



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE CRATEÚS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

MARÍLIA LIMA TAVARES

**AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CURA SOBRE A RESISTÊNCIA À
COMPRESSÃO E A MICROESTRUTURA DE ARGAMASSA ÁLCALI-ATIVADA À
BASE DE CINZA VOLANTE E ESCÓRIA DE ACIARIA**

CRATEÚS
2023

MARÍLIA LIMA TAVARES

AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CURA SOBRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO
E A MICROESTRUTURA DE ARGAMASSA ÁLCALI-ATIVADA À BASE DE CINZA
VOLANTE E ESCÓRIA DE ACIARIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial à obtenção do título de graduado em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dra. Heloína Nogueira da Costa.

CRATEÚS
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

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

- T231a Tavares, Marília Lima.
Avaliação das condições de cura sobre a resistência à compressão e a microestrutura de argamassa álcali-ativada à base de cinza volante e escória de aciaria / Marília Lima Tavares. – 2023.
57 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Heloína Nogueira da Costa.
1. Cimento álcali-ativado. 2. Cinza volante. 3. Escória de aciaria BOF. 4. Condição de cura. 5. Resistência à compressão. I. Título.

CDD 620

MARÍLIA LIMA TAVARES

AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CURA SOBRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO
E A MICROESTRUTURA DE ARGAMASSA ÁLCALI-ATIVADA À BASE DE CINZAS
DO CARVÃO MINERAL E ESCÓRIA DE ACIARIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
banca examinadora da Universidade Federal do
Ceará como requisito parcial à obtenção do
título de graduado em Engenharia Civil.

Aprovado em: 23/03/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Heloína Nogueira da Costa (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral
Universidade Federal do Ceará

Eng.º Daniel Lira Lopes Targino
Universidade Federal do Ceará

A Deus.

À minha mãe, Cleuma.

Aos meus irmãos, Átila e Laísa.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me permitir chegar até esse momento sempre rodeada de pessoas incríveis.

À minha mãe, Cleuma, por todo amor, acolhida e incentivo durante todo o período da minha graduação. Reconheço e agradeço por todo o esforço que foi feito por mim até hoje.

Aos meus irmãos, Átila e Laísa, que além de irmãos são grandes amigos, estando sempre presentes em minha vida em todos os momentos que precisei.

À Prof. Dra. Heloína, uma pessoa extraordinária, por ter me acolhido no grupo de pesquisa Reative e ter me apresentado ao fascinante mundo das pesquisas de cimentos álcali-ativados, além da excelente orientação durante todo o processo de desenvolvimento deste trabalho.

À Raquel Lopes e à Vitória Martins, amigas que tive o prazer de conhecer na universidade, um ponto de apoio que encontrei para os momentos difíceis e companheiras com quem pude compartilhar as pequenas alegrias e realizações do dia a dia.

Ao Jailson Sampaio e ao Samuel Siqueira, amigos que em muitos momentos me forneceram palavras de consolo e sábios conselhos, além de boas risadas. Vocês são seres humanos incríveis e impactaram bastante a minha vida.

Aos participantes da banca examinadora Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral e Eng.º Daniel Lira Lopes Targino pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Ao Laboratório de Materiais de Construção Civil do Centro de Tecnologia da UFC, por disponibilizar seu espaço e seus equipamentos que foram indispensáveis para a realização desta pesquisa, assim como seus técnicos, por toda a atenção e assistência quando solicitada. Ademias, agradeço também ao João Victor e ao Vanutti, por toda a ajuda na preparação das argamassas que foram estudadas nessa pesquisa e desenvolvidas no laboratório.

Aos colegas da turma, pelas reflexões, críticas, sugestões e boas conversas.

“Mire na lua. Mesmo que você erre cairá entre as estrelas.” Norman Vincent Peale

RESUMO

O cimento Portland é um produto amplamente consumido no setor da construção civil em todo o mundo, no entanto, a sua produção envolve a extração de grandes quantidades de matérias-primas e combustíveis, além de altas emissões de dióxido de carbono na atmosfera. Diante disso, a procura por cimentos não convencionais têm surgido como uma possibilidade para argamassas e concretos alternativos que causem menos impactos ambientais. Nessa conjuntura, os cimentos álcali-ativados têm recebido destaque e o interesse de pesquisadores como alternativa para diminuir os efeitos negativos da indústria do cimento. Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo avaliar o efeito das condições de cura sobre a resistência mecânica e a microestrutura de argamassas álcali-ativadas. As argamassas foram produzidas a partir da mistura dos precursores compostos por cinza volante e escória de aciaria *Basic Oxygen Furnace* (BOF) interagindo com ativadores alcalinos compostos por hidróxido de sódio e silicato de sódio. As condições de cura envolvem a variação de temperatura (temperatura ambiente e 50°C), exposição atmosférica (expostos ou isolados do contato com o ar) e umidade (seco ou submerso em água). A abordagem experimental utilizada baseou-se na determinação das propriedades mecânicas e microestruturais. Por meio do ensaio de resistência à compressão foi observado que a argamassa exposta à cura térmica a 50°C e isolada do contato com o ar atmosférico apresentou o melhor resultados de resistência, 46,05 MPa aos 28 dias. Já a condição de cura inicial a 50°C e posterior imersão em água influenciou negativamente no ganho de resistência à compressão e ocasionou a perda de resistência em idades mais avançadas. A análise microestrutural realizada pelo ensaio de microscopia eletrônica de varredura – MEV apontou que esta condição agravou os vazios na microestrutura da argamassa.

Palavras-chave: Cimento álcali-ativado. Cinza volante. Escória de aciaria BOF. Condição de cura. Resistência à compressão.

ABSTRACT

Ordinary Portland cement is a widely consumed product in the civil construction sector around the world, however, its production involves the generation of large raw materials and fuels, in addition to high emissions of carbon dioxide in the atmosphere. In view of this, the search for unconventional cements has emerged as a possibility for alternative mortars and concretes that cause less environmental impact. In this context, alkali-activated cements received attention and interest from researchers as an alternative to reduce the negative effects of the cement industry. Thus, the present study aims to evaluate the effect of curing conditions on the mechanical strength of alkali-activated mortars. The mortars were produced from the mixture of precursors composed of fly ash and Basic Oxygen Furnace (BOF) steelworks slag interacting with alkaline activators composed of sodium hydroxide and sodium silicate. As curing conditions, temperature variation (room temperature and 50°C), atmospheric exposure (exposed or isolated from contact with air) and humidity (dry or submerged in water). An experimental approach used was based on the experience of mechanical and microstructural properties. Through the surface resistance test, it was observed that the mortar exposed to thermal curing at 50°C and the basic teaching of contact with atmospheric air presented the best resistance results, 46.05 MPa after 28 days. While the initial curing condition at 50°C and subsequent immersion in water influenced the ability to gain resistance to resistance and caused the loss of resistance at more advanced ages. The microstructural analysis carried out by scanning electron microscopy - SEM test showed that this condition aggravated voids in the mortar microstructure.

Keywords: Alkali-activated cement. Fly ash. BOF steel slag. Curing condition. Compressive strength.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Géis e produtos formados durante o processo de álcali-ativação	22
Figura 2 - Procedimento metodológico	25
Figura 3 - Curva granulométrica da areia	28
Figura 4 - Ensaio mesa de consistência	29
Figura 5 - Fôrma em acrílico com a argamassa moldada	30
Figura 6 - Ensaio de resistência à compressão	30
Figura 7 – Gráfico da resistência à compressão 1 dia	33
Figura 8 - Gráfico resistência à compressão 28 dias	35
Figura 9 - Gráfico resistência à compressão 63 dias	37
Figura 10 - Gráfico resistência à compressão 91 dias	38
Figura 11 - Imagens do ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química dos precursores	26
Tabela 2 - Caracterização do hidróxido de sódio	27
Tabela 3 - Caracterização do silicato de sódio	27
Tabela 4 - Análise estatística de resistência à compressão na idade de 1 dia.....	34
Tabela 5 - Análise estatística de resistência à compressão na idade de 28 dias	36
Tabela 6 - Análise estatística de resistência à compressão na idade de 63 dias	38
Tabela 7 - Análise estatística de resistência à compressão na idade de 91 dias	39

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Especificações das condições de cura	31
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BOF	Basic Oxygen Furnace
C1	Condição de Cura 1
C2	Condição de Cura 2
C3	Condição de Cura 3
C4	Condição de Cura 4
C5	Condição de Cura 5
C6	Condição de Cura 6
C-A-S-H	Aluminossilicato de Cálcio Hidratado
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
LABON	Laboratório de Saneamento do Centro de Tecnologia
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil do Centro de Tecnologia
MAA	Materiais Álcali-Ativados
N-A-S-H	Aluminossilicato de Sódio Hidratado
NBR	Norma Brasileira
SNIC	Sindicato da Indústria do Cimento
UFC	Universidade Federal do Ceará

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
Al	Alumínio
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
Ca	Cálcio
Cl	Cloro
CO ₂	Dióxido de carbono
F _{ck}	Resistência característica do concreto à compressão
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro III
H ₂ O	Água
K ₂ O	Óxido de potássio
MnO	Óxido de manganês
MPa	Mega Pascal
Na ₂ SiO ₃	Silicato de sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
NBR	Norma Brasileira
P ₂ O ₅	Pentóxido de difósforo
Si	Silício
SiO ₂	Dióxido de silício
SO ₃	Óxido sulfúrico
SrO	Óxido de estrôncio

TiO₂

Dióxido de titânio

ZnO

Óxido de zinco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Contextualização	15
1.2	Objetivos	17
<i>1.2.1</i>	<i>Objetivo Geral</i>	17
<i>1.2.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i>	17
1.3	Delimitação	17
1.4	Estrutura da pesquisa	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	Materiais álcali-ativados	19
2.2	Condições de cura	23
3	MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1	Materiais	26
<i>3.1.1</i>	<i>Precursores</i>	26
<i>3.1.2</i>	<i>Ativadores</i>	27
<i>3.1.3</i>	<i>Água</i>	27
<i>3.1.4</i>	<i>Areia</i>	27
3.2	Metodologia de pesquisa	29
<i>3.2.1</i>	<i>Preparação das argamassas</i>	29
3.2.2	Ensaio	30
<i>3.2.2.1</i>	<i>Resistência à compressão</i>	30
<i>3.2.2.1</i>	<i>Análise microestrutural</i>	31
<i>3.2.2.2</i>	<i>Análise estatística dos dados</i>	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1	Resistência à compressão	33
4.2	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	40
5	CONCLUSÃO	43

REFERÊNCIAS.....	44
ANEXO A - ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) DOS DADOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E TESTE DE MÚLTIPLAS MÉDIAS – TUKEY	51
ANEXO B - DADOS DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	53

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Desenvolvido no final do século XIX na Inglaterra, o cimento Portland é, hoje, um produto amplamente consumido no setor da construção civil em todo o mundo, geralmente utilizado em argamassas e concretos.

A demanda de cimento Portland tem aumentos consideráveis anos após anos, representando, atualmente, só no Brasil um consumo de 55,4 milhões de toneladas no ano 2021, de acordo com dados do Sindicato Nacional das Indústria de Cimento – SNIC. Vinculado a vasta produção de cimento Portland, em decorrência da alta demanda, existe a preocupação com problemas ambientais, como altas emissões de dióxido de carbono na atmosfera, principal gás causador efeito estufa e associado ao aquecimento, além do elevado consumo de recursos naturais.

A produção do cimento Portland envolve a extração de grandes quantidades de matérias-primas e combustíveis e, durante sua fabricação, ocorre o aquecimento da mistura de calcário, argilas e bauxita, em temperatura que variam de 1200° a 1500°, o que fornece a decomposição de carbonato de cálcio em óxido de cálcio, acarretando altas emissões de dióxido de carbono (ARAUJO, 2020). É estimado que a fabricação de 1 tonelada de cimento Portland libere entre 0,6 e 1 tonelada de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera (MONTEIRO; MILLER; HORVATH, 2017).

Diante desse contexto e em busca de produtos mais sustentáveis, a procura por cimentos não convencionais têm surgido como uma possibilidade para argamassas e concretos alternativos que causem menos impactos ambientais. Para isso, esses novos materiais precisam desempenhar o mesmo papel do cimento Portland, além de apresentar custos inferiores para que seja competitivo no mercado consumidor (AZEVEDO *et al.*, 2017). Nessa conjuntura, no cenário atual, os cimentos álcali-ativados têm ganhado destaque (FRARE; DA LUZ, 2019).

Os cimentos álcali-ativados são aglomerantes originados a partir da ativação da matéria-prima por soluções alcalinas (LANGARO, 2016). A álcali-ativação é decorrente da combinação de um precursor e um ativador alcalino em situação de alto pH. O precursor é um aluminossilicato sólido em forma de pó, enquanto o ativador alcalino é produto apto para dissolver aluminossilicato e acelerar a reação química para produzir um aglomerante endurecido, que é baseado em uma combinação álcali-aluminossilicato hidratado (PROVIS, 2018). Precursores ricos em cálcio dão origem a materiais cujo principal composto é um gel de

aluminossilicato de cálcio hidratado, C-A-S-H (PROVIS, 2014; BERNAL *et al.*, 2014), ao passo que precursores abundantes em SiO₂ e Al₂O₃, sem a presença de cálcio, constituem um material aluminossilicato amorfo, denominado de sódio hidratado, N-A-S-H (LANGARO, 2016).

Existem uma grande variedade de materiais que podem ser utilizados como precursores, no entanto, tem-se dado uma atenção especial aos subprodutos ou resíduos de diversas atividades, com a finalidade de diminuir o descarte e extração de recursos naturais (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014; SILVA *et al.*, 2017). À vista disso, os cimentos álcali-ativados podem conter precursores apenas do reuso de subprodutos e não necessitam da calcinação do material, tornando menor a emissão de gases causadores do efeito estufa na atmosfera. Pressupõe-se que a produção do cimento álcali-ativado quando comparado ao cimento Portland representa uma redução de, pelo menos, 80% de dióxido de carbono (DUXSON *et al.*, 2007).

Várias pesquisas têm conseguido comprovar boas propriedades mecânicas de cimentos álcali-ativados (AZEVEDO, 2017; JUENGER, 2011; LANGARO, 2016). Todavia, alguns fatores, como a composição química da matéria-prima, parâmetros de mistura e condições de cura interferem diretamente nas propriedades dos cimentos álcali-ativados.

Para os cimentos álcali-ativados, a cura em temperatura elevada é comumente utilizada. O calor costuma ser aplicado com intuito de acelerar as reações químicas, diminuindo, quando exposto a temperaturas e condições de umidade desejáveis, o tempo de endurecimento da matriz (CRIADO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2010). Em muitos casos, condições de cura com temperaturas elevadas favorecem de forma positiva a resistência à compressão, além de diminuir o tempo de cura. Geralmente, as temperaturas utilizadas em materiais álcali-ativados não ultrapassam 100°C (RAI; ROY; RAJJAK, 2018).

Entretanto, o efeito positivo da temperatura e de outros fatores envolvidos nas condições de cura devem ser definidos levando em consideração a natureza dos materiais de partida, precursores e ativadores. Na literatura, há registros benéficos da temperatura elevada, assim, como há registros do efeito negativo nessa condição. No último caso, a cura térmica influenciou negativamente na resistência, ocasionando microfissuras na matriz cimentícia (GEBREGZIABIHER; THOMAS; PEETHAMPARAN, 2016, HUSEIN *et al.*, 2016).

Nessa perspectiva, é válido realizar estudos sobre o efeito das condições de cura sobre as variadas composições de cimento álcali-ativado, visto que, podem ser obtidas a partir de vários tipos de precursores e ativadores. Portanto, este estudo tem como foco avaliar o efeito das condições de cura sobre uma argamassa álcali-ativada composta de cinza volante e escória de aciaria *Basic Oxygen Furnace* (BOF). Esses precursores foram estudados por Costa (2022), Caetano (2021) e Araujo (2022) em pastas cimentícias, com diferentes resultados ao variar a temperatura de cura. Dessa forma, busca-se aprofundar o entendimento da resposta mecânica dessa composição, em argamassas, quando se altera alguns fatores combinados, como temperatura, condições de umidade e exposição atmosférica.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar o efeito de diferentes condições de cura em argamassa à base de cinza volante e escória de aciaria *Basic Oxygen Furnace* (BOF) ativada com hidróxido de sódio e silicato de sódio.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analisar a influência da temperatura e da exposição à umidade e à atmosfera na resistência à compressão da argamassa;
- Analisar a influência das variações da temperatura, exposição à umidade e à atmosfera na formação da microestrutura da argamassa.

1.3 Delimitação

A presente pesquisa delimitou-se a utilizar a cinza de carvão mineral e a escória de aciaria *Basic Oxygen Furnace* (BOF) como precursores para a produção do cimento álcali-ativado utilizado na argamassa, em decorrência da grande disponibilidade desses subprodutos no município de São Gonçalo do Amarante, região do Porto do Pecém no estado do Ceará.

1.4 Estrutura da pesquisa

A pesquisa é dividida em cinco seções. Na seção 1, Introdução, está contida a contextualização e a justificativa de pesquisa, objetivos gerais e específicos e a delimitação. A Seção 2 contém o referencial teórico, que é um estudo bibliográfico de conteúdos importantes para a temática da pesquisa. A seção 3 aborda a metodologia para a confecção e execução de argamassas e seus respectivos ensaios. A Seção 4 traz os resultados da pesquisa e as discussões, a partir das análises da argamassa no estado endurecido. Por último, a seção 5 contém a conclusão.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Materiais álcali-ativados

Os materiais álcali-ativados (MAA) são obtidos a partir de dois elementos base, o precursor e o ativador. O precursor, normalmente, tem aspecto de pó, e é composto por aluminossilicatos, podendo ou não apresentar predominância de óxido de cálcio, enquanto os ativadores são formados por metais alcalinos dissolvidos em solução aquosa, sendo responsáveis pelas reações de endurecimento em decorrência do alto pH (PROVIS, 2014).

Os primeiros estudos sobre materiais álcali-ativados foram feitos no início do século XX. Victor Glukhovsky, nas décadas de 1950 e 1960, misturou materiais de processos vulcânicos com soluções ativadoras à base de hidróxido de sódio e encontrou, como resultado, materiais semelhantes ao cimento Portland após seu endurecimento (KOMNITSAS; ZAHARAKI, 2007). Com isto, Glukhovsky em 1959 desenvolveu a teoria-base da ativação alcalina (AZEVEDO *et al.*, 2017).

Na década de 1970, Joseph Davidovits, após a ocorrência de vários incêndios na França envolvendo plásticos orgânicos inflamáveis, iniciou pesquisas com intuito de investigar possíveis materiais que apresentassem maior resistência ao calor. No desenvolvimento de seu estudo produziu um material sílico-aluminoso ativado alcalinamente, ao qual, no ano de 1979 patenteou e denominou de geopolímero (SEVERO *et al.*, 2013).

Embora Davidovits tenha sido um dos responsáveis por difundir exponencialmente as pesquisas envolvendo materiais álcali-ativados, vários outros pesquisadores estudaram e contribuíram notadamente nessa temática. De acordo com Duxson *et al.* (2005) e Severo *et al.* (2013), de maneira geral, a depender da escolha de matérias-primas e condições de processamento, os materiais álcali-ativados podem apresentar elevada resistência à compressão, ao fogo e a ácidos, baixa retração, cura rápida ou lenta e baixa condutividade térmica.

Diante disso, a ativação alcalina tem ganhado destaque. Pesquisas e trabalhos apontam que os materiais álcali-ativados têm potencial para se tornar um ligante alternativo ao cimento Portland, dado que, além das boas propriedades e características, são uma boa opção também para a redução das altas emissões de dióxido de carbono na atmosfera. Segundo MOHAJERANI *et al.* (2019), o uso de ligantes álcali-ativados pode reduzir em até 80% as emissões de dióxido de carbono.

A álcali-ativação é uma reação química de hidratação de aluminossilicato com substâncias alcalinas ou alcalino-terrosas, existindo uma grande variedade de materiais aluminossilicatos suscetíveis a esse tipo de reação (SEVERO *et al.*, 2013). O processo da álcali-ativação é iniciado pela dissolução e liberação de Al, Si e Ca (quando presente) na solução. Esses elementos reagem e se reorientam em um conjunto de produtos aglomerantes. Em seguida, os produtos da reação formam a microestrutura, refinando ou preenchendo os poros, gerando um produto endurecido com propriedades favoráveis para variadas aplicações (PROVIS; VAN DEVENTER, 2019).

Os materiais álcali-ativados podem ser classificados de acordo com o teor de cálcio presente no sistema, que influencia diretamente na definição do conjunto de fases que formam o material endurecido. Desse modo, os materiais álcali-ativados podem ser classificados em dois grupos: sistemas de baixo teor de cálcio e sistemas de alto teor de cálcio (PROVIS; VAN DEVENTER, 2019). Todavia, Pacheco-Torgal *et al.* (2014), consideram ainda um terceiro grupo, o sistema intermediário de cálcio, uma vez que possui características comuns aos outros dois grupos anteriormente citados.

O sistema com baixo teor de cálcio possui precursores que são constituídos, majoritariamente, por alumínio e silício. Esses precursores ao serem misturados com o ativador alcalino, hidróxidos e silicatos de alta alcalinidade, tem o material amorfo dissolvido e, em seguida, formam redes tridimensionais de aluminossilicatos (LONGHI, 2015). O produto principal da reação é um gel N-A-S-H, denominado aluminossilicato de sódio hidratado (WAN; YUAN; ZHANG, 2020). Davidovits (1994) define este gel formado como geopolímero.

Não há, segundo Yun-Ming *et al.* (2016), uma compreensão clara acerca do mecanismo geral para álcali-ativação de materiais com baixo teor de cálcio, todavia, o modelo proposto por Glukhovsky em 1950 é bem aceito pelos pesquisadores e com os avanços nas pesquisas dessa temática, Duxsom (2006) aperfeiçoou e adaptou o processo da reação de geopolimerização e o dividiu em cinco etapas, sendo elas: dissolução, equilíbrio das partículas, início da formação do gel, reorganização, e por fim, polimerização e enrijecimento.

A cinza volante é considerada um precursor de baixo teor de cálcio, adequando-se como um excelente material para a produção de materiais álcali-ativados, e por ser um resíduo apresenta vantagens ecológicas, visto que milhares de toneladas de cinza volante são produzidas anualmente e representam um problema ambiental e de saúde pública (AZEVEDO *et al.*, 2017). As cinzas volantes são originadas a partir do processo da combustão do carvão mineral pulverizado ou granulado para a produção de energia nas instalações de usinas termoeletricas ou caldeiras industriais. Todavia, a contrariedade na utilização desse resíduo acontece pela

variação das características químicas das cinzas, pois dependendo da origem, uma vez que cada usina apresenta suas particularidades, acarreta problemas no controle de parametrização e qualidade do produto final, portanto, torna-se imprescindível a caracterização das mesmas para avaliar a eficácia nas misturas de materiais álcali-ativados (WIJAYA; EKAPUTRI; TRIWULAN, 2017).

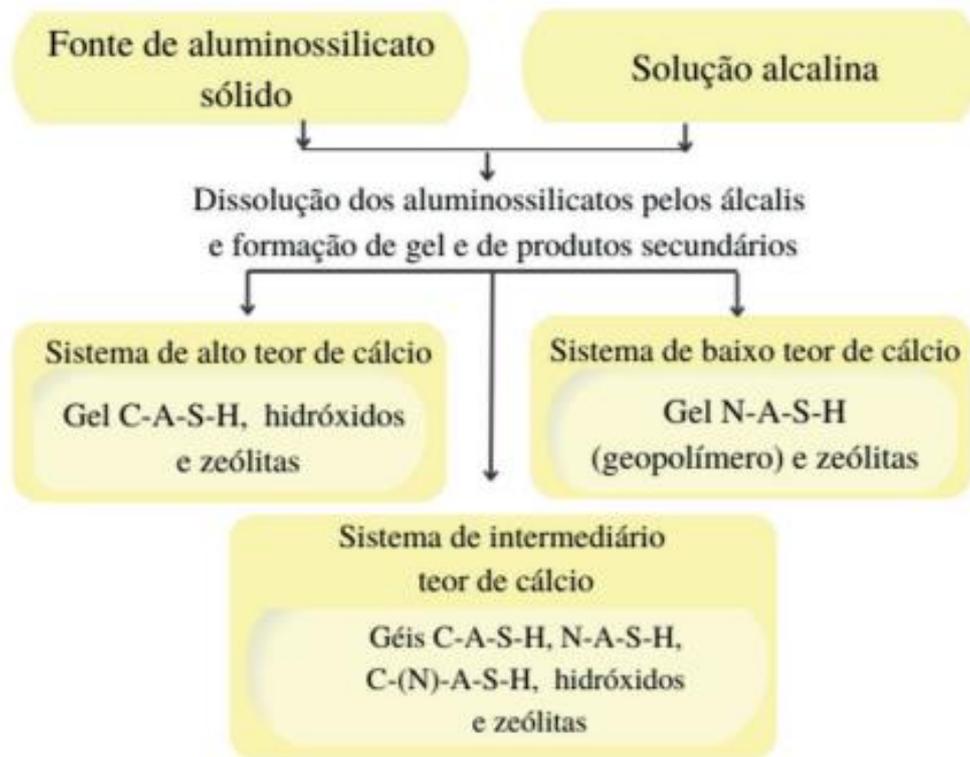
O sistema com alto teor de cálcio possui precursores formados, em sua maioria, por óxido de cálcio e silício. Os precursores desse sistema são ativados em condições alcalinas mais moderadas do que os materiais geopoliméricos, (PROVIS, 2014), permitindo, assim, o uso de outras soluções ativadoras além de hidróxidos de sódio e potássio e silicatos. O principal produto da reação desse sistema é um gel C-A-S-H, definido como aluminossilicato de cálcio hidratado, similar a estrutura do gel resultante da hidratação do cimento Portland, C-S-H, denominado silicato de cálcio hidratado (PROVIS, 2014; BERNAL *et al.*, 2014).

Precursores com alto teor de cálcio apresentam em sua composição teores de cálcio acima de 35%, como é o caso da escória de alto forno. Esta escória tem o desenvolvimento da microestrutura em decorrência de um processo de reação altamente heterogêneo, que é governado por quatro mecanismos, sendo eles: dissolução das partículas, nucleação e crescimento das fases sólidas iniciais, interações e ligação mecânica nos componentes e, por último, formação dos produtos das reações em tempos de cura avançados (PROVIS, VAN DEVENTER, 2019).

A escória de alto forno é um dos precursores mais estudados do sistema de alto teor de cálcio, no entanto, as escórias de aciaria apresentam um evidente potencial para novas aplicações em materiais álcali-ativados. A escória de aciaria é, em suma, um composto formado por impurezas presentes no minério de ferro, principalmente fósforo, enxofre e silício que impregnam o ferro gusa, matéria prima para a fabricação do aço (ARRIVABENE, 2012), sendo a escória *Basic Oxygen Furnace* (BOF) apresentada como potencial precursor, além de despertar interesse em pesquisas recentes (NAIDU; SHERIDAN; VAN DYK, 2020).

O sistema de teor intermediário de cálcio é decorrente da combinação de precursores de baixo e alto teor de cálcio. Nesse sistema coexistem os géis N-A-S-H e C-A-S-H (COSTA, 2022), além da formação de géis híbridos C-(N)-A-S-H (ISMAIL *et al.*, 2014). De maneira resumida, os três sistemas são apresentados na Figura 1.

Figura 1 - Géis e produtos formados durante o processo de álcali-ativação



Fonte: Costa (2022).

Nos materiais álcali-ativados, independente de qual sistema o precursor é classificado, o ativador é um elemento indispensável para o desenvolvimento das reações de ativação alcalina de materiais aluminossilicatos. A solução ativadora está intrinsecamente ligada ao desempenho mecânico do material álcali-ativado, por isso, a escolha do ativador depende da natureza da aplicação do material. Soluções à base de sódio proporcionam maior resistência mecânica e soluções à base de potássio oferecem uma maior resistência às temperaturas elevadas (DE AZEVEDO; DIAS; SOARES, 2019). Ademais, de acordo com Provis (2014), a concentração molar do ativador deve variar em conformidade com o precursor que será utilizado. Se o precursor pertencer ao grupo de baixo teor de cálcio, é adequado utilizar concentrações mais altas, entre 10 e 14 molares. Quando o precursor fizer parte do grupo de alto teor de cálcio, é indicado utilizar concentrações mais baixas, entre 6 e 8 molares.

2.2 Condições de cura

As condições de cura são um fator importante para o desenvolvimento da microestrutura, e por conseguinte, da resistência mecânica de materiais álcali-ativados, cujos melhores resultados, em menores intervalos de tempo, podem ser obtidos quando combinados fatores como temperatura e umidade, que favoreçam o endurecimento da matriz (CRIADO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2010).

Os precursores de baixo teor de cálcio, em sua maioria, necessitam de calor para acelerar os processos da reação de geopolimerização. Alguns trabalhos publicados apresentaram melhorias significativas nas propriedades mecânicas de amostras de geopolímeros que foram curados em temperaturas elevadas (DEEVASAN; RANGANATH, 2010, CHINDAPRASIRT *et al.*, 2010).

Suwan, Fan e Braimah (2016) estudaram o efeito do cimento Portland combinado com pastas geopoliméricas produzidas a partir de cinzas volantes de baixo teor de cálcio provenientes da Central Elétrica Drax, North Yorkshire, Reino Unido, no desenvolvimento da resistência mecânica sob condições de cura variando a temperatura de 10°C a 70°C. O pesquisador, ao final do estudo, concluiu que os materiais combinados obtiveram melhores resultados de resistência do que apenas o cimento convencional quando expostos as mesmas temperaturas e que a cura ótima para os materiais estudados ocorreu em temperaturas entre 30 e 40°C.

Em pesquisas envolvendo geopolímero à base de metacaulim foi observado que a temperatura de cura até 60°C resultava no estímulo do processo de endurecimento e melhoria nas propriedades físicas das amostras de geopolímeros, todavia, a cura em temperaturas muito altas, entre 80°C e 100°C, resultava em efeitos negativos nas propriedades das amostras (BING-HUI *et al.*, 2014).

Em precursores de alto teor de cálcio, como as escórias de alto forno, a utilização da cura térmica aumenta o ganho de resistência mecânica nas idades iniciais (GÓMEZ-CASERO *et al.*, 2021). Contudo, para esse sistema também é necessário considerar os limites ideais de temperatura com intuito de não comprometer a resistência à compressão. Altan e Erdogýan (2011), em seu estudo sobre ativação alcalina de uma escória, concluíram que a cura térmica apresentava efeito benéfico na resistência e a temperatura limite de cura para qual a resistência atingiu seu melhor resultado foi em cerca de 80°C.

Chindaprasirt *et al.* (2010) estudaram propriedades de uma argamassa álcali-ativada produzida com cinzas volantes de alto teor de cálcio em três diferentes finuras provenientes da

Usina Elétrica de Mae Moh, Tailândia. Os resultados da pesquisa sugeriram que as propriedades do material desenvolvido poderiam ser melhoradas quando submetidos aos parâmetros ideais de cura. Para uma das finuras de cinza utilizada na pesquisa, o parâmetro ideal foi de 1 hora de tempo de retardo seguido por cura térmica a 75°C durante o período de três dias. Além disso, foi observado que a argamassa continuou a ganhar resistência mecânica em condições normais atmosféricas após o período inicial de cura térmica.

As condições de cura podem ser realizadas em ambiente seco, úmido ou imerso em água. Em ambiente seco, independente da temperatura, com as amostras totalmente expostas à atmosfera ocorre a evaporação de água que ocasiona a redução da solução alcalina e aumenta a precipitação de sais nos poros (IZQUIERDO *et al.*, 2010). Essa perda de água pode ser evitada se as amostras forem isoladas do contato com o ar atmosférico, mantendo a água disponível durante o endurecimento da matriz (CRIADO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2010). A cura imersa em água, todavia, não é aconselhada para materiais álcali-ativados de baixo teor de cálcio, uma vez que pode dissolver o ativador da reação e reduzir o desenvolvimento de resistência do material (PROVIS, 2018).

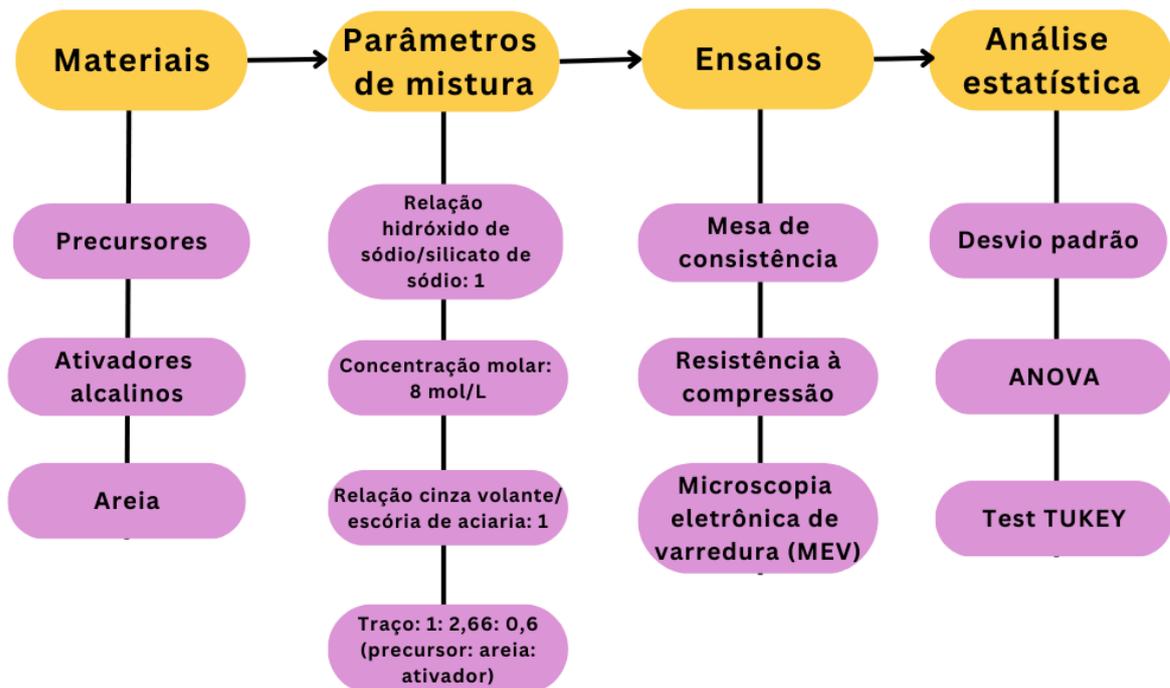
Por fim, as temperaturas utilizadas nas condições de cura de materiais álcali-ativados não ultrapassam 100°C (RAI; ROY; RAJJAK, 2018) e a escolha da temperatura empregada é realizada avaliando a natureza do precursor e do ativador. No cenário da engenharia, no entanto, utilizar altas temperaturas para a cura dos materiais é limitada, sendo possível apenas para componentes pré-moldados e peças em pequena escala.

De modo geral, nota-se que as condições de cura alteram os resultados obtidos nos materiais álcali-ativados, a depender do tipo de precursor e de ativador utilizado. A maioria dos estudos tratam da variação da temperatura em matrizes compostas por um tipo de precursor, ou de baixo ou de alto teor de cálcio. Portanto, é necessário realizar estudos para avaliar o efeito das condições de cura em matrizes binárias, compostas por precursores de alto e baixo teor de cálcio.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo corresponde a uma pesquisa explicativa, qualitativa e experimental, cujas etapas metodológicas estão exibidas na Figura 2.

Figura 2 - Procedimento metodológico



Fonte: Autor (2022).

Os procedimentos experimentais foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil do Centro de Tecnologia (LMCC) localizados na Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici. O fluxograma da Figura 2 apresenta de forma resumida o curso das atividades realizadas, sendo elas: fabricação da solução, preparação das argamassas alcali-ativadas e ensaios no estado fresco e no estado endurecido.

3.1 Materiais

Para formular as argamassas álcali-ativadas, os materiais utilizados foram: cinza volante classe F, escória de aciaria *Basic Oxygen Furnace (BOF)*, hidróxido de sódio – NaOH e silicato de sódio – Na₂SiO₃, água e areia.

3.1.1 Precursores

A cinza volante e a escória de aciaria BOF, precursores utilizados na pesquisa, foram fornecidas pela Usina Termelétrica Energia Pecém e pela Companhia Siderúrgica do Pecém, respectivamente, localizadas no complexo industrial e portuário do Pecém, situado no município de São Gonçalo do Amarante – Ceará.

A massa específica obtida pelo método da ABNT 16605 (2017) foi de 2,34 g/cm³ para a cinza volante e 3,13 g/cm³ para a escória de aciaria BOF (ARAÚJO *et al.*, 2022).

A superfície específica foi encontrada de modo comparativo com uma amostra de cimento de referência pelo método Blaine - ABNT NBR 16372 (2015) e resultou em 4790 cm²/g para cinza volante e 3360 cm²/g para a escória de aciaria. Por fim, para a composição química foi feita uma análise de fluorescência de raio-X (FRX) no equipamento Rigaku ZSX Mini II para ambos os precursores, apresentando os resultados expostos na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química dos precursores

Classificação da amostra:	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	ZnO	SrO
Cinza volante (% massa)	11,14	42,20	0,53	1,08	0,06	3,97	10,30	2,74	0,27	26,98	0,15	0,67
Escória de aciaria BOF (% massa)	1,94	5,64	0,84	0,83	0,04	0,14	53,11	-	2,97	34,40	0,06	-

Fonte: Araújo (2022); Targino *et al.* (2022).

3.1.2 Ativadores

Os ativadores utilizados foram o hidróxido de sódio e o silicato de sódio, ambos comercializados pela Gota Química. O hidróxido de sódio estava no estado sólido, em forma de escamas, apresentando uma pureza de 97,9%. A solução foi preparada com concentração molar de 8mols/litro. A caracterização está detalhada na Tabela 2.

Tabela 2 - Caracterização do hidróxido de sódio

Parâmetros	8 mols/litro
Sólidos totais – NaOH (%)	25,24
H ₂ O (%)	74,75
Relação H ₂ O/NaOH	2,96

Fonte: Autor (2022).

A solução de hidróxido de sódio foi preparada com antecedência com intuito de otimizar tempo na preparação das argamassas. A fabricação da solução constitui na dissolução de hidróxido de sódio – NaOH em água destilada.

O silicato de sódio foi adquirido já como solução e sua caracterização está representada na Tabela 3.

Tabela 3 - Caracterização do silicato de sódio

Parâmetros	8 mols/litro
Na ₂ O (%)	14,38
SiO ₂ (%)	31,83
Sólidos totais (%)	46,21
Relação SiO ₂ / Na ₂ O	2,21
Massa específica (g/cm ³)	1,58

Fonte: Araújo (2022); Targino *et al.* (2022).

3.1.3 Água

A água utilizada para a preparação da solução de hidróxido de sódio foi coletada da rede de água pública e passou pelo processo de destilação no laboratório de Saneamento LABOSAN do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará.

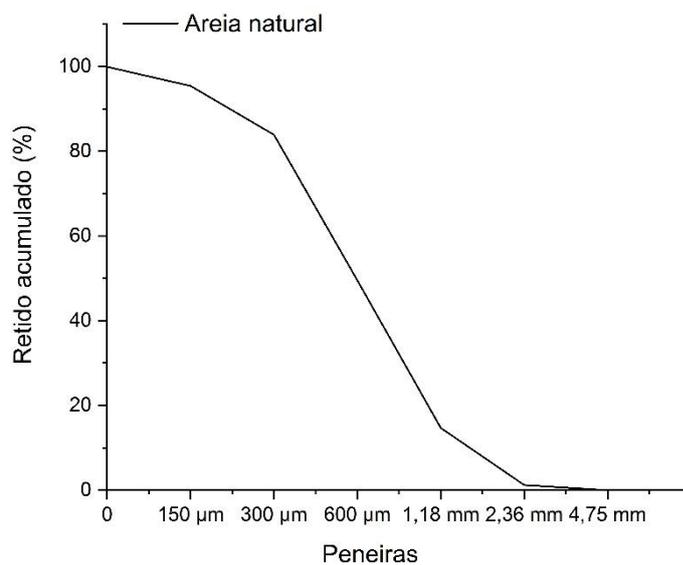
3.1.4 Areia

A areia utilizada, proveniente de leito de rios, foi caracterizada por Melo (2022) por meio da determinação da massa unitária, massa específica, teor de material pulverulento e análise granulométrica.

Para o cálculo da massa unitária foi utilizada como referência a norma ABNT NBR 16972 (2021), apresentando um valor de $1,56 \text{ g/cm}^3$. A massa específica foi calculada de acordo com as normas DNER – ME 194 (1998) e ABNT NBR 16916 (2021) e apontou um resultado de $2,63 \text{ g/cm}^3$. Para o teor de material pulverulento foi utilizada a norma ABNT NBR 16973 (2021), exibindo um resultado de 2,94%.

A análise granulométrica foi realizada em conformidade com as normas ABNT NBR 17054 (2022) e na Figura 3 está representada a curva granulométrica da areia.

Figura 3 - Curva granulométrica da areia



Fonte: Autor (2022).

Por fim, a areia apresentou módulo de finura de 2,44 e máxima dimensão característica de 2,36.

3.2 Metodologia de pesquisa

3.2.1 Preparação das argamassas

Para essa pesquisa, o traço adotado foi de 1:2,66:0,6 (precursor: areia: ativador), sendo a proporção dos precursores cinza volante e escória de aciaria BOF 1:1 e a proporção dos ativadores hidróxido de sódio e silicato de sódio também de 1:1. O mesmo traço foi utilizado para a preparação de todas as argamassas, variando apenas as condições de cura.

A mistura dos componentes foi realizada com a colocação da cinza volante e a escória de aciaria BOF na cuba da argamassadeira juntamente com os ativadores e fez-se uma pré-homogeneização dos precursores e ativadores com o auxílio de uma espátula.

Posteriormente, foi adicionado a areia e acionou-se a argamassadeira planetária em baixa rotação (62 ± 5 rpm) por 1 minuto e 30 segundos. Passado esse período, com uma espátula foi feita a mistura manual com a finalidade retirar possível material que tenha sido retido nas paredes e no fundo do recipiente e garantir a completa mistura dos precursores com os ativadores e a areia. Por fim, a argamassadeira planetária foi acionada novamente em baixa rotação por 1 minuto e 30 segundos.

A caracterização da argamassa foi executada pelo ensaio de mesa de consistência em conformidade com a norma ABNT NBR 13276 (2016). Na Figura 4 está a sequência de imagens da execução do ensaio.

Figura 4 - Ensaio mesa de consistência



Fonte: Autor (2022).

Para cada produção da argamassa foram realizadas três medições em diferentes direções com um paquímetro e obteve-se um resultado médio de 199,3 mm de espalhamento.

3.2.2 Ensaio

3.2.2.2.1 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 13279 (2005). As argamassas foram moldadas em fôrmas cúbicas de 4 cm de aresta, comportando três corpos de prova. A fôrma foi fabricada em acrílico com paredes lisas e sem saliências, como ilustrado na Figura 5. A ruptura dos corpos de prova está representada na Figura 6.

Figura 5 - Fôrma em acrílico com a argamassa moldada



Fonte: Autor (2022).

Figura 6 - Ensaio de resistência à compressão



Fonte: Autor (2022).

As argamassas foram expostas a diferentes condições de cura e foram realizadas as rupturas das amostras com 1, 28, 63 e 91 dias. Em seguida ao procedimento de produção dos corpos de prova, os mesmos foram desmoldados, catalogados e armazenados conforme suas condições de cura. No Quadro 1 estão detalhadas as condições de cura adotadas nessa pesquisa.

Quadro 1 - Especificações das condições de cura

Condição de cura	Especificação
Condição 1 – C1	Cura em temperatura ambiente com corpo de prova totalmente lacrado.
Condição 2 – C2	Cura ambiente com corpo de prova totalmente exposto.
Condição 3 – C3	24 horas de cura em temperatura ambiente com corpo de prova totalmente exposto e em seguida submerso em água até as datas de rupturas.
Condição 4 – C4	24 horas de cura térmica em temperatura de 50°C com corpo de prova totalmente lacrado.
Condição 5 – C5	24 horas de cura térmica em temperatura de 50° C com corpo de prova totalmente exposto.
Condição 6 – C6	24 horas de cura térmica em temperatura de 50°C com corpo de prova totalmente exposto e em seguida submerso em água até as datas de rupturas.

Fonte: Autor (2022).

3.2.2.1 Análise microestrutural

Para análise da microestrutura foram selecionadas amostras de três condições de cura. Desse modo, optou-se pela condição 2, condição 4, e por fim, condição 6. Além do tipo de cura, para a seleção também foi considerado o resultado de resistência à compressão, ou seja, resultados divergentes entre as amostras.

Foi realizada Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) na Central Analítica da UFC, utilizou-se o microscópio Quanta 450-FEG – FEI no modo SE (imagem de superfície) nas ampliações de 2.500X e 10.000X.

3.2.2.2 Análise estatística dos dados

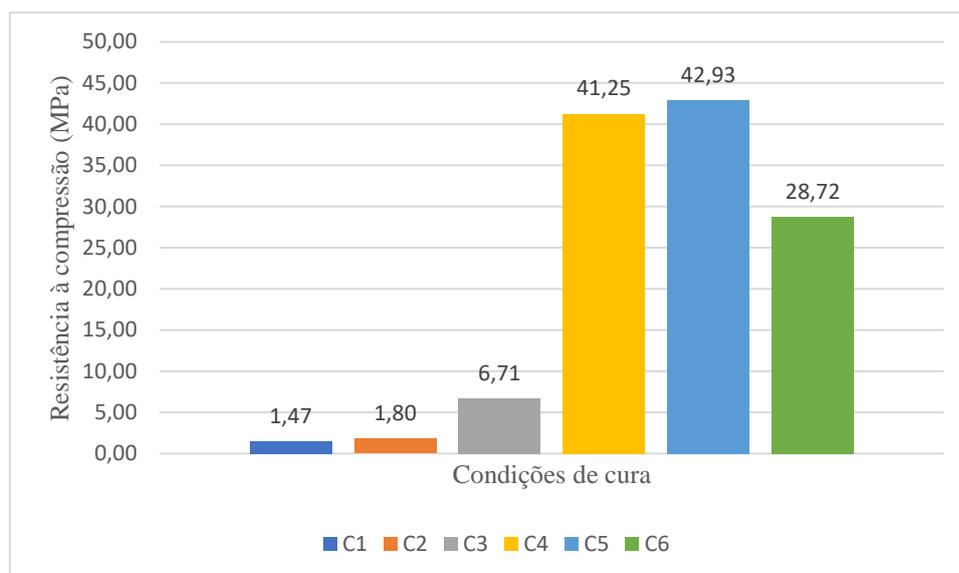
Com a finalidade de atestar a eficiência e confiabilidade dos resultados, foram realizados o cálculo de análise de variância – ANOVA e o teste de múltiplas médias – Tukey no software Statistica 7.0, aplicados nos resultados resistência à compressão realizados nas idades ensaiadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resistência à compressão

A influência das condições de cura na resistência à compressão na idade de 1 dia é apresentada na Figura 6.

Figura 7 – Gráfico da resistência à compressão 1 dia



Fonte: Autor (2022).

A Figura 7 apresenta a média dos resultados de resistência à compressão de todas as condições de cura na idade de 1 dia. O maior resultado foi identificado na argamassa submetida a condição de cura 5 - C5 (24 horas de cura térmica em temperatura de 50° C com corpo de prova totalmente exposto), com valor médio de 42,93 MPa e o menor resultado foi o da argamassa exposta à condição de cura 1 – C1 (cura em temperatura ambiente com corpo de prova totalmente lacrado), com 1,47 MPa.

Nas primeiras idades, nota-se que a temperatura de cura foi o fator predominante para o endurecimento e ganho de resistência nas argamassas. Conforme os dados da Figura 7, o contato com ar atmosférico promove uma sutil diferença nas argamassas C1 e a C2, em temperatura ambiente. O mesmo efeito pode ser visualizado em C4 e C5, ambos com temperatura inicial de 50°C.

As argamassas nas condições C3 e C6, temperatura ambiente e cura térmica, respectivamente, nas primeiras 24 horas, foram em seguida submersas em água por mais 24 horas, antes da ruptura, portanto, foram rompidas com 48 horas após a moldagem e 24 horas

após a cura submersa. Desse modo, os resultados mostram-se divergentes quanto ao efeito da cura submersa, visto que quando mantido em temperatura ambiente e exposto nas primeiras 24 horas, a cura submersa promoveu um acréscimo de resistência em relação as demais amostras em temperatura ambiente (C1 e C2). No entanto, também deve-se considerar o tempo, uma vez que C3 foi rompida 24 após C1 e C2. Quanto a amostra C6, a cura submersa promoveu uma diminuição na resistência, quando comparada a C4 e C5, também com cura inicial de 50°C.

Na Tabela abaixo é apresentado a análise de variância – ANOVA que constatou a existência de variação significativa entre todas as condições de cura na idade de 1 dia e, complementarmente, o teste Tukey, com as análises exibidas a seguir.

Tabela 4 - Análise estatística de resistência à compressão na idade de 1 dia

Especificação	ANOVA - Significância da variação das condições de cura	Tukey - Grupos homogêneos
C1 – 1 dia	Significativo	C1, C2, C3 # C4, C5, C6 C4, C5#C6 C1=C2=C3 C4=C5
C2 – 1 dia		
C3 – 1 dia		
C4 – 1 dia		
C5 – 1 dia		
C6 – 1 dia		

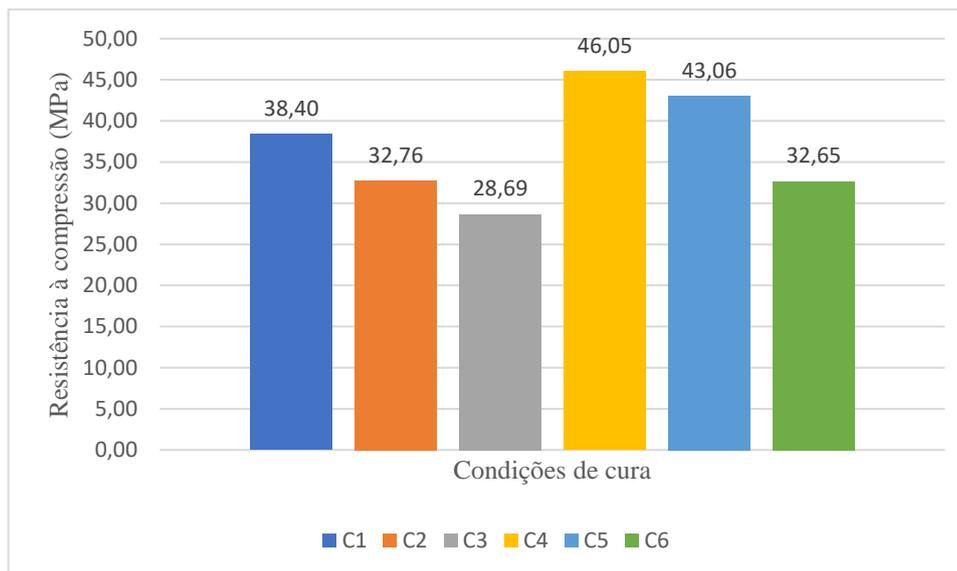
Fonte: Autor (2022).

Os resultados da análise do teste Tukey apresentado na Tabela 4, para a idade de 1 dia, exhibe que a condição de cura C6 promove diferenças significativas de todas as demais condições, enquanto, as condições C1, C2 e C3 apresentam diferenças não significativas entre si, assim como C4 e C5 que também mostram diferenças não significativas entre si.

Desse modo, pode-se inferir que a cura térmica é o principal fator para controle da resistência nas primeiras idades, isso era esperado, conforme relatado na literatura (GÓMEZ-CASERO *et al.*, 2021). Por outro lado, o efeito da exposição ao ar atmosférico, mesmo sendo observado nas amostras C1 e C2, estatisticamente não foi considerado relevante. A cura submersa não produz efeito significativo quando a argamassa foi curada em temperatura ambiente. Contudo, foi estatisticamente relevante para as argamassas com cura térmica inicial.

Na Figura 8 é apresentada a influência das condições de cura na resistência à compressão na idade de 28 dias.

Figura 8 - Gráfico resistência à compressão 28 dias



Fonte: Autor (2022).

Na Figura 8 é observado que o maior resultado foi o da argamassa submetida a condição de cura 4 – C4 (24 horas de cura térmica em temperatura de 50°C com corpo de prova totalmente lacrado), com valor médio de 46,05 MPa e o menor resultado foi o da argamassa exposta a condição de cura 3 - C3 (24 horas de cura em temperatura ambiente com corpo de prova totalmente exposto e em seguida submerso em água), com 28,69 MPa.

Na idade de 28 dias é possível constatar que houve o aumento de resistência nas amostras submetidas a todas as condições de cura quando comparada a idade anterior. Comportamento semelhante é visto em outras pesquisas que tratam do aumento da resistência ao longo do tempo e que estão presentes na literatura (ZHANG *et al.*, 2018). Contudo, vale destacar que o ganho de resistência em percentual foi superior para as argamassas com cura inicial em temperatura ambiente: C1 e C2, que proporcionaram um crescimento de 26 vezes e de 18 vezes, respectivamente, enquanto C4 e C5 influenciaram um aumento percentual de 11,63% e 0,30% com relação a idade anterior.

Abaixo é apresentado na Tabela seguinte a análise de variância – ANOVA que constatou também a existência de variação significativa entre todas as condições de cura na idade de 28 dias e, adicionalmente, o teste Tukey, com as análises exibidas a seguir.

Tabela 5 - Análise estatística de resistência à compressão na idade de 28 dias

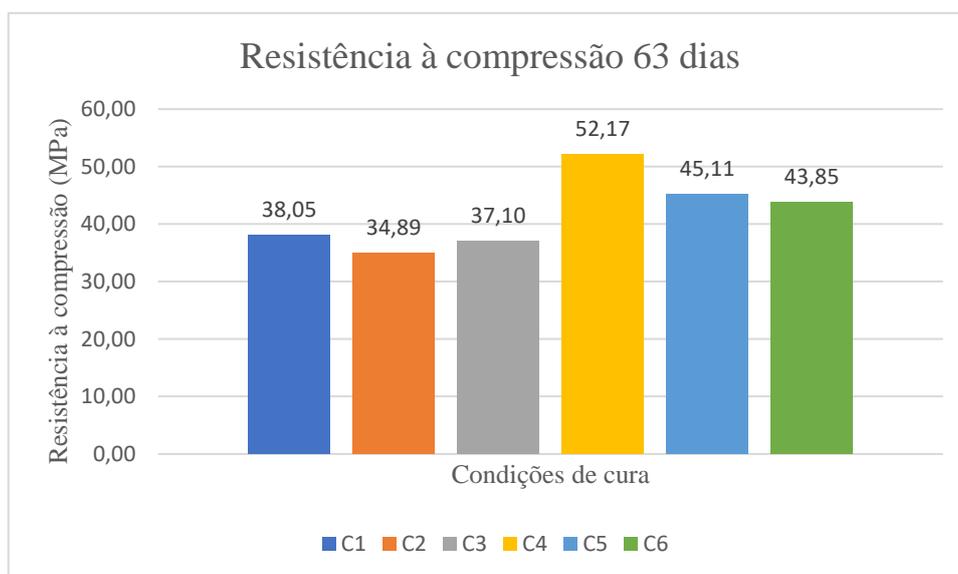
Especificação	ANOVA - Significância da variação das condições de cura	Tukey - Grupos homogêneos
C1 – 28 dias	Significativo	C1 # C3 C2#C4, C5 C3# C1, C4, C5 C4, C5# C2, C3, C6 C6#C4, C5
C2 – 28 dias		
C3 – 28 dias		
C4 – 28 dias		
C5 – 28 dias		
C6 – 28 dias		

Fonte: Autor (2022).

De acordo com a análise do teste Tukey apresentado na Tabela 5, a condição de cura C6 mostrou-se com diferenças não significativas de C1, C2 e C3 aos 28 dias, significando que o ganho de resistência na argamassa com cura térmica inicial, mas com cura submersa não tem efeito frente as argamassas com cura inicial em temperatura ambiente. As condições de cura C1, C4 e C5 também não apresentaram diferenças significativas entre si, evidenciando que as argamassas com cura térmica inicial não exibiram diferenças significativas à argamassa com cura em temperatura ambiente e sem contato com ar atmosférico. Portanto, aos 28 dias a argamassa C1 apresenta um bom resultado, principalmente, quando se considera a economia de energia, por não utilizar cura térmica.

Na Figura 9 é apresentado a influência das condições de cura na resistência à compressão na idade de 63 dias.

Figura 9 - Gráfico resistência à compressão 63 dias



Fonte: Autor (2022).

Para a resistência à compressão visto na Figura 9, o maior resultado observado foi também o da argamassa submetida a condição de cura 4 – C4 (24 horas de cura térmica em temperatura de 50°C com corpo de prova totalmente lacrado), com valor médio de 52,17 MPa e o menor resultado foi o da argamassa exposta a condição de cura 2 – C2 (cura ambiente com corpo de prova totalmente exposto), com 34,89 MPa.

De modo similar a idade de 28 dias, na idade de 63 dias, o comportamento das amostras submetidas às condições de cura foi semelhante, indicando aumento dos valores da resistência em comparação a idades anteriores, com exceção de C1 que apresentou uma redução de 0,91% quando comparada ao valor da resistência na idade de 28 dias, o que pode ser interpretada como resultado de alguma variação na dinâmica do ensaio.

É apresentado na Tabela abaixo a análise de variância – ANOVA que constatou também a existência de variação significativa entre todas as condições de cura na idade de 63 dias e, adicionalmente, o teste Tukey, com as análises exibidas a seguir.

Tabela 6 - Análise estatística de resistência à compressão na idade de 63 dias

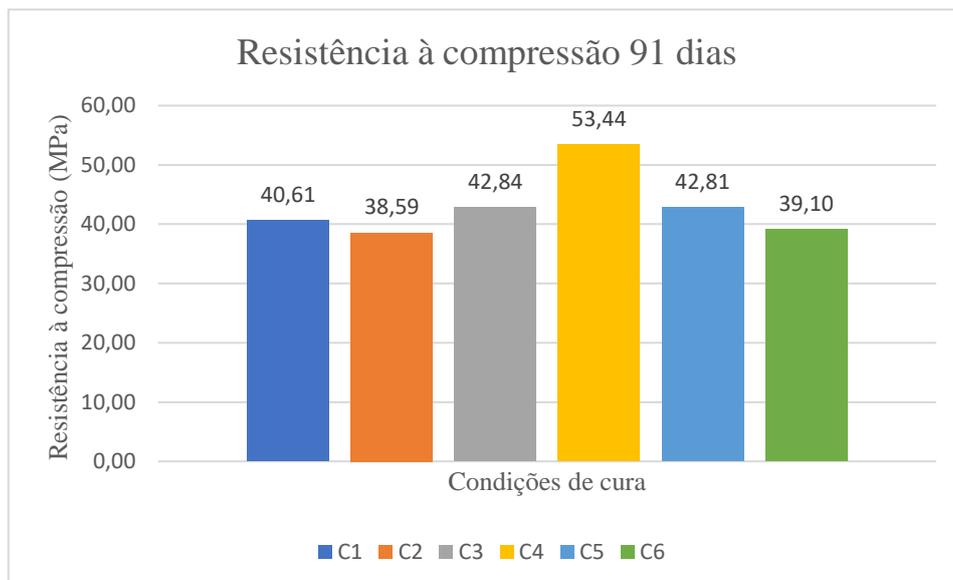
Especificação	ANOVA - Significância da variação das condições de cura	Tukey - Grupos homogêneos
C1 – 63 dias	Significativo	C1 = C2, C3, C5, C6 C2 = C1, C3 C3 = C2, C5 C4 # C1, C2, C3, C5, C6 C5 = C1, C3, C6 C6 = C1, C5
C2 – 63 dias		
C3 – 63 dias		
C4 – 63 dias		
C5 – 63 dias		
C6 – 63 dias		

Fonte: Autor (2022).

A análise dos resultados do teste Tukey apresentado na Tabela 6, para a idade de 63 dias, indica que a condição de cura C4 promove resultados com diferenças significativas para todas as demais condições, enquanto C1 apresentou diferenças não significativas em relação a todos, exceto C4. Isso reflete o baixo ganho de resistência da argamassa C1 entre 28 e 63 dias. Por outro lado, a argamassa C4 apresentou o maior ganho de resistência nesse intervalo.

Na Figura 10 é apresentado a influência das condições de cura na resistência à compressão na idade de 91 dias.

Figura 10 - Gráfico resistência à compressão 91 dias



Fonte: Autor (2022).

No gráfico da Figura 10, o maior resultado observado foi também semelhante aos vistos nas idades de 28 e 63 dias, o da argamassa submetida a condição de cura 4 – C4 (24 horas de cura térmica em temperatura de 50°C com corpo de prova totalmente lacrado), com valor médio de 53,44 MPa e o menor resultado, assim como na idade de 63 dias, foi o da argamassa exposta a condição de cura 2 – C2 (cura ambiente com corpo de prova totalmente exposto), com 42,81 MPa.

Na idade de 91 dias, C1, C2, C3 e C4 proporcionaram um sutil o ganho de resistência nas amostras em relação as idades anteriores, destacando-se C3 que apresentou o maior percentual de aumento de resistência, 13,40%. Todavia, para C5 e C6 é observado uma redução maior que 5% nos valores de resistência das argamassas.

De maneira geral, é possível verificar que C4 e C5 obtiveram as maiores resistências à compressão, sendo C5 responsável pela maior resistência na idade de 1 dia, enquanto a C4 proporcionou as maiores resistências à compressão nas idades 28, 63 e 91. Logo, como esperado, é observado que a elevação da temperatura de cura acelera as reações químicas, melhorando as propriedades mecânicas (BING-HUI et al., 2014). Para as idades de 28 e 63 dias, C4 possibilitou ganhos de resistência superior a 11,60% em relação as idades anteriores, enquanto C5 não assegurou ganhos além de 4,76%. Por fim, na idade de 91 dias, C4 promoveu ainda um crescimento da resistência de 2,43% em relação a idade de 63 dias.

Na Tabela abaixo é apresentado a análise de variância – ANOVA que constatou a existência de variação significativa entre todas as condições de cura na idade de 91 dias e, complementarmente, o teste Tukey, com as análises exibidas a seguir.

Tabela 7 - Análise estatística de resistência à compressão na idade de 91 dias

Especificação	ANOVA - Significância da variação das condições de cura	Tukey - Grupos homogêneos
C1 – 91 dias	Significativo	C1 = C2 C3 = C5 C1, C2 = C3, C5, C6 C3, C5 = C1, C2, C6 C4 # C1, C2, C3, C5, C6
C2 – 91 dias		
C3 – 91 dias		
C4 – 91 dias		
C5 – 91 dias		
C6 – 91 dias		

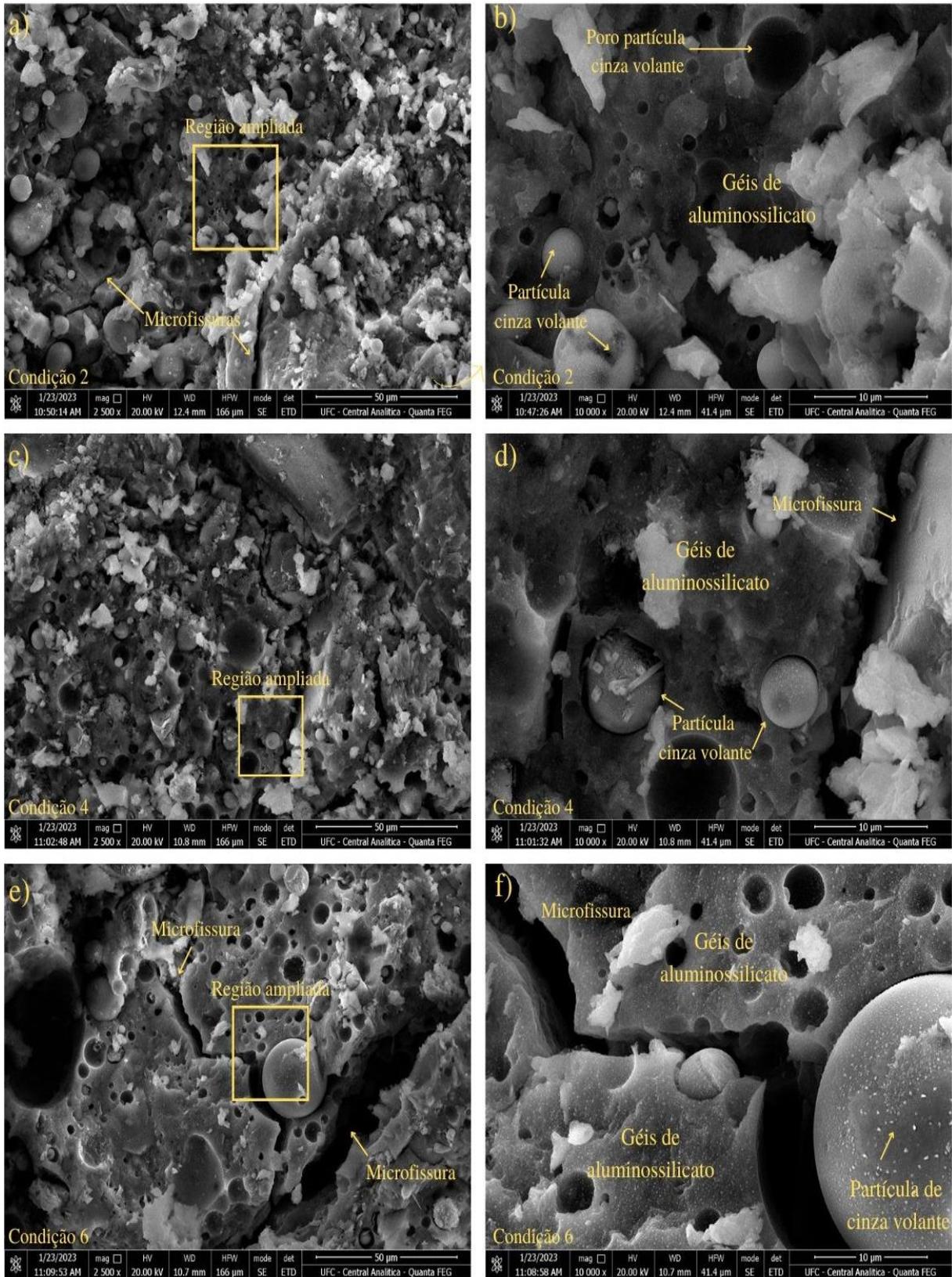
Fonte: Autor (2022).

A análise do teste Tukey apresentado na Tabela 7, para a idade de 91 dia, expõe que a condição de cura C4 promove diferenças significativas para todas as demais condições, enquanto C1 e C2 apresentam diferenças não significativas entre si e C3 e C5 também exibem diferenças não significativas entre si.

4.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Na Figura a seguir são apresentadas as imagens obtidas no ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) de três amostras de argamassas submetidas a condição de cura 2 – C2 (cura ambiente com corpo de prova totalmente exposto), condição de cura 4 – C4 (24 horas de cura térmica em temperatura de 50°C com corpo de prova totalmente lacrado) e condição de cura 6 – C6 (24 horas de cura térmica em temperatura de 50°C com corpo de prova totalmente exposto e em seguida submerso em água).

Figura 11 - Imagens do ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV)



Fonte: Autor (2023).

A região destacada por um quadro nas Figuras 11a, 11c e 11e são as áreas ampliadas nas Figuras 11b, 11d e 11f, respectivamente.

A visualização da Figura 11 permite observar a presença da formação de géis de aluminossilicato. Esses géis são responsáveis pelas características aglomerantes dos materiais álcali-ativados. Geralmente, são desenvolvidos o gel tipo N-A-S-H para sistemas de baixo teor de cálcio, o gel tipo C-A-S-H para sistema de alto teor de cálcio e o gel tipo C-N-A-S-H, que é proveniente da mistura dos dois sistemas formando um sistema intermediário de teor de cálcio (WAN; YUAN; ZHANG, 2020; PROVIS, 2014; ISMAIL *et al.*, 2014). Como a matriz álcali-ativada utilizada nas argamassas é composta por cinza volante (baixo teor de cálcio) e escória BOF (alto teor de cálcio), possivelmente, os géis supracitados podem coexistir para a formar a microestrutura aglutinante (COSTA, 2022).

Em todas as amostras ensaiadas é constatada a presença de partículas não reagidas, como as esferas de cinza volante, exibida nas Figuras 11b, 11d e 11f. Essas partículas não reagidas ou parcialmente reagidas são comumente encontradas em matrizes álcali-ativadas (GEBREGZIABIHER; THOMAS; PEETHAMPARAN, 2016; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO; CRIADO, 2005). Ademais, nota-se a presença de microfissuras na microestrutura da matriz cimentícia.

A condição de cura 2 – C2 influenciou nas amostras o aparecimento de microfissuras menos espessas em menor quantidade, como pode ser observado na Figura 11a, além de uma matriz mais irregular com partículas de géis em diferentes aspectos, o que sugere que as reações químicas ainda não foram completamente concluídas.

A condição de cura 4 – C4 ocasionou o aumento da extensão e da espessura das microfissuras e apresentou uma matriz de gel aluminossilicato mais homogênea, quando comparado a C2, conforme a Figuras 11d.

A condição de cura 6 – C6, assim como C4, provocou também o aumento da extensão e da espessura das microfissuras nas amostras, sendo C6 responsável por as microfissuras mais espessas e, possivelmente, com maior profundidade, como é possível visualizar na Figura 11f. Além disso, C6 apresentou maior presença de vazios com maiores dimensões, comparado as outras condições ensaiadas, o que justifica seu menor resultado de resistência à compressão frente à C4.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho investigou a influência das diferentes condições de cura em argamassa álcali-ativada produzida com cinza volante e escória de aciaria *Basic Oxygen Furnace* (BOF). Realizou-se estudos do comportamento mecânico e de aspectos microestruturais. Com base nos resultados experimentais, as seguintes conclusões são elencadas:

- A cura térmica em temperatura de 50°C acelerou o processo de endurecimento e o ganho de resistência inicial, além de garantir também maiores resistências em idades avançadas.
- A condição de umidade submersa ocasionou um retardo no ganho de resistência quando comparado as amostras curadas em ambiente seco.
- O isolamento da exposição atmosférica contribui para melhores resultados de resistência, agindo em conjunto com a cura térmica e com a cura em temperatura ambiente.

Em síntese, os resultados desta investigação indicam que as propriedades dos materiais álcali-ativados estudados podem ser maximizadas quando produzidos nos parâmetros de temperatura de 50°C, em ambiente seco e isolado do contato com o ar atmosférico.

REFERÊNCIAS

ALTAN, E., ERDOĞAN, S. T. (2012). Alkali activation of a slag at ambient and elevated temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 34(2), 131–139. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.08.003>

ARAUJO, Lucas Benício Rodrigues. Caracterização de misturas álcali-ativadas à base de cinza volante e escória de aciaria. Dissertação em desenvolvimento (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

ARRIVABENE, F. L. Adição de resíduo da indústria de granito em escória de aciaria BOF visando sua utilização na produção de cimento. 2012. (Tese). Programa de Pós-Graduação em Metalúrgica e Materiais da Universidade de São Paulo, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 12653: Materiais pozolânicos – Requisitos. ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método Blaine). Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16916: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16972: Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16973: Agregados – Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 17054: Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

BAKRIA, A. M.M.A.; KAMARUNDIN, H.; BINHUSSAIN, M.; NIZAR, I.K.; ZARINA, Y.; RAFIZA, A.R. The effect of curing temperature on physical and chemical properties of geopolymers. *Physics Procedia*, v. 22, p. 286–291, 2011.

BERNAL, S. A.; NICOLAS, R.S.; MYERS, R.J.; GUTIÉRREZ, R.M.; PUERTAS, F.; VAN DEVENTER, J.S.J.; PROVIS, J.L. MgO content of slag controls phase evolution and 175 structural changes induced by accelerated carbonation in alkali-activated binders. *Cement and Concrete Research*, v. 57, p. 33–43, 2014.

BING-HUI, Mo; Zhu, H., Cui; X. M.; He, Y.; Gong, S. Y. (2014). Effect of curing temperature on geopolymerization of metakaolin-based geopolymers. *Applied Clay Science*, 99, 144–148. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.06.024>

CHINDAPRASIRT, P.; CHAREERAT, T.; HATANAKA, S.; CAO, T. High-strength geopolymer using fine high-calcium fly ash, *J. Mater. Civ. Eng.* 23 (3) (2010) 264e270.

COSTA, Heloína Nogueira. Cimentos álcali-ativados à base de cinzas do carvão mineral e de escórias siderúrgicas. 2022. (Tese). Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

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. (1994) Properties of geopolymer cements, Alkaline Cements and Concretes, Kiev, Ukraine, p. 131–149.

DE ARAÚJO, G. J. F. O coprocessamento na indústria de cimento: definição, oportunidades e vantagem competitiva. Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades, p. 54-55, 2020.

DE AZEVEDO, G. S.; STRECKER, K.; DE ARAÚJO, A. G.; DA SILVA, C. A. (2017). Produção de geopolímeros à base de cinza volante usando soluções ativadoras com diferentes composições de Na₂O e Na₂SiO₃. Ceramica, 63(366), 143–151. <https://doi.org/10.1590/0366-69132017633662078>

DE AZEVEDO, J. S.; DIAS, D. P.; SOARES, J. C. Efeito da temperatura em resinas geopoliméricas à base de metacaulim ativado por diferentes combinações entre silicatos e hidróxidos. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, p. 1–13, 2019.

DEEVASAN, K.K.; RANGANATH, R.V. Geopolymer concrete using industrial byproducts, Constr. Mater. 164 (CM 1) (2010).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER ME 194/98 – Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1998.

DUXSON, P.; PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; MALLICOAT, S. W.; KRIVEN, W. M.; VAN DEVENTER, J. S. J. (2005). Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 269(1–3), 47–58. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2005.06.060>

DUXSON, P.; PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; VAN DEVENTER, J. S. J. (2007). The role of inorganic polymer technology in the development of “green concrete.” Cement and Concrete Research, 37(12), 1590–1597. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.018>

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PUERTAS, F.; SOBRADOS, I.; SANZ, J. (2005). Structure of calcium silicate hydrates formed in alkaline-activated slag: Influence of the type of alkaline activator. Journal of the American Ceramic Society, 86(8), 1389–1394. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2003.tb03481.x>

FRARE, A.; LUZ, C. A. DA. (2020). Activated alkali cements: Effect of thermal curing on the development of mechanical strength. *Revista Materia*, 25(1). <https://doi.org/10.1590/s1517-707620200001.0872>

GEBREGZIABIHER, B. S.; THOMAS, R. J.; PEETHAMPARAN, S. Temperature and activator effect on early-age reaction kinetics of alkali-activated slag binders. *Construction and Building Materials*, v. 113, p. 783–793, 2016.

GÓMEZ-CASERO, M. A.; PÉREZ-VILLAREJO, L.; CASTRO, E.; ELICHE-QUESADA, D. Effect of steel slag and curing temperature on the improvement in technological properties of biomass bottom ash based alkali-activated materials. *Construction and Building Materials*, v. 302, 2021.

HUSEIEN, G. F.; MIRZA, J.; ISMAIL, M.; HUSSIN, M.W. 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.

ISMAIL, I.; BERNAL, S.A.; PROVIS, J.L.; NICOLAS, R.S.; HAMDAN, S.; VAN DEVENTER, J.S.J. Modification of phase evolution in alkali-activated blast furnace slag by the incorporation of fly ash. *Cement and Concrete Composites*, v. 45, p. 125–135, 2014.

IZQUIERDO, M.; QUEROL, X.; PHILLIPART, C.; ANTENUCCI, D.; TOWLER, M. The role of open and closed curing conditions on the leaching properties of fly ash-slag-based geopolymers. *Journal of Hazardous Materials*, v. 176, n. 1–3, p. 623–628, 2010.

JUENGER, M. C. G., WINNEFELD, F., PROVIS, J. L., & IDEKER, J. H. (2011). Advances in alternative cementitious binders. In *Cement and Concrete Research* (Vol. 41, Issue 12, pp. 1232–1243). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.012>

KOMNITSAS, K; ZAHARAKI, D. (2007). Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry. In *Minerals Engineering* (Vol. 20, Issue 14, pp. 1261–1277). <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.07.011>

LANGARO, E. A. Cimento álcali ativado a partir da valorização da escória de alto forno a carvão vegetal. 2016. 139 f. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

LONGHI, M. A. Álcali-Ativação De Lodo De Caulim Calcinado E Cinza Pesada Com Ativadores Convencionais E Silicato De Sódio Alternativo. 2015. (Dissertação). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

MELO, Levy Teixeira. Caracterização tecnológica de argamassas de revestimento produzidas com arisco tipicamente utilizadas na cidade de Crateús-CE. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Campus de Crateús, Universidade Federal do Ceará, Crateús, 2022. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/69877>.

MOHAJERANI, A.; SUTER, D.; JEFFREY-BAILEY, T.; SONG, T.; ARULRAJAH, A.; HORPIBULSUK, S.; LAW, D. (2019). Recycling waste materials in geopolymer concrete. In *Clean Technologies and Environmental Policy* (Vol. 21, Issue 3, pp. 493–515). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s10098-018-01660-2>

MONTEIRO, P. J. M.; MILLER, S. A.; HORVATH, A. Towards sustainable concrete. *Nature Materials*, v. 16, n. 7, p. 698–699, 2017.

NAIDU, T. S.; SHERIDAN, C. M.; VAN DYK, L. D. Basic oxygen furnace slag: Review of current and potential uses. *Minerals Engineering*, v. 149, p. 106234, 2020.

PACHECO-TORGAL, F.; LABRINCHA, J.; LEONELLI, C.; PALOMO, A. Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes. Woodhead P ed. Cambridge: Elsevier Ltd, 2014.

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

PROVIS, J. L. Geopolymers and other alkali activated materials: Why, how, and what? *Materials and Structures*, v. 47, n. 1–2, p. 11–25, 2014.

PROVIS, J. L.; VAN DAVENTER, J.S.J. Geopolymers and other alkali-activated materials. In: HEWLETT, P.C.; LISKA, M. *Lea's Chemistry of cement and concrete*. 5. ed. Editora: Elsevier, 2019.

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

RAI, B.; ROY, L. B.; RAJJAK, M. A statistical investigation of different parameters influencing compressive strength of fly ash induced geopolymer concrete. *Structural Concrete*, v. 19, n. 5, p. 1268–1279, 2018.

SEVERO, C. G. S.; COSTA, D. L.; BEZERRA, I. M. T.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A. (2013). Características, particularidades e princípios científicos dos materiais ativados alcalinamente. 2, 55–67. www.dema.ufcg.edu.br

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; LYNN, C. J.; DHIR, R. K. (2017). Use of municipal solid waste incineration bottom ashes in alkali-activated materials, ceramics and granular applications: A review. In *Waste Management* (Vol. 68, pp. 207–220). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.06.043>

SNIC - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-do-setor.php>

SUWAN, T.; FAN, M.; BRAIMAH, N. (2016). Micro-mechanisms and compressive strength of Geopolymer-Portland cementitious system under various curing temperatures. *Materials Chemistry and Physics*, 180, 219–225. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2016.05.069>

TARGINO, D. L. L.; ARAUJO, L.B.; PAIVA, A.; COSTA, H.N.; CABRAL, A.E.B. Concretos sustentáveis com aglomerantes geopoliméricos e agregados de escória de aciaria BSSF: caracterização mecânica e análise de impacto ambiental. Trabalho em desenvolvimento (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. Biblioteca Universitária. Guia de normalização de trabalhos acadêmicos da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2013.

WAN, H.; YUAN, L.; ZHANG, Y. Insight Into the Leaching of Sodium Alumino-Silicate Hydrate (N-A-S-H) Gel: A Molecular Dynamics Study. *Frontiers in Materials*, v. 7, p. 1–11, 2020.

WIJAYA, A. L.; EKAPUTRI, J. J.; TRIWULAN. Factors influencing strength and setting time of fly ash based-geopolymer paste. In: *MATEC Web of Conferences*, 138, 2017. Anais [...]. MATEC Web, 2017.

ZHANG, Peng; ZHENG, Yuanxun; WANG, Kejin; ZHANG, Jinping. A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar. *Composites Part B: Engineering*, v. 152, n. June, p. 79–95, 2018.

ANEXOS

ANEXO A - ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) DOS DADOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E TESTE DE MÚLTIPLAS MÉDIAS – TUKEY

Figura A.1 – ANOVA -Resistência à compressão 1 dia

Univariate Tests of Significance for Var2 (Spreadsheet1) Sigma-restricted parameterization Type I decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	7550,157	1	7550,157	901,3731	0,000000
"Var1"	5710,673	5	1142,135	136,3534	0,000000
Error	100,515	12	8,376		

Figura A.2 – ANOVA -Resistência à compressão 28 dias

Univariate Tests of Significance for Resistência 28 d (Spreadsheet1) Sigma-restricted parameterization Type I decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	24554,76	1	24554,76	2525,309	0,000000
Condição de cura	679,47	5	135,89	13,976	0,000119
Error	116,68	12	9,72		

Figura A.3 – ANOVA -Resistência à compressão 63 dias

Univariate Tests of Significance for Resistência 63 dias (Spreadsheet1) Sigma-restricted parameterization Type I decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	31365,94	1	31365,94	4647,716	0,000000
Condição de cura	602,76	5	120,55	17,863	0,000034
Error	80,98	12	6,75		

Figura A.4 – ANOVA -Resistência à compressão 91 dias

Effect	Univariate Tests of Significance for Resistência 91 dias (Spreadsheet1) Sigma-restricted parameterization Type I decomposition				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	33123,09	1	33123,09	2250,675	0,000000
Condução de cura	448,15	5	89,63	6,090	0,004938
Error	176,60	12	14,72		

Figura A.5 – TUKEY -Resistência à compressão 1 dia

Tukey HSD test; variable Var2 (Spreadsheet1) Approximate Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between MS = 8,3763, df = 12,000							
Cell No.	Var1	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}
		1,4700	1,7967	6,7100	41,250	42,933	28,723
1	C1		0,999991	0,297794	0,000159	0,000159	0,000159
2	C2	0,999991		0,357838	0,000159	0,000159	0,000159
3	C3	0,297794	0,357838		0,000159	0,000159	0,000161
4	C4	0,000159	0,000159	0,000159		0,976746	0,002106
5	C5	0,000159	0,000159	0,000159	0,976746		0,000792
6	C6	0,000159	0,000159	0,000161	0,002106	0,000792	

Figura A.6 – TUKEY -Resistência à compressão 28 dias

Tukey HSD test; variable Resistência 28 d (Spreadsheet1) Approximate Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between MS = 9,7235, df = 12,000							
Cell No.	Condição de cura	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}
		38,407	32,763	28,687	46,047	43,057	32,647
1	C1		0,298169	0,023139	0,090517	0,485832	0,279841
2	C2	0,298169		0,612832	0,002385	0,015845	1,000000
3	C3	0,023139	0,612832		0,000339	0,001283	0,639169
4	C4	0,090517	0,002385	0,000339		0,840602	0,002227
5	C5	0,485832	0,015845	0,001283	0,840602		0,014676
6	C6	0,279841	1,000000	0,639169	0,002227	0,014676	

Figura A.7 – TUKEY -Resistência à compressão 63 dias

Tukey HSD test; variable Resistência 63 dias (Spreadsheet1) Approximate Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between MS = 6,7487, df = 12,000							
Cell No.	Condição de cura	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}
		38,290	34,990	36,940	52,227	43,730	44,287
1	C1		0,638923	0,985768	0,000419	0,180163	0,119721
2	C2	0,638923		0,934034	0,000179	0,013917	0,008998
3	C3	0,985768	0,934034		0,000256	0,065125	0,042020
4	C4	0,000419	0,000179	0,000256		0,016866	0,026242
5	C5	0,180163	0,013917	0,065125	0,016866		0,999789
6	C6	0,119721	0,008998	0,042020	0,026242	0,999789	

Figura A.8 – TUKEY -Resistência à compressão 91 dias

Tukey HSD test; variable Resistência 91 dias (Spreadsheet1)							
Approximate Probabilities for Post Hoc Tests							
Error: Between MS = 14,717, df = 12,000							
Cell No.	Condução de cura	{1} 40,607	{2} 38,587	{3} 42,840	{4} 53,440	{5} 42,807	{6} 39,103
1	C1		0,984918	0,976655	0,014472	0,978123	0,996077
2	C2	0,984918		0,749590	0,005007	0,755263	0,999979
3	C3	0,976655	0,749590		0,048032	1,000000	0,832161
4	C4	0,014472	0,005007	0,048032		0,047186	0,006538
5	C5	0,978123	0,755263	1,000000	0,047186		0,837022
6	C6	0,996077	0,999979	0,832161	0,006538	0,837022	

ANEXO B – DADOS DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Figura B.1 - Dados da resistência à compressão em MPa na idade de 1 dia

Condição de cura	CP 1	CP2	CP3	MÉDIA
Condição 1	1,41	1,52	1,48	1,47
Condição 2	1,85	1,75	1,79	1,80
Condição 3	6,85	6,8	6,48	6,71
Condição 4	41,63	40,98	41,14	41,25
Condição 5	43,92	38,54	46,34	42,93
Condição 6	31,19	22,05	32,93	28,72

Figura B.2 - Dados da resistência à compressão em MPa na idade de 28 dias

Condição de cura	CP1	CP2	CP3	MÉDIA
Condição 1	39,9	37,58	37,73	38,40
Condição 2	32,41	33,09	32,79	32,76
Condição 3	29,33	25,16	31,57	28,69
Condição 4	47,75	43,02	47,37	46,05
Condição 5	41,01	38,9	49,26	43,06
Condição 6	29,34	33,36	35,24	32,65

Figura B.3 - Dados da resistência à compressão em MPa na idade de 63 dias

Condição de cura	CP1	CP2	CP3	MÉDIA
Condição 1	38,05	37,95	38,87	38,05
Condição 2	37,6	34,89	32,48	34,89
Condição 3	32,75	37,1	40,97	37,1
Condição 4	49,96	52,17	54,55	52,17
Condição 5	45,25	40,83	45,11	45,11
Condição 6	46,75	42,26	43,85	43,85

Figura B.4 - Dados da resistência à compressão em MPa na idade de 91 dias

Condição de cura	CP1	CP2	CP3	MÉDIA
Condição 1	43,73	35,18	42,91	40,61
Condição 2	39,55	38,33	37,88	38,59
Condição 3	37,94	48,01	42,57	42,84
Condição 4	51,76	53,12	55,44	53,44
Condição 5	44,75	40,8	42,87	42,81
Condição 6	45,65	36,45	35,21	39,10