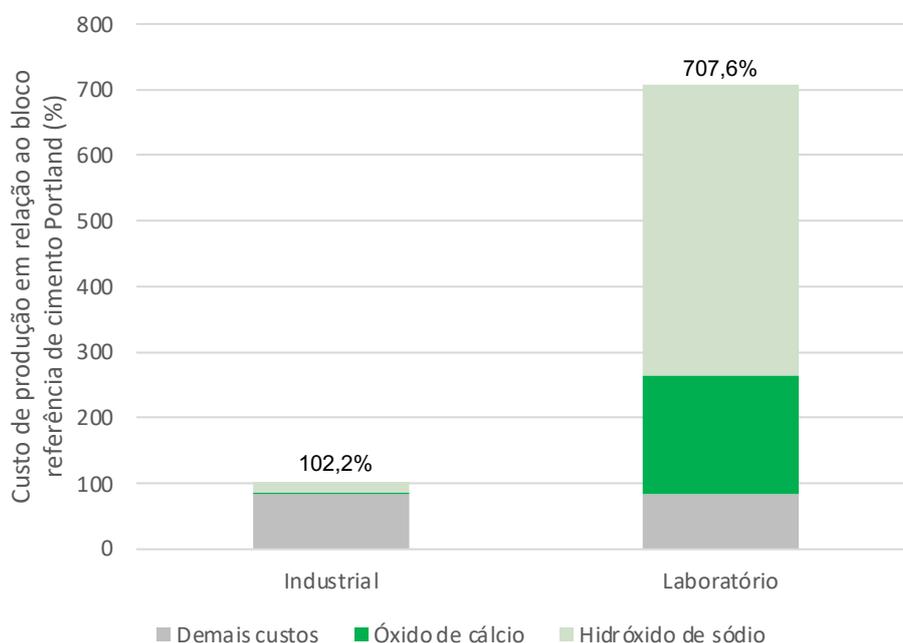
Figura 73 – Composição de custos na produção de blocos de concreto em escala industrial: (a) Cimento Portland; (b) Cimento Álcali-ativado



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

É importante observar que o custo de aquisição dos insumos, como o hidróxido de sódio e o óxido de cálcio, em escala laboratorial, quando comparado ao custo de aquisição em escala industrial, pode resultar em uma distorção significativa nos resultados, como indicado por Davidovits (2015) e ilustrado na Figura 74. O indicador de custo variou de 1,02 para 7,07 em relação ao custo de produção do bloco de concreto convencional.

Figura 74 – Impacto da escala de produção em relação ao custo comparado ao bloco de concreto produzido com cimento Portland.



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

Essa validação destaca a importância de ter cuidado ao comparar o desempenho dos materiais ativado por álcalis produzidos em escala laboratorial com o cimento Portland, que possui uma indústria consolidada e uma rede de suprimentos estruturada. A diferença nos custos de insumos pode influenciar significativamente a viabilidade econômica e a competitividade dos materiais álcali-ativado em escala industrial.

O processo de cura térmica foi realizado a partir da reutilização da energia térmica proveniente da câmara de secagem dos blocos cerâmicos, não representando acréscimo no custo produtivo. A produção de blocos de concreto álcali-ativado em uma planta industrial exclusiva deve contabilizar o custo para realizar a etapa de cura térmica. Entretanto, os resultados obtidos na caracterização mecânica e ambiental indicam a possibilidade de evitar esta etapa produtiva, com a obtenção na melhora técnica e ambiental no desempenho do produto. O custo atrelado à mão de obra necessária para realizar o processo manual de preparo do ativador alcalino foi desconsiderado, pois existe a possibilidade de automatizar a mistura e inserção da solução no sistema, assim como é realizado o procedimento de adição de água no concreto convencional.

5 CONCLUSÃO

Neste item são apresentadas as conclusões do estudo referente à caracterização das propriedades físicas e mecânicas dos blocos de concreto álcali-ativado, assim como o desempenho ambiental e a análise de custos em relação ao concreto convencional.

5.1 MÍNIMO PRODUTO VIÁVEL (MVP)

Foram produzidos, em uma planta industrial, blocos de concreto álcali-ativado, submetidos a dois processos de cura, em condições ambientais e com o incremento de temperatura. Neste processo, foi identificada uma série de pontos de melhoria em relação aos procedimentos de preparo e processos de produção, conforme descrito anteriormente.

O avanço no nível da pesquisa, de pasta de cimento produzida em laboratório para a produção de um bloco de concreto em uma planta industrial, representou um grande desafio, sendo possível mapear lacunas de conhecimento no processo produtivo. O procedimento de preparo e inserção do ativador alcalino no misturador foi conturbado devido à redução da disponibilidade de água para diluir o hidróxido de sódio em decorrência da presença de umidade nos agregados utilizados na produção do concreto. Essa correção no teor de água na mistura resultou no aumento da concentração e no aumento da viscosidade do ativador alcalino, além de intensificar as reações exotérmicas do hidróxido de sódio. As alterações nas características físicas do ativador podem ter dificultado a completa homogeneização e ativação do material precursor.

A revisão dos procedimentos de produção em escala industrial é fundamental para a correta homogeneização do ativador alcalino com o material precursor, garantindo a maior taxa de dissolução das partículas para formar uma matriz cimentícia mais densa com uma microestrutura que viabilize a melhora dos indicadores de desempenho. Também deve ser acrescentado na metodologia de produção dos blocos, o controle das condicionantes de umidade e temperatura do processo de cura ambiente nas idades iniciais, visando garantir a uniformização das características físicas e mecânicas do produto.

O objetivo de obter o produto viável mínimo (*Minimum Viable Product*) foi atingido ao ter sido realizado a produção dos blocos de concreto álcali-ativado em uma planta industrial, com resultados que atendem aos requisitos normativos para blocos de concreto. A realização do processo produtivo aprimorou o conhecimento dos parâmetros a serem controlados em uma indústria e evidenciou as lacunas no conhecimento, indicando a necessidade do refinamento nos procedimentos produtivos.

5.2 DESEMPENHO TÉCNICO

Os blocos de concreto álcali-ativado submetidos à cura térmica e ambiente foram caracterizados em relação ao seu desempenho físico e mecânico. Neste processo foi possível validar o potencial de sua produção em escala industrial e utilização no setor da construção civil através da sua classificação em acordo com os requisitos estabelecidos na NBR 6136 (ABNT, 2016).

Os blocos produzidos com cimento álcali-ativado atingiram os parâmetros necessários correspondentes à análise dimensional, estando todas as amostras dentro dos limites especificados em norma. A análise do comportamento de absorção de água indicou desempenho satisfatório em ambos os processos de cura, atendendo aos requisitos da Classe A aos 28 dias. Contudo, os blocos de concreto submetidos à cura ambiente apresentaram menor absorção de água, indicando que a microestrutura formada é mais densa, com maior grau de polimerização da matriz cimentícia e menor teor de poros internos. O processo de cura térmica pode ter resultado na formação de trincas por retração e por perda excessiva de água no processo de secagem das amostras, aumentando a capacidade de absorção de água.

Quanto ao comportamento mecânico, o desempenho dos blocos de concreto álcali-ativado foi inferior aos blocos produzidos com cimento Portland nas três idades em análise. Contudo, os blocos submetidos à cura ambiente, após o ciclo de saturação e secagem que gerou ganho de resistência, foram enquadrados na Classe B da NBR 6136 (ABNT, 2016) aos 28 dias, atendendo aos mesmos requisitos que os blocos convencionais. Enquanto isso, o material submetido à cura térmica foi enquadrado na Classe C, corroborando com o indicativo obtido no ensaio

de absorção, que a microestrutura não obteve o mesmo desenvolvimento que o material submetido à cura ambiente.

O processo de cura também influenciou o comportamento mecânico das amostras ao longo do tempo. A cura térmica resultou em amostras com uma resistência à compressão estável durante as três idades analisadas, provavelmente devido ao processo acelerado de dissolução e polimerização das partículas causado pelo aumento da temperatura. Isso pode dificultar o acesso do ativador alcalino ao material precursor, interrompendo o processo de dissolução no material. Os blocos de concreto submetidos à cura ambiente apresentaram oscilação na resistência à compressão ao longo do tempo, indicando aumento e posterior redução, sendo importante aumentar o período de observação e o número de amostras, associados a novos ensaios de durabilidade para validar as características mecânicas.

O processo de deterioração do material em contato com a água, conforme observado por Staudt (2019), foi estabilizado, consolidando os avanços alcançados por Koppe (2021). A correção da composição química do vidro vulcânico por meio da adição de 15% de óxido de cálcio mostrou-se eficaz na formação de estruturas estáveis, prevenindo a ruptura das ligações de sílica e até mesmo resultando em ganho de resistência após a imersão em água. No entanto, apesar da estabilidade dimensional e mecânica das amostras em contato com a água, notou-se uma significativa formação de eflorescência na superfície dos blocos de concreto. Isso destaca a necessidade de aprimorar a composição do ativador alcalino para alcançar um equilíbrio adequado entre a disponibilidade e o consumo de álcalis no processo de ativação.

O objetivo de caracterizar o desempenho técnico dos blocos de concreto foi atingido ao obter a chancela de desempenho segundo os requisitos definidos na NBR 6136 (ABNT, 2016), que reforçou o seu potencial de utilização na indústria da construção civil. Contudo, mesmo apresentando características adequadas, é necessário aumentar o período de investigação em relação ao comportamento do material no longo prazo.

5.3 DESEMPENHO AMBIENTAL

A estimativa do impacto ambiental dos blocos de concreto álcali-ativado submetidos à cura térmica e ambiente foi determinada com base Sistema de

Informação do Desempenho Ambiental da Construção (Sidac). Neste processo foi possível identificar o potencial de redução das emissões de CO₂ e do consumo energético na produção de blocos de concreto em escala industrial.

A caracterização exata do desempenho ambiental dos materiais ativados por álcalis é complexa por possuir muitas variáveis que afetam a estimativa final, principalmente pela inexistência da indústria estruturada com a cadeia de suprimentos desenvolvida. Entretanto, os dados utilizados a partir do Sidac servem como um indicativo deste desempenho.

Os blocos produzidos com cimento álcali-ativado apresentaram um potencial de redução na ordem de 40% a 61% das emissões de dióxido de carbono, variando de acordo com a característica do processo de cura que as amostras foram submetidas. A ausência do processo de produção do clínquer trouxe uma vantagem para o cimento álcali-ativado, tendo em vista a sua origem em um coproduto da mineração, que demanda apenas a cominuição do vidro vulcânico em estado natural para a granulometria desejada. Embora seja necessária a correção da composição química do material precursor com a adição de óxido de cálcio.

Ao analisar a composição das emissões de CO₂, podemos observar que os principais contribuintes são o processo de cura térmica, o óxido de cálcio e o hidróxido de sódio. Os resultados obtidos na caracterização do desempenho técnico indicam que o processo de cura térmica reduziu o desempenho das amostras, ou seja, poderia ser removido do processo produtivo. A utilização do óxido de cálcio se faz necessário para garantir a estabilidade do produto formado ao entrar em contato com a água; contudo, poderia ocorrer a substituição por uma fonte alternativa de cálcio na composição do material precursor. A eflorescência formada na superfície dos blocos de concreto, resultado da dosagem do ativador alcalino, indica a possibilidade de redução no consumo de hidróxido de sódio na mistura. Portanto, embora já tenha apresentado redução nas emissões de CO₂, ainda existe a possibilidade de ampliar estes valores.

No aspecto de energia incorporada no material, foi estimado o potencial de redução de 25% a 35%. O ativador alcalino representado pelo hidróxido de sódio é o principal agente agressor, em ambos os cenários de produção dos blocos de concreto álcali-ativados. Outro aspecto positivo é a composição de origem da matriz energética, tendo maior participação de fontes renováveis para a obtenção do

concreto álcali-ativado em relação ao concreto com cimento Portland, que se utiliza de uma maior quantidade de energia não renovável.

Os indicadores de desempenho obtidos pelo material desenvolvido foram positivos, com o potencial de serem otimizados. O desempenho ambiental do produto pode ser otimizado com a realização de ajustes na dosagem do ativador alcalino, a substituição do óxido de cálcio por uma fonte alternativa de Ca, a eliminação da etapa do processo de cura térmica e a estruturação da cadeia de suprimentos para reduzir deslocamentos.

O objetivo de analisar os impactos ambientais gerados no processo produtivo dos blocos de concreto álcali-ativados foi atingido ao gerar indicadores de desempenho sobre o aspecto das emissões de dióxido de carbono e em relação à demanda energética do processo produtivo. Embora a complexidade do tema demande a ampliação do estudo de análise de ciclo de vida com dados primários considerando toda a cadeia produtiva.

5.4 DESEMPENHO ECONÔMICO

O objetivo de analisar o custo de produção dos blocos de concreto produzidos em escala industrial foi atingido ao gerar indicadores de desempenho sobre o custo de produção em planta fabril, através da coleta de dados primários relacionados aos aspectos de insumos, mão de obra, energia, impostos e demais custos.

A análise da composição de custo na produção de blocos de concreto em escala industrial indicou o acréscimo no valor unitário em 2% ao utilizar o cimento álcali-ativado em relação ao cimento Portland. Neste cenário, o ativador alcalino é o principal detrator do desempenho econômico, assim como ocorreu pela perspectiva ambiental, evidenciando e ratificando a necessidade de otimizar a composição e dosagem do ativador alcalino, assim como buscar fontes alternativas para substituir a utilização do hidróxido de sódio e óxido de sódio.

Os custos relacionados à utilização do ativador alcalino e a correção do material precursor são os grandes desafios para a popularização da aplicação comercial deste material.

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo geral deste estudo foi atingido ao avaliar, pela primeira vez, a viabilidade técnica, ambiental e os custos da produção de blocos de concreto utilizando cimento álcali-ativado produzido a partir de vidros vulcânicos como aglomerante em escala industrial. A consolidação dos resultados indica o potencial de utilização do vidro vulcânico, um subproduto da mineração, como um substituto viável ao cimento Portland na produção de blocos de concreto. Contudo, é necessário a realização de mais investigações quanto ao comportamento mecânico no longo prazo e em relação à durabilidade para que o material esteja disponível para comercialização no setor da construção civil.

5.6 TRABALHOS FUTUROS

Na elaboração deste estudo foram identificados pontos a serem desenvolvidos que podem resultar na compreensão de lacunas do conhecimento e na melhora do desempenho dos blocos de concreto. As sugestões de trabalhos futuros são:

- 1) Otimizar a composição e dosagem do ativador alcalino visando a redução do consumo de hidróxido de sódio;
- 2) Investigar a possibilidade de utilização de fontes alternativas de óxido de cálcio e hidróxido de sódio na composição do material precursor;
- 3) Definir os procedimentos do processo produtivo dos blocos de concreto álcali-ativado em escala industrial, com o objetivo de garantir a preparação e homogeneização do ativador alcalino no material precursor;
- 4) Realizar um estudo direcionado à composição e dosagem do concreto álcali-ativado;
- 5) Ampliar os estudos relacionados à durabilidade dos blocos de concreto, com ênfase a formação de eflorescência e estabilidade ao contato com água;
- 6) Avaliar a utilização do processo de cura térmica na produção do produto;

- 7) Monitorar o comportamento mecânico dos blocos de concreto em idades mais avançadas, a fim de garantir o desempenho do material no longo prazo;
- 8) Avaliar a influência da granulometria e área superficial das partículas do material precursor no desenvolvimento de resistência à compressão;
- 9) Desenvolver o estudo de análise de ciclo de vida, com a coleta de dados primários.

REFERÊNCIAS

ABDULKAREEM, M. et al. Environmental and economic perspective of waste-derived activators on alkali-activated mortars. **Journal of Cleaner Production**, v. 280, p. 124651, 2021.

ALLAHVERDI, A. et al. Methods to control efflorescence in alkali-activated cement-based materials. In: PACHECO-TORGAL, Fernando; LABRINCHA, Joao; LEONELLI, C; PALOMO, A; CHINDAPRASIT, P (Org.). **Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2015. p. 463-483.

ALLAHVERDI, A.; KANI, E. N. Use of construction and demolition waste (CDW) for alkali-activated or geopolymer cements. In: PACHECO-TORGAL, F; TAM, V. W. Y; LABRINCHA, J. A.; DING, Y; DE BRITO, J (Org.). **Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2013. p. 439-475.

ALLAHVERDI, A.; MEHRPOUR, K.; KANI, E. N. Taftan pozzolan-based geopolymer cement. **International Journal of Engineering Science**, v. 19, n. 3, p. 1–5, 2008.

ALLAHVERDI, A.; MEHRPOUR, K.; NAJAFIKANI, E. Investigating the possibility of utilizing pumice-type natural pozzolan in production of geopolymer cement. **Ceramics - Silikaty**, v. 52, n. 1, p. 16–23, 2008.

ALMUTAIRI, A. L. et al. Potential applications of geopolymer concrete in construction: A review. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, p. 1-20, 2021.

ANDREW, R. M. Global CO₂ emissions from cement production, 1928–2018. **Earth System Science Data**, v. 11, p. 1675–1710, 2019.

ARBI, K. et al. A Review on the Durability of Alkali-Activated Fly Ash/Slag Systems: Advances, Issues, and Perspectives. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 55, n. 19, p. 5439–5453, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 12118**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria — Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 6136**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria — Requisitos. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 7211**: Agregados para concreto — Requisitos. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 7215**: Cimento Portland — Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR ISO 7500-1**: Materiais metálicos - Calibração e verificação de máquinas de ensaio estático uniaxial. Rio de Janeiro, 2016.

BAKHAREV, T.; SANJAYAN, J. G.; CHENG, Y. B. Effect of elevated temperature curing on properties of alkali-activated slag concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 10, p. 1619–1625, 1999.

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

BILIM, C. et al. Influence of admixtures on the properties of alkali-activated slag mortars subjected to different curing conditions. **Materials and Design**, v. 44, p. 540-547, 2013.

BONDAR, D. et al. Effect of adding mineral additives to alkali-activated natural pozzolan paste. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 6, p. 2906–2910, 2011b.

BONDAR, D. et al. Effect of heat treatment on reactivity-strength of alkali-activated natural pozzolans. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 10, p. 4065–4071, 2011c.

BONDAR, D. et al. Effect of type, form, and dosage of activators on strength of alkali-activated natural pozzolans. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 2, p. 251–260, 2011a.

BUCHWALD, A.; OESTERHELD, R.; HILBIG, H. Incorporation of aluminate into silicate gels and its effect on the foamability and water resistance. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 93, n. 10, p. 3370–3376, 2010.

CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL (CBCS). Projeto Avaliação de Ciclo de Vida Modular de Blocos e Pisos de Concreto: CBCS. [S.l.]: CBCS, [2022?]. Disponível em: http://www.cbcs.org.br/5dotSystem/userFiles/ACV-m/CBCS_ACV-blocos-concreto.pdf. Acesso em: 11 jan 2022.

CRIADO, M. et al. Effect of the SiO₂/Na₂O ratio on the alkali activation of fly ash. Part II: 29Si MAS-NMR Survey. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 109, n. 1–3, p. 525–534, 2008.

CRIADO, M.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Alkali activation of fly ash. Part III: Effect of curing conditions on reaction and its graphical description. **Fuel**, v. 89, n. 11, p. 3185–3192, 2010.

DAVIDOVITS, J. False Values on CO₂ Emission for Geopolymer Cement/Concrete published in Scientific Papers. **Geopolymer Institute Library**, 2015.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer Chemistry and Applications**. 2. ed. Saint-Quentin: Institut Géopolymère, 2008.

DIAS, N. A. A. **Geopolímeros : Contributos para a redução das eflorescências**. 2012. 84 f. Dissertação (Mestrado em Integrado em Engenharia Civil) -- Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga, 2012.

DJOBLO, J. N. Y. et al. Mechanical activation of volcanic ash for geopolymer synthesis: Effect on reaction kinetics, gel characteristics, physical and mechanical properties. **RSC Advances**, v. 6, n. 45, p. 39106–39117, 2016.

DUXSON, P. et al. Geopolymer technology: The current state of the art. **Journal of Materials Science**, v. 42, n. 9, p. 2917–2933, 2007.

DUXSON, P. 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.

EL-SALAMONY, A. H. R.; MAHMOUD, H. M.; SHEHATA, N. Enhancing the efficiency of a cement plant kiln using modified alternative fuel. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, v. 14, 2020.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. et al. The role played by the reactive alumina content in the alkaline activation of fly ashes. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 91, p. 111–119, 2006.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. P. A. Chemical durability of geopolymers. In: PROVIS, J.L.; VAN DEVENTER, J. S.J (Org.). **Geopolymers: Structure, processing, properties and industrial applications**. Spain: Woodhead Publishing Limited, 2009. p. 167–166.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Nanostructure/microstructure of fly ash geopolymers. In: PROVIS, J.L.; VAN DEVENTER, J. S.J (Org.). **Geopolymers: Structure, processing, properties and industrial applications**. Spain: Woodhead Publishing Limited, 2009. p. 89–117.

GANJIAN, E.; JALLUL, G.; SADEGHI-POUYA, H. Using waste materials and by-products to produce concrete paving blocks. **Construction and Building Materials**, v. 77, p.270-275, 2015.

GARCES, J. I. T et al. Environmental life cycle assessment of alkali-activated material with different mix designs and self-healing agents. **Chemical Engineering Transactions**, v88, p.835-840, 2021.

GARCIA-LODEIRO, I.; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. An overview of the chemistry of alkali-activated cement-based binders. In: PACHECO-TORGAL, F.; LABRINCHA, J.; LEONELLI, C.; PALOMO, A.; CHINDAPRASIT, P. (Org.). **Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2015a. p. 19–47.

GARCIA-LODEIRO, I.; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. Crucial insights on the mix design of alkali-activated cement-based binders. In: PACHECO-TORGAL, F.; LABRINCHA, J.; LEONELLI, C.; PALOMO, A.; CHINDAPRASIT, P. (Org.). **Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2015b. p. 49–73.

GLASBY, T. et al. EFC geopolymer concrete aircraft pavements at Brisbane West Wellcamp Airport. **Concrete 2015 Conference**, v. 11, n. 1, p. 1–9, 2015.

GLOBALABC. **2021 Global Status Report for Buildings and Construction**. Disponível em: <https://globalabc.org/sites/default/files/2021-10/GABC_Buildings-GSR-2021_BOOK.pdf>. Acessado em: 24 fev. 2023.

GÖRHAN, G.; KÜRKLÜ, G. The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures. **Composites Part B: Engineering**, v. 58, p. 371–377, 2014.

HABERT, G. et al. An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: Reviewing current research trends. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 11, p. 1229–1238, 2011.

HASSAN, A.; ARIF, M.; SHARIQ, M. Use of geopolymer concrete for a cleaner and sustainable environment A review of mechanical properties and microstructure. **Journal of Cleaner Production**, v. 223, p. 704–728, 2019.

HUSEIEN, G. F. et al. Influence of different curing temperatures and alkali activators on properties of GBFS geopolymer mortars containing fly ash and palm-oil fuel ash. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 1229–1240, 2016.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (IOS). **ISO 13320: Particle size analysis — Laser diffraction methods**. [S.l.], 2020.

KANAGARAJ, B, et al. Techno-socio-economic aspects of Portland cement, Geopolymer, and Limestone Calcined Clay Cement (LC3) composite systems: A-State-of-Art-Review. **Construction and Building Materials**, v. 398, p. 132484, 2023.

KANI, E. N.; ALLAHVERDI, A. 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.

KOMNITSAS, K.; ZAHARAKI, D.; PERDIKATIS, V. Effect of synthesis parameters on the compressive strength of low-calcium ferronickel slag inorganic polymers. **Journal of Hazardous Materials**, v. 161, n. 2–3, p. 760–768, 2009.

KONG, D. L. Y. Y.; SANJAYAN, J. G. Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 2, p. 334–339, 2010.

KOPPE, A. **Verificação do potencial de ativação alcalina de rochas vulcânicas ácidas: um estudo de desempenho mecânico e caracterização do ligante**. 2021. 321 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2021.

KREUTZER, L. A. Cimento Geopolimérico: **Estudo dos parâmetros físico-químicos do cimento geopolimérico**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) -- Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2021.

LEMOUGNA, P. N. et al. Influence of the activating solution composition on the stability and thermo-mechanical properties of inorganic polymers (geopolymers) from volcanic ash. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 278–286, 2013b.

LEMOUGNA, P. N. et al. Influence of the chemical and mineralogical composition on the reactivity of volcanic ashes during alkali activation. **Ceramics International**, v. 40, n. 1, p. 811–820, 2014.

LEMOUGNA, P. N. et al. The role of iron in the formation of inorganic polymers (geopolymers) from volcanic ash: A57Fe Mössbauer spectroscopy study. **Journal of Materials Science**, v. 48, n. 15, p. 5280–5286, 2013a.

LOFGREN, G. Experimentally produced devitrification textures in natural rhyolitic glass. **Bulletin of the Geological Society of America**, v. 82, n. 1, p. 111–124, 1971.

LONGHI, M. A. et al. Metakaolin-based geopolymers: Relation between formulation, physicochemical properties and efflorescence formation. **Composites Part B**, v. 182, 2020.

LONGHI, M. A. et al. Valorisation of a kaolin mining waste for the production of geopolymers. **Journal of Cleaner Production**, v. 115, p. 265–272, 2016.

MACHADO, F. B. et al. As rochas intrusivas da Formação Serra Geral na Porção leste da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo: Aspectos petrográficos e geoquímicos - Resultados preliminares. **Geociências**, v. 13, n. 1, p. 5–17, 2005.

MARSHALL, R. R. Devitrification of natural glass. **Bulletin of the Geological Society of America**, v. 72, n. 10, p. 1493–1520, 1961.

MCLELLAN, B. C. et al. Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 9–10, p. 1080–1090, 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. 4. ed. New Yorque: McGraw-Hill Professional Publishing, 2014.

MELLADO, A. et al. Carbon footprint of geopolymeric mortar: Study of the contribution of the alkaline activating solution and assessment of an alternative route. **RSC Advances**, v. 4, n. 45, p. 23846–23852, 2014.

MENDES, B. C. et al. Application of eco-friendly alternative activators in alkali-activated materials: A review. **Journal of Building Engineering**, v. 35, p. 102010, 2021.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL. Sidac - Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção. Versão 1.0.0. São Paulo: MME; CBCS, 2022.

MO, B. H. et al. Effect of curing temperature on geopolymerization of metakaolin-based geopolymers. **Applied Clay Science**, v. 99, p. 144–148, 2014.

MOON, J. et al. Characterization of natural pozzolan-based geopolymeric binders. **Cement and Concrete Composites**, v. 53, p. 97–104, 2014.

MUÑIZ-VILLARREAL, M. S. et al. The effect of temperature on the geopolymerization process of a metakaolin-based geopolymer. **Materials Letters**, v. 65, n. 6, p. 995–998, 2011.

NADOUSHAN, M. J.; RAMEZANIANPOUR, A. A. The effect of type and concentration of activators on flowability and compressive strength of natural pozzolan and slag-based geopolymers. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 337–347, 2016.

NAJAFI, E; ALLAHVERDI, A; PROVIS, J. L. Efflorescence control in geopolymer binders based on natural pozzolan. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 1, p. 25–33, 2012.

NARDY, A. J. R.; MACHADO, F. B.; OLIVEIRA, M. A. F. As rochas vulcânicas mesozoicas ácidas da Bacia do Paraná: litoestratigrafia e considerações geoquímico-estratigráficas. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 38, p. 178–195, 2008.

NARDY, A. J. R.; ROSA, M. C.; LUCHETTI, A. C. F.; FERREIRA, M. L. C.; MACHADO, F. B.; OLIVEIRA, M. A. F. Parâmetros físicos pré-eruptivos do magnetismo ácido da Província Magmática do Paraná: Resultados preliminares. **São Paulo, UNESP, Geociências**, v. 30, n. 4, p. 575–588, 2011.

NATH, S. K. Fly ash and zinc slag blended geopolymer: Immobilization of hazardous materials and development of paving blocks. **Journal of Hazardous Materials**, v. 387, 2020.

NEUPANE, K. Evaluation of environmental sustainability of one-part geopolymer binder concrete. **Cleaner Materials**, v. 6, 2022.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman Editora LTDA, 2013.

NIDHEESH, P. V.; KUMAR, M. S. An overview of environmental sustainability in cement and steel production. **Journal of Cleaner Production**, v. 231, p. 856–871, 2019.

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

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

PALOMO, A.; ALONSO, S.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. Alkaline Activation of Fly Ashes: NMR Study of the Reaction Products. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 87, n. 6, p. 1141–1145, 2004.

PALOMO, A.; GRUTZECK, M. W.; BLANCO, M. T. Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 8, p. 1323–1329, 1999.

PANIAS, D.; GIANNOPOULOU, I. P.; PERRAKI, T. Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 301, p. 246–254, 2007.

PASSUELLO, A. et al. Evaluation of the potential improvement in the environmental footprint of geopolymers using waste-derived activators. **Journal of Cleaner Production**, v. 166, p. 680–689, 2017.

PETRILLO, A. et al. An Environmental Evaluation: A Comparison Between Geopolymer and OPC Concrete Paving Blocks Manufacturing Process in Italy. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v. 35, n. 6, p. 1699–1708, 2016.

PINTO, A. T. **Sistemas ligantes obtidos por ativação alcalina do metaucalino**. 2004. 400 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) -- Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães, 2004.

POLO, L. A. **O vulcanismo ácido da Província Magmática Paraná-Etendeka na região de Gramado Xavier, RS: estratigrafia, estruturas, petrogênese e modelo eruptivo**. 2014. 326 f. Tese (Doutorado em Mineralogia e Petrologia) -- Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

POLO, L. A., JANASI, V. A., LIMA, E. F. CAÑAN-TAPIA E., ROVERATO, M. Effusive silicic volcanism in the Paraná Magmatic Province, South Brazil: Evidence for locally-fed lava flows domes from detailed field work. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 355, p. 204–218, 2018.

PROVIS, J. L. Activating solution chemistry for geopolymers. In: PROVIS, J.L.; VAN DEVENTER, J. S.J (Org.). **Geopolymers: Structure, processing, properties and industrial applications**. Melbourne: Woodhead

Publishing Limited, 2009. p. 50–71.

PROVIS, J. L. Alkali-activated materials. **Cement and Concrete Research**, v. 50, n. 4, p. 50–51, 2018.

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

PROVIS, J. L. Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what? **Materials and Structures**, v. 47, p. 11–25, 2014.

PROVIS, J. L.; BERNAL, S. A. Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials. **Annual Review of Materials Research**, v. 44, n. 1, p. 299–327, 2014.

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

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. **Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report, RILEM TC 224-AAM**. Dordrecht: Springer/RILEM, 2014.

RATTANASAK, U.; CHINDAPRASIRT, P. Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. **Minerals Engineering**, v. 22, n. 12, p. 1073–1078, 2009.

REDDEN, R.; NEITHALATH, N. Microstructure, strength, and moisture stability of alkali activated glass powder-based binders. **Cement and Concrete Composites**, v. 45, p. 46–56, 2014.

ROBAYO-SALAZAR, R. A.; DE GUTIÉRREZ, M.; PUERTAS, F. Study of synergy between a natural volcanic pozzolan and a granulated blast furnace slag in the production of geopolymeric pastes and mortars. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 151–160, 2017.

ROBAYO-SALAZAR, R. A.; GUTIÉRREZ, R. M. DE. Natural volcanic pozzolans as an available raw material for alkali-activated materials in the foreseeable future: A review. **Construction and Building Materials**, v. 189, p. 109–118, 2018.

ROBAYO-SALAZAR, R. A.; RIVERA, J. F.; GUTIÉRREZ, M. R. Alkali-activated building materials made with recycled construction and demolition wastes. **Construction and Building Materials**, v. 149, p. 130–138, 2017.

RODRIGUEZ, E. D. et al. Effect of nanosilica-based activators on the performance of an alkali-activated fly ash binder. **Cement and Concrete Composites**, v. 35, n. 1, p. 1–11, 2013.

SAGOE-CRENTSIL, K.; SILVA, P. DE. Alkali-activated binders: Early Age Nucleation Reactions, Chemical Phase Evolution and Their Implications on

System Properties. **Journal of the Chinese Ceramic Society**, v. 43, n. 10, p. 1449–1457, 2015.

SHEHATA, N. et al. Geopolymer concrete as green building materials: Recent applications, sustainable development and circular economy potentials. **Science of the Total Environment**, v. 836, 2022.

SHI, C.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. 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.

SILVA, G. H. M. J. S.; PRIYAMALI, M. W. S. Potential use of waste rice husk ash for concrete paving blocks: strength, durability, and run-off properties. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 23, n. 7, p. 2265-2277, 2022.

SILVA, P. DE; SAGOE-CRENSSTIL, K. Medium-term phase stability of $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ geopolymer systems. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 6, p. 870–876, 2008.

SISTEMA DE INFORMAÇÃO DO DESEMPENHO AMBIENTAL DA CONSTRUÇÃO (Sidac).. [S.l]: Sidac, [2023?]. Disponível em: <https://Sidac.org.br>. Acesso em: 16 mar 2023.

ŠKVÁRA, F. et al. Material and structural characterization of alkali activated low-calcium brown coal fly ash. **Journal of Hazardous Materials**, v. 168, n. 2–3, p. 711–720, 2009.

SRIVIDYA, T. et al. A state-of-the-art on development of geopolymer concrete and its field applications. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, p. 1-13, 2022.

SRIVIDYA, T.; RAJKUMAR, P. R. K. Mechanical and durability properties of alkali-activated binders based paver blocks derived from secondary sources. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, p 1-12, 2022.

STAUDT, L. C. **Avaliação de parâmetros físico-químicos na produção de geopolímeros constituídos por vidro vulcânico e silicato de sódio alternativo**. 2019. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2019.

STAUDT, Luís Cláudio; KOPPE, Angélica; SANDER, Andrea; MANCIO, Mauricio. Avaliação do potencial de utilização de vidros vulcânicos para produção de matrizes cimentícias álcali-ativadas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO – CBC2017, 59., 2017, Bento Gonçalves. **Anais eletrônicos...** Bento Gonçalves: Instituto Brasileiro do Concreto, 2017.

SUWAN, T.; FAN, M.; BRAIMAH, N. Micro-mechanisms and compressive strength of Geopolymer-Portland cementitious system under various curing temperatures. **Materials Chemistry and Physics**, v. 180, p. 219–225, 2016.

TAKEDA, H. et al. Fabrication and characterization of hardened bodies from Japanese volcanic ash using geopolymerization. **Ceramics International**, v. 40, n. 3, p. 4071–4076, 2014.

TALAAT, A.; EMAD, A.; KOHAIL, M. Environmental Impact Assessment for Performance-Oriented Geopolymer Concrete Research. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 35, n. 1, 2023.

TCHADJIÉ, L. N. et al. Potential of using granite waste as raw material for geopolymer synthesis. **Ceramics International**, v. 42, n. 2, p. 3046–3055, 2016.

TCHAKOUTÉ, H. K. et al. A comparative study of two methods to produce geopolymer composites from volcanic scoria and the role of structural water contained in the volcanic scoria on its reactivity. **Ceramics International**, v. 41, n. 10, p. 12568–12577, 2015.

TCHAKOUTE, H. K. et al. Synthesis of geopolymers from volcanic ash via the alkaline fusion method: Effect of Al_2O_3/Na_2O molar ratio of soda-volcanic ash. **Ceramics International**, v. 39, n. 1, p. 269–276, 2013.

TEMUUJIN, J.; VAN RIESSEN, A.; WILLIAMS, R. Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes. **Journal of Hazardous Materials**, v. 167, n. 1–3, p. 82–88, 2009.

TENNAKOON, C. et al. Influence and role of feedstock Si and Al content in geopolymer synthesis. **Journal of Sustainable Cement-Based Materials**, v. 4, n. 2, p. 129–139, 2016.

TURNER, L. K.; COLLINS, F. 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.

VARGAS, A. S. DE et al. Strength development of alkali-activated fly ash produced with combined NaOH and Ca(OH)₂ activators. **Cement and Concrete Composites**, v. 53, p. 341–349, 2014.

VARGAS, A. S. DE et al. The effects of Na₂O/SiO₂ molar ratio, curing temperature and age on compressive strength, morphology and microstructure of alkali-activated fly ash-based geopolymers. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 6, p. 653–660, 2011.

VILLAQUIRÁN-CAICEDO, M. A. et al. Thermal properties of novel binary geopolymers based on metakaolin and alternative silica sources. **Applied Clay Science**, v. 118, p. 276–282, 2015.

WALKLEY, B. et al. Phase evolution of C-(N)-A-S-H/N-A-S-H gel blends investigated via alkali-activation of synthetic calcium aluminosilicate precursors. **Cement and Concrete Research**, v. 89, p. 120–135, 2016.

WANG, A. et al. The Durability of Alkali-Activated Materials in Comparison with Ordinary Portland Cements and Concretes: A Review.

Engineering, v. 6, n. 6, p. 695–706, 2020.

YADOLLAHI, M. M.; BENLI, A.; DEMIRBOGA, R. The effects of silica modulus and aging on compressive strength of pumice-based geopolymer composites. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 767–774, 2015.

ZHAO, R.; SANJAYAN, J. G. Geopolymer and Portland cement concretes in simulated fire. **Magazine of Concrete Research**, v. 63, n. 3, p. 163–173, 2011.

ANEXO A – ANÁLISE ESTATÍSTICA

Dados

		Variável tempo (dias)		
Amostra	Composição	8	28	92
1	Traço 1	4,1	5,4	4,6
2	Traço 1	5,0	5,9	5,1
3	Traço 1	5,4	5,8	5,5
1	Traço 2	2,1	4,1	2,8
2	Traço 2	2,5	3,5	3,3
3	Traço 2	2,4	4,2	3,9
1	Traço 3	2,9	3,3	3,1
2	Traço 3	3,2	3,0	3,6
3	Traço 3	3,0	3,1	3,4
Amostra	Composição	8	28	92
	Traço 2	2,1	4,1	2,8
	Traço 2	2,5	3,5	3,3
	Traço 2	2,4	4,2	3,9
Amostra	Composição	8	28	92
	Traço 3	2,9	3,3	3,1
	Traço 3	3,2	3,0	3,6
	Traço 3	3,0	3,1	3,4

SUMÁRIO

(dias)	8	28	92	Total
<i>Traço 1</i>				
Contagem	3	3	3	9
Soma	14,5393773	17,1017949	15,1618681	46,8030403
Média	4,8464591	5,70059829	5,05395604	5,20033781
Variância	0,44325007	0,09387734	0,18914089	0,33041144
<i>Traço 2</i>				
Contagem	3	3	3	9
Soma	7,04858974	11,8173223	10,0117766	28,8776886
Média	2,34952991	3,93910744	3,33725885	3,20863207
Variância	0,03533198	0,13787819	0,32124785	0,60668786
<i>Traço 3</i>				
Contagem	3	3	3	9

Soma	9,12888278	9,32683544	10,1667216	28,6224398
Média	3,04296093	3,10894515	3,3889072	3,18027109
Variância	0,03978287	0,02593791	0,04993719	0,05421593

Total

Contagem	9	9	9
Soma	30,7168498	38,2459526	35,3403663
Média	3,41298331	4,24955029	3,92670737
Variância	1,37560467	1,37800905	0,85534454

ANOVA

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor P	F crítico
Amostra	24,145097	2	12,0725485	81,3036621	9,7014E-10	3,55455715
Colunas	3,20395279	2	1,6019764	10,7886539	0,0008326	3,55455715
Interacções	2,05380051	4	0,51345013	3,457876	0,02903232	2,92774417
Dentro	2,67276857	18	0,14848714			
Total	32,0756188	26				

Idade 8	Média 1	Média 2	Módulo da média
Traço 1 - Traço 2	4,846459096	2,349529915	2,496929182
Traço 1 - Traço 3	4,846459096	3,042960928	1,803498168
Traço 2 - Traço 3	2,349529915	3,042960928	0,693431013

Idade 28	Média 1	Média 2	Módulo da média
Traço 1 - Traço 2	5,700598291	3,939107436	1,761490855
Traço 1 - Traço 3	5,700598291	3,108945146	2,591653145
Traço 2 - Traço 3	3,939107436	3,108945146	0,83016229

Idade 92	Média 1	Média 2	Módulo da média
Traço 1 - Traço 2	5,053956044	3,337258852	1,716697192
Traço 1 - Traço 3	5,053956044	3,388907204	1,66504884
Traço 2 - Traço 3	3,337258852	3,388907204	0,051648352

Traço 1

Anova: fator único

SUMÁRIO

Grupos	Contagem	Soma	Média	Variância
8	3	14,5393773	4,8464591	0,44325007
28	3	17,1017949	5,70059829	0,09387734

92 3 15,1618681 5,05395604 0,18914089

ANOVA

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1,19075494	2	0,59537747	2,45932859	0,16593808	5,14325285
Dentro de grupos	1,45253661	6	0,24208944			
Total	2,64329155	8				

Traço 2

Anova: factor único

SUMÁRIO

<i>Grupos</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
8	3	7,04858974	2,34952991	0,03533198
28	3	11,8173223	3,93910744	0,13787819
92	3	10,0117766	3,33725885	0,32124785

ANOVA

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	3,86458687	2	1,93229343	11,7237059	0,00845887	5,14325285
Dentro de grupos	0,98891602	6	0,16481934			
Total	4,85350289	8				

Traço 3

Anova: factor único

SUMÁRIO

<i>Grupos</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
8	3	9,12888278	3,04296093	0,03978287
28	3	9,32683544	3,10894515	0,02593791
92	3	10,1667216	3,3889072	0,04993719

ANOVA

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,2024115	2	0,10120575	2,62513038	0,15169316	5,14325285
Dentro de grupos	0,23131594	6	0,03855266			
Total	0,43372743	8				

SUMÁRIO 8 28 92 Total

Cura ambiente

Contagem	3	3	3	9
Soma	7,04858974	11,8173223	10,0117766	28,8776886
Média	2,34952991	3,93910744	3,33725885	3,20863207
Variância	0,03533198	0,13787819	0,32124785	0,60668786

Cura térmica

Contagem	3	3	3	9
Soma	9,12888278	9,32683544	10,1667216	28,6224398
Média	3,04296093	3,10894515	3,3889072	3,18027109
Variância	0,03978287	0,02593791	0,04993719	0,05421593

Total

Contagem	6	6	6
Soma	16,1774725	21,1441577	20,1784982
Média	2,69624542	3,52402629	3,36308303
Variância	0,17429991	0,27227727	0,14927428

Dados

Amostra	Composição	Variável tempo (dias)		
		8	28	92
1	Cura ambiente	2,1	4,1	2,8
2	Cura ambiente	2,5	3,5	3,3
3	Cura ambiente	2,4	4,2	3,9
1	Cura térmica	2,9	3,3	3,1
2	Cura térmica	3,2	3,0	3,6
3	Cura térmica	3,0	3,1	3,4
Amostra	Composição	8	28	92
	Cura ambiente	2,1	4,1	2,8
	Cura ambiente	2,5	3,5	3,3
	Cura ambiente	2,4	4,2	3,9
Amostra	Composição	8	28	92
	Cura térmica	2,9	3,3	3,1
	Cura térmica	3,2	3,0	3,6
	Cura térmica	3,0	3,1	3,4

SUMÁRIO 8 28 92 Total

Cura ambiente

Contagem	3	3	3	9
Soma	7,04858974	11,8173223	10,0117766	28,8776886
Média	2,34952991	3,93910744	3,33725885	3,20863207
Variância	0,03533198	0,13787819	0,32124785	0,60668786

Cura térmica

Contagem	3	3	3	9
Soma	9,12888278	9,32683544	10,1667216	28,6224398
Média	3,04296093	3,10894515	3,3889072	3,18027109
Variância	0,03978287	0,02593791	0,04993719	0,05421593

Total

Contagem	6	6	6
Soma	16,1774725	21,1441577	20,1784982
Média	2,69624542	3,52402629	3,36308303
Variância	0,17429991	0,27227727	0,14927428

ANOVA

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor P</i>	<i>F crítico</i>
Amostra	0,00361955	1	0,00361955	0,03559538	0,85350664	4,74722535
Colunas	2,31159259	2	1,1557963	11,3663271	0,00170083	3,88529383
Interações	1,75540577	2	0,87770289	8,63150203	0,00475526	3,88529383
Dentro	1,22023196	12	0,101686			
Total	5,29084988	17				

Idade 8	Média 1	Média 2	Módulo da média
Cura ambiente - Cura térmica	2,349529915	3,042960928	0,693431013

Idade 28	Média 1	Média 2	Módulo da média
Cura ambiente - Cura térmica	3,939107436	3,108945146	0,83016229

Idade 92	Média 1	Média 2	Módulo da média
Cura ambiente - Cura térmica	3,337258852	3,388907204	0,051648352

Cura ambiente

Anova: fator único

SUMÁRIO

Grupos	Contagem	Soma	Média	Variância
8	3	7,04858974	2,34952991	0,03533198
28	3	11,8173223	3,93910744	0,13787819
92	3	10,0117766	3,33725885	0,32124785

ANOVA

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor P	F crítico
Entre grupos	3,86458687	2	1,93229343	11,7237059	0,00845887	5,14325285
Dentro de grupos	0,98891602	6	0,16481934			
Total	4,85350289	8				

Cura térmica

Anova: fator único

SUMÁRIO

Grupos	Contagem	Soma	Média	Variância
8	3	9,12888278	3,04296093	0,03978287
28	3	9,32683544	3,10894515	0,02593791
92	3	10,1667216	3,3889072	0,04993719

ANOVA

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor P	F crítico
Entre grupos	0,2024115	2	0,10120575	2,62513038	0,15169316	5,14325285
Dentro de grupos	0,23131594	6	0,03855266			
Total	0,43372743	8				

Dados

	Referência	Cura Ambiente	Cura Térmica
Ambiente	5,4	4,1	3,3
Ambiente	5,9	3,5	3,0
Ambiente	5,8	4,2	3,1

Saturado	5,4	4,6	3,1
Saturado	5,2	4,6	2,9
Saturado	4,9	4,7	2,7

SUMÁRIO	Referência	Cura Ambiente	Cura Térmica	Total
<i>Ambiente</i>				
Contagem	3	3	3	9
Soma	17,1017949	11,8173223	9,32683544	38,2459526
Média	5,70059829	3,93910744	3,10894515	4,24955029
Variância	0,09387734	0,13787819	0,02593791	1,37800905
<i>Saturado</i>				
Contagem	3	3	3	9
Soma	15,5165334	13,8363736	8,62780164	37,9807086
Média	5,17217779	4,61212454	2,87593388	4,22007874
Variância	0,0693487	0,00674661	0,03671874	1,10329773
<i>Total</i>				
Contagem	6	6	6	
Soma	32,6183282	25,6536959	17,9546371	
Média	5,43638804	4,27561599	2,99243951	
Variância	0,14905888	0,19373553	0,04135094	

ANOVA

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor P	F crítico
Amostra	0,00390858	1	0,00390858	0,0632955	0,80561795	4,74722535
Colunas	17,9336361	2	8,96681804	145,208693	3,9034E-09	3,88529383
Interações	1,17580317	2	0,58790159	9,52048102	0,00333792	3,88529383
Dentro	0,74101498	12	0,06175125			
Total	19,8543628	17				

Referência	Média 1	Média 2	Módulo da média
Ambiente - Saturado	5,70059829	5,172177792	0,528420498

Cura Ambiente	Média 1	Média 2	Módulo da média
Ambiente - Saturado	3,93910744	4,612124542	0,673017107

Cura Térmica	Média 1	Média 2	Módulo da média

Ambiente - Saturado	3,10894515	2,875933879	0,233011267
---------------------	------------	-------------	-------------

Dados

Amostra	Composição	8	28	92
1	Referência	4,1	5,4	4,6
2	Referência	5,0	5,9	5,1
3	Referência	5,4	5,8	5,5
		4,8	5,7	5,1

SUMÁRIO

Grupos	Contagem	Soma	Média	Variância
8	3	14,5393773	4,8464591	0,44325007
28	3	17,1017949	5,70059829	0,09387734
92	3	15,1618681	5,05395604	0,18914089

ANOVA

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor P	F crítico
Entre grupos	1,19075494	2	0,59537747	2,45932859	0,16593808	5,14325285
Dentro de grupos	1,45253661	6	0,24208944			
Total	2,64329155	8				

Dados

Amostra	Composição	8	28	92
1	Cura Ambiente	2,1	4,1	2,8
2	Cura Ambiente	2,5	3,5	3,3
3	Cura Ambiente	2,4	4,2	3,9
		2,3	3,9	3,3

SUMÁRIO

Grupos	Contagem	Soma	Média	Variância
8	3	7,04858974	2,34952991	0,03533198
28	3	11,8173223	3,93910744	0,13787819
92	3	10,0117766	3,33725885	0,32124785

ANOVA

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	3,86458687	2	1,93229343	11,7237059	0,00845887	5,14325285
Dentro de grupos	0,98891602	6	0,16481934			
Total	4,85350289	8				

Dados

Amostra	Composição	8	28	92
1	Cura Térmica	2,9	3,3	3,1
2	Cura Térmica	3,2	3,0	3,6
3	Cura Térmica	3,0	3,1	3,4
		3,0	3,1	3,4

SUMÁRIO

<i>Grupos</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
8	3	9,12888278	3,04296093	0,03978287
28	3	9,32683544	3,10894515	0,02593791
92	3	10,1667216	3,3889072	0,04993719

ANOVA

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,2024115	2	0,10120575	2,62513038	0,15169316	5,14325285
Dentro de grupos	0,23131594	6	0,03855266			
Total	0,43372743	8				

Dados

Referência	Cura ambiente	Cura térmica
6,80	6,54	7,77
6,96	7,26	8,25
6,91	6,81	7,88
7,27	6,83	7,69

SUMÁRIO

<i>Grupos</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Referência	4	27,9352272	6,9838068	0,04064139
Cura ambiente	4	27,4402085	6,86005212	0,08733776
Cura térmica	4	31,5885317	7,89713293	0,06113752

ANOVA

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	2,56668861	2	1,2833443	20,357977	0,00045694	4,25649473
Dentro de grupos	0,56735002	9	0,06303889			
Total	3,13403863	11				

Dados

Referência	Cura ambiente
6,80	6,54
6,96	7,26
6,91	6,81
7,27	6,83

SUMÁRIO

<i>Grupos</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Referência	4	27,9352272	6,9838068	0,04064139
Cura ambiente	4	27,4402085	6,86005212	0,08733776

ANOVA

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,03063044	1	0,03063044	0,47867855	0,51488834	5,98737761
Dentro de	0,38393745	6	0,06398958			

grupos

Total	0,41456789	7
-------	------------	---

Dados

Referência	Cura térmica
6,80	7,77
6,96	8,25
6,91	7,88
7,27	7,69

SUMÁRIO

Grupos	Contagem	Soma	Média	Variância
Referência	4	27,9352272	6,9838068	0,04064139
Cura térmica	4	31,5885317	7,89713293	0,06113752

ANOVA

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor P	F crítico
Entre grupos	1,66832926	1	1,66832926	32,7833961	0,0012312	5,98737761
Dentro de grupos	0,30533675	6	0,05088946			
Total	1,97366601	7				

Dados

Cura ambiente	Cura térmica
6,54	7,77
7,26	8,25
6,81	7,88
6,83	7,69

SUMÁRIO

Grupos	Contagem	Soma	Média	Variância
Cura ambiente	4	27,4402085	6,86005212	0,08733776
Cura térmica	4	31,5885317	7,89713293	0,06113752

ANOVA

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor P	F crítico
-------------------	----	----	----	---	---------	-----------

Entre grupos	2,15107321	1	2,15107321	28,9755061	0,00169102	5,98737761
Dentro de grupos	0,44542584	6	0,07423764			
Total	2,59649905	7				

Dados

Cura térmica	Referência	Cura ambiente
1990,73384	2107,08433	2033,35698
1973,34548	2089,56219	2047,07611
1976,13274	2097,93978	2040,95717
1995,86872	2069,73477	2041,20551

SUMÁRIO

<i>Grupos</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Cura térmica	4	7936,08078	1984,0202	120,54069
Referência	4	8364,32107	2091,08027	253,70583
Cura ambiente	4	8162,59578	2040,64894	31,6286559

ANOVA

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	22949,3231	2	11474,6615	84,8142156	1,44648E-06	4,25649473
Dentro de grupos	1217,62553	9	135,291725			
Total	24166,9486	11				

Dados

Cura térmica	Cura ambiente
1990,73384	2033,35698
1973,34548	2047,07611
1976,13274	2040,95717
1995,86872	2041,20551

SUMÁRIO

<i>Grupos</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Cura térmica	4	7936,08078	1984,0202	120,54069
Cura ambiente	4	8162,59578	2040,64894	31,6286559

ANOVA

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	6413,63037	1	6413,63037	84,2959578	9,40652E-05	5,98737761
Dentro de grupos	456,508037	6	76,0846728			
Total	6870,13841	7				

Dados

Referência	Cura ambiente
2107,08433	2033,35698
2089,56219	2047,07611
2097,93978	2040,95717
2069,73477	2041,20551

SUMÁRIO

<i>Grupos</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Referência	4	8364,32107	2091,08027	253,70583
Cura ambiente	4	8162,59578	2040,64894	31,6286559

ANOVA

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	5086,63658	1	5086,63658	35,6538507	0,000989282	5,98737761
Dentro de grupos	856,003457	6	142,667243			
Total	5942,64003	7				

ANEXO B – DESCRIÇÕES DOS ITENS NO SIDAC

Constituinte	Descrição
Demanda de energia primária (MJ)	- Contabiliza a demanda de energia em energia primária, ou seja, da energia encontrada na natureza, que ainda não foi convertida. São exemplos de energia primária a energia solar, a energia eólica, a energia hidráulica, a energia geotérmica, a energia contida em combustíveis e a energia contida no núcleo dos átomos (liberada pela fissão nuclear). No caso das fontes de energia primária solar, eólica, hidráulica e geotérmica, a energia primária é considerada igual à energia convertida, ou seja, não se considera a ineficiência da conversão da energia primária em energia secundária. A quantificação da energia primária contida nos combustíveis é feita por meio do seu poder calorífico inferior. A unidade desse indicador é o mega Joule (MJ).
Emissão de CO ₂ (kg)	- Contabiliza as emissões de dióxido de carbono (CO ₂) geradas pela queima de combustíveis fósseis, por reações químicas, como a descarbonatação do calcário, e pela queima ou decomposição de biomassa não renovável (desmatamento). O CO ₂ é o principal gás de efeito estufa e o aumento da concentração desses gases na atmosfera causa o aquecimento global. Esse indicador não contabiliza outros gases de efeito estufa. A unidade desse indicador é o quilograma (kg).
Água da rede pública	- Água proveniente da rede pública de abastecimento.
Areia processada	- Areia extraída de cava ou de rio, utilizada como agregado miúdo
Gás natural (combustão)	- Combustão de gás natural incluindo emissão de CO ₂ .
Lenha não renovável (combustão)	- Combustão de lenha de fonte não renovável (desmatamento) incluindo emissão de CO ₂ .
Lenha renovável (combustão)	- Combustão de lenha de fonte renovável incluindo emissão de CO ₂ .
Óleo diesel (combustão)	- Combustão de óleo diesel incluindo emissão de CO ₂ .
Eletricidade da rede pública	- Eletricidade fornecida pelo Sistema Interligado Nacional (SIN) brasileiro, que considera o mix elétrico do Brasil, formado por diferentes fontes de energia.
Brita	- Brita obtida pela cominuição de rocha, utilizada como agregado miúdo ou graúdo. Inclui pó de pedra e areia de britagem.
Gás liquefeito de petróleo (combustão)	- Combustão de gás liquefeito de petróleo (GLP) incluindo emissão de CO ₂ .
Cimento - CP V	- Cimento Portland que atende aos requisitos de alta resistência inicial (ARI)

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

**ANEXO C – DESCRIÇÃO DO BLOCO DE CONCRETO FCK 4MPA
(14X19X39) SIDAC**

Elemento	Descrição
Produção de bloco de concreto estrutural fbk 4 MPa (14 x 19 x 39) cm	<p>- Não são considerados materiais utilizados para embalar as peças prontas para envio ao consumidor, como pallets e filmes plásticos. Os insumos que entraram no <i>cut-off</i> foram os aditivos e cinza volante por representarem menos de 1% da massa de produto. Como as empresas não informaram qual a origem da lenha utilizada no processo foi considerada que 48% são de origem renovável e 52% de origem não renovável, conforme estimativas nacionais. Os consumos de pedrisco, areia industrial, pó de brita e/ou agregados reciclados foram contabilizados como consumo de brita, uma vez que os processos produtivos desses materiais são similares. O tipo de cimento considerado foi apenas o CP V, que é o tipo de cimento consumido por fábricas que correspondem a 98% do volume de produção da amostra de dados. O consumo de água adicionada à mistura (com exceção da água de reação com o cimento) e para a cura úmida, assim como a geração de resíduos de processo, não foram consolidados no Projeto ACV-m e, portanto, não foram considerados para o Sidac. O transporte dos insumos materiais considera o retorno dos veículos vazios. A massa da peça é a massa seca, ou seja, não considera a absorção de umidade de equilíbrio com o ar.</p>

Fonte: elaborado pelo autor (2023)