

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



Felipe Mello dos Reis

**DESENVOLVIMENTO DE CIMENTO ATIVADO
ALCALINAMENTE MONOCOMPONENTE COM
PRECURSORES SÓLIDOS DE BAIXO TEOR DE
CÁLCIO E FONTES ALCALINAS ALTERNATIVAS.**

Trabalho de Graduação
2025

Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

Felipe Mello dos Reis

**DESENVOLVIMENTO DE CIMENTO ATIVADO
ALCALINAMENTE MONOCOMPONENTE COM
PRECURSORES SÓLIDOS DE BAIXO TEOR DE
CÁLCIO E FONTES ALCALINAS ALTERNATIVAS.**

Orientador

Prof. Dr. João Cláudio Bassan de Moraes (ITA)

Coorientadora

Pamela Rodrigues Passos Severino (ITA)

ENGENHARIA CIVIL-AERONÁUTICA

**SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Divisão de Informação e Documentação

dos Reis, Felipe Mello

Desenvolvimento de cimento ativado alcalinamente monocomponente com precursores sólidos de baixo teor de cálcio e fontes alcalinas alternativas. / Felipe Mello dos Reis.

São José dos Campos, 2025.

37f.

Trabalho de Graduação – Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica– Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2025. Orientador: Prof. Dr. João Cláudio Bassan de Moraes. Coorientadora: Pamela Rodrigues Passos Severino.

1. Cimento. 2. Geopolímero. 3. Monocomponente. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DOS REIS, Felipe Mello. **Desenvolvimento de cimento ativado alcalinamente monocomponente com precursores sólidos de baixo teor de cálcio e fontes alcalinas alternativas..** 2025. 37f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Felipe Mello dos Reis

TÍTULO DO TRABALHO: Desenvolvimento de cimento ativado alcalinamente monocomponente com precursores sólidos de baixo teor de cálcio e fontes alcalinas alternativas..

TIPO DO TRABALHO/ANO: Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) / 2025

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.

Felipe Mello dos Reis
Rua H8A, Ap. 113
12.228-460 – São José dos Campos–SP

DESENVOLVIMENTO DE CIMENTO ATIVADO ALCALINAMENTE MONOCOMPONENTE COM PRECURSORES SÓLIDOS DE BAIXO TEOR DE CÁLCIO E FONTES ALCALINAS ALTERNATIVAS.

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação

Felipe Mello dos Reis

Autor

João Cláudio Bassan de Moraes (ITA)

Orientador

Pamela Rodrigues Passos Severino (ITA)

Coorientadora

Prof^a. Dr^a. Cláudia Azevedo Pereira

Coordenadora do Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

São José dos Campos, 26 de maio de 2025.

Aos amigos da Graduação e Pós-Graduação do ITA por motivarem tanto a criação deste template pelo Fábio Fagundes Silveira quanto por motivarem a mim e outras pessoas a atualizarem e aprimorarem este excelente trabalho.

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer ao Dr. Donald E. Knuth, por ter desenvolvido o T_EX.

Ao Dr. Leslie Lamport, por ter criado o L^AT_EX, facilitando muito a utilização do T_EX, e assim, eu não ter que usar o Word.

Ao Prof. Dr. Meu Orientador, pela orientação e confiança depositada na realização deste trabalho.

Ao Dr. Nelson D'Ávilla, por emprestar seu nome a essa importante via de trânsito na cidade de São José dos Campos.

Ah, já estava esquecendo... agradeço também, mais uma vez ao T_EX, por ele não possuir vírus de macro :-)

*"If I have seen farther than others,
it is because I stood on the shoulders of giants."*

— SIR ISAAC NEWTON

Resumo

Na busca por alternativas mais sustentáveis ao cimento Portland, os cimentos ativados alcalinamente têm sido amplamente estudados. No entanto, a maioria dos processos de mistura ocorre em duas etapas, o que impacta a viabilidade e a eficiência construtiva. Um avanço importante nessa área é o desenvolvimento de sistemas monocomponentes, que simplificam a produção e tornam a tecnologia mais acessível e prática. Ainda assim, os estudos atuais se concentram em precursores ricos em cálcio, enquanto o uso de fontes alcalinas tradicionais apresenta desafios relacionados à segurança e ao custo. Este trabalho propõe o desenvolvimento de um cimento ativado alcalinamente monocomponente utilizando precursores sólidos de baixo teor de cálcio, como sílica ativa e metacaulim, e fontes alcalinas mais seguras e acessíveis, como carbonato de potássio e hidróxido de cálcio, garantindo resistência mecânica adequada e maior viabilidade para aplicação na construção civil.

Abstract

In the search for more sustainable alternatives to Portland cement, alkali-activated cements have been extensively studied. However, most mixing processes occur in two separate steps, limiting their feasibility and constructive efficiency. A significant advancement in this field is the development of one-part (just-add-water) systems, which simplify production and make the technology more accessible and practical. Nonetheless, current studies mainly focus on calcium-rich precursors, while the use of conventional alkaline activators raises concerns related to safety and cost. This work proposes the development of a one-part alkali-activated cement using low-calcium solid precursors, such as silica fume and metakaolin, along with safer and more affordable alkaline sources, such as potassium carbonate and calcium hydroxide. The goal is to ensure adequate mechanical performance while enhancing the viability of these materials for application in the construction industry.

Lista de Figuras

FIGURA 2.1 – Esquema do processo de ativação alcalina (DUXSON A. FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2006).	18
FIGURA 2.2 – Diagrama ternário dos precursores mais comuns (GIERGICZNY, 2019).	19
FIGURA 2.3 – Solubilidade da sílica e da alumina em função do pH (MASON, 1952).	21
FIGURA A.1 – Uma figura que está no apêndice	36

Lista de Tabelas

TABELA 2.1 – Características de materiais residuais comuns ou inovadores que podem ser adicionados ao concreto para produzir aglomerantes mais sustentáveis (NODEHI; TAGHVAEE, 2022).	20
TABELA 3.1 – Propriedades químicas dos reagentes sólidos.	24
TABELA 3.2 – Resultados de requisitos físicos e químicos da areia de quartzo padronizada.	24
TABELA 3.3 – Composição granulométrica das frações da areia de quartzo padronizada.	24
TABELA 3.4 – Composições das argamassas geopoliméricas produzidas.	26
TABELA A.1 –Exemplo de uma Tabela	37

Lista de Abreviaturas e Siglas

CO_2	dióxido de carbono
GHG	greenhouses gases
AAM	alkali-activated materials
SiO_2	sílica
Al_2O_3	alumina
N-A-S-H	sodium-alumino-silicate hydrate
C-A-S-H	calcium-alumino-silicate hydrate
K_2CO_3	carbonato de potássio
$Ca(OH)_2$	hidróxido de cálcio
MK	metakaolin
SF	silica fume
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ITA	Instituto Tecnológico de Aeronáutica
EDS	Energy dispersive X-ray spectroscopy
XRD	X-ray diffraction
OH^-	hidroxila
FTIR	Fourier transform infrared spectroscopy
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
ASTM	American Society for Testing and Materials
OPC	Ordinary Portland Cement
GGBFS	Ground Granulated Blast Furnace Slag
MSWIA	Municipal Solid Waste Incineration Ash
NaOH	hidróxido de sódio
Na_2SiO_3	silicato de sódio
KOH	hidróxido de potássio
Na_2CO_3	carbonato de sódio

Lista de Símbolos

a	Distância
\mathbf{a}	Vetor de distâncias
\mathbf{e}_j	Vetor unitário de dimensão n e com o j -ésimo componente igual a 1
\mathbf{K}	Matriz de rigidez
m_1	Massa do cumpim
δ_{k-k_f}	Delta de Kronecker no instante k_f

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Contexto Histórico	17
2.2	Matérias-primas de AAM	17
2.2.1	Precursores	17
2.2.2	Ativadores	21
2.3	Impactos Ambientais	22
2.4	Propriedades Mecânicas	22
3	MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1	Materiais e caracterização	23
3.2	Produção do metacaulim	25
3.3	Caracterização físico-química dos precursores sólidos	25
3.4	Produção das argamassas e pastas geopoliméricas	25
3.4.1	Formulação das misturas	25
3.4.2	Procedimento de mistura	27
3.4.3	Moldagem e cura dos corpos de prova	27
3.5	Caracterização das misturas geopoliméricas	28
3.5.1	Ensaio no estado endurecido	28
3.5.2	Análises microestruturais	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
5	CONCLUSÃO	32

REFERÊNCIAS	33
APÊNDICE A – TÓPICOS DE DILEMA LINEAR	36
A.1 Uma Primeira Seção para o Apêndice	36
ANEXO A – EXEMPLO DE UM PRIMEIRO ANEXO	37
A.1 Anexo A: Exemplo de Anexo	37

1 Introdução

O cimento é um dos principais materiais na construção civil, sendo utilizado desde a construção de residências e edifícios até pontes e rodovias. Em países em desenvolvimento como o Brasil, o cimento é amplamente utilizado devido à sua baixa complexidade e custo, o que permite seu uso em escala em qualquer localidade. O aumento exponencial da produção de cimento, 10 vezes maior que o crescimento populacional mundial (DIVISION, 1995), veio acompanhado de uma parcela expressiva da emissão de gases de efeito estufa (GHG), devido ao processo de calcinação do calcário que transforma o carbonato de cálcio em óxido de cálcio e gás carbônico em fornos de alta temperatura. A produção do Cimento Portland gera em média 842 kg de CO_2/t de clínquer produzido (ANDREW, 2018), representando 5% das emissões antropogênicas de GHG (IEA; WBCSD, 2009).

Neste contexto, surge a necessidade do desenvolvimento de novos materiais cimentícios que apresentem três propriedades principais: baixa emissão de GHG, baixo custo e alta resistência/durabilidade (SCRIVENER *et al.*, 2018).

Nos últimos anos, os materiais ativados alcalinamente (AAM) - precursores sólidos ricos em sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), capazes de formarem géis aglomerantes constituídos de sódio-alumino-silicato hidratado (NASH) e cálcio-alumino-silicato hidratado (CASH) - ganharam destaque devido ao seu potencial para substituir parcial ou totalmente o cimento Portland, reduzindo significativamente as emissões de GHG associadas à produção de cimento convencional.

Existem duas maneiras pelas quais os AAM podem ser produzidos: misturando o precursor sólido com um ativador alcalino líquido, ou com uma fonte alcalina sólida e água. Os sistemas de duas partes foram amplamente empregados no desenvolvimento inicial deste mercado devido ao elevado desempenho mecânico, durabilidade e resistência química. No entanto, os sistemas de uma parte são uma tecnologia mais escalável devido ao menor risco de manuseio e armazenamento dos ativadores sólidos (PROVIS, 2018).

Os precursores sólidos ricos em cálcio são mais utilizados por diversos fatores, como o rápido ganho de resistência (PROVIS; BERNAL, 2014), menor dependência de cura térmica (KE *et al.*, 2021), além de que os produtos da reação CASH tendem a formar uma matriz mais densa e menos porosa que os géis de NASH (BERNAL *et al.*, 2014). Neste sentido,

existe uma lacuna técnica e científica na formulação e caracterização de geopolímeros monocomponentes de baixo teor de cálcio.

O presente trabalho propõe o desenvolvimento de um cimento ativado alcalinamente monocomponente com foco em precursores sólidos de baixo teor de cálcio, especificamente metacaulim e sílica ativa, combinados a fontes alcalinas alternativas mais seguras e acessíveis, como carbonato de potássio (K_2CO_3) e hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$). Essa abordagem visa contribuir para a formulação de ligantes mais sustentáveis, seguros e com desempenho adequado para aplicações na construção civil, alinhando-se às diretrizes contemporâneas de construção de baixo impacto ambiental.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Contexto Histórico

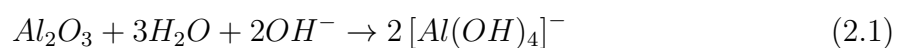
De acordo com (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2014), a síntese de materiais por ativação alcalina teve início nas décadas de 1930 e 1940, quando foi desenvolvido um substituto para o cimento Portland tradicional a partir de escórias de alto-forno e outros aluminosilicatos. A partir de 1970, o interesse por essa área aumentou, quando o cientista francês Joseph Davidovits cunhou o termo "geopolímero" e patenteou diversas formulações. Seu estudo inicial era voltado ao desenvolvimento de materiais inorgânicos não inflamáveis e resistentes ao fogo (PROVIS; DEVENTER, 2009).

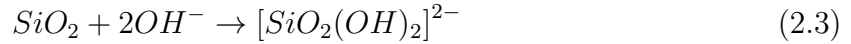
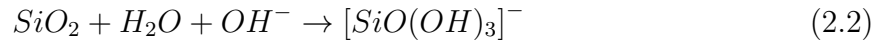
Desde então, os AAM passaram a chamar a atenção de pesquisadores e da indústria devido ao baixo consumo de energia e à natureza sustentável (QIN *et al.*, 2022). Além disso, com o avanço dos estudos, os AAM ganharam reconhecimento por suas propriedades mecânicas e durabilidade, uma vez que as reações de polimerização que ocorrem durante a cura proporcionam alto ganho de resistência à compressão e resistência a ataques químicos.

2.2 Matérias-primas de AAM

2.2.1 Precursores

Os precursores são materiais ricos em SiO_2 e Al_2O_3 que, quando ativados por uma solução alcalina, formam uma rede tridimensional de aluminosilicatos (RAKHIMOVA; RAKHIMOV, 2019). As propriedades mecânicas e cinéticas dos AAM são fortemente influenciadas pela proporção SiO_2/Al_2O_3 (PROVIS, 2007). O processo inicial de ativação consiste na dissolução dos aluminosilicatos, por meio da quebra das ligações covalentes $Si-O-Si$ e $Al-O-Al$ em meio de pH elevado (SEVERO *et al.*, 2013). A hidrólise pode ser representada da seguinte forma:





Posteriormente, os silicatos e aluminatos dissolvidos reagem entre si, formando um gel que passa por processos de polimerização e endurecimento, conforme ilustrado na Figura 2.1.

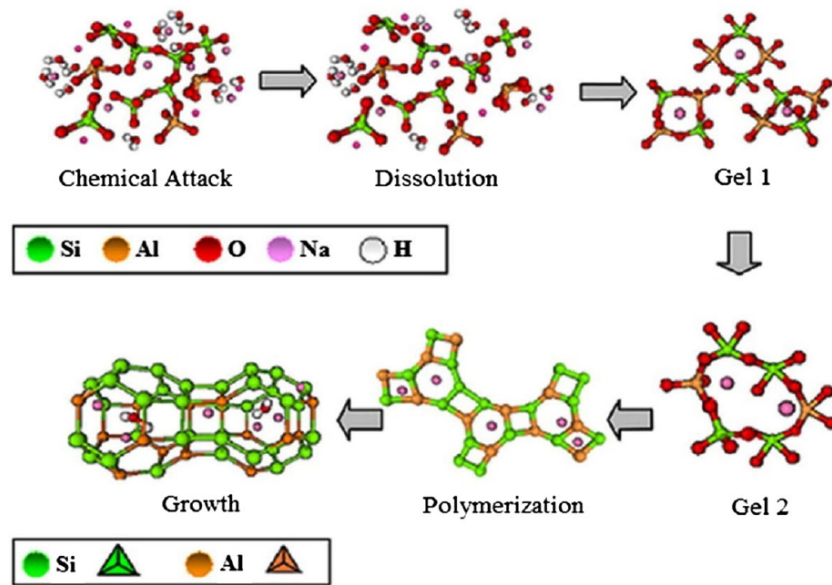


FIGURA 2.1 – Esquema do processo de ativação alcalina (DUXSON A. FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2006).

Os precursores podem ser divididos em duas categorias: os de alto teor de cálcio, como a escória de alto-forno e a cinza volante, e os de baixo teor de cálcio, como o metacaulim. A Figura 2.2 apresenta os precursores mais comuns e suas respectivas composições químicas.

O primeiro grupo tem como principal produto da reação de ativação o silicato de alumínio e cálcio hidratado (C-A-S-H), enquanto o segundo grupo forma predominantemente o gel de silicato de alumínio hidratado (N-A-S-H).

Quando os níveis de cálcio presentes nesses precursores são elevados, o produto final é um gel de cura rápida e alta resistência inicial. No entanto, esses sistemas são mais suscetíveis a retrações, fissuras e corrosão por ataque de cloretos. Já os sistemas de baixo cálcio formam uma rede amorfa de tetraedros, que apresenta baixa permeabilidade e retração, melhor resistência ao fogo e estrutura menos porosa. A proporção de SiO_2/Al_2O_3 é responsável pelo grau de polimerização do gel formado; portanto, caso a relação ideal não seja atingida, a resistência mecânica e a durabilidade do AAM podem ser comprometidas. Por fim, o gel N-A-S-H necessita de um maior tempo de cura e temperatura entre 80 – 100 °C para atingir a resistência mecânica apropriada (NODEHI; TAGHVAEE, 2022).

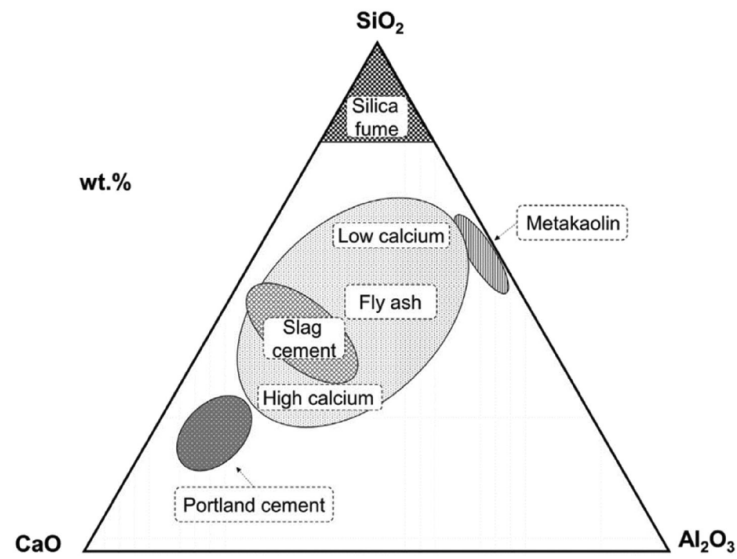


FIGURA 2.2 – Diagrama ternário dos precursores mais comuns (GIERGICZNY, 2019).

A Tabela 2.1 apresenta as principais características dos precursores mais comuns.

TABELA 2.1 – Características de materiais residuais comuns ou inovadores que podem ser adicionados ao concreto para produzir aglomerantes mais sustentáveis (NODEHI; TAGHVAEE, 2022).

Nome do aditivo	Forma usual	Densidade média (kg/m ³)	Tamanho médio partícula (µm)	Limitações	Benefícios
Cimento Portland (OPC)	Irregular e angular	1440	0,15–20	–	–
Sílica ativa	Esférica	2200	0,1–0,5	Reduz trabalhabilidade e resistência inicial	Aumenta a compactade, resistência mecânica e durabilidade
Escória de alto-forno moída (GGBFS)	Angular com superfície rugosa	1000–1300	1,25–250	Baixa resistência inicial	Aumenta a durabilidade, melhora a ITZ e resistência a sulfatos
Cinza volante (Fly ash)	Esférica	540–860	0,5–300	Baixa resistência inicial	Melhora a trabalhabilidade e a resistência a longo prazo
Metacaulim	Porosa, lamelar e angular	890	1–20	Reduz a trabalhabilidade	Preenche a microestrutura e melhora a ITZ
Cinza de casca de arroz	Irregular com alta porosidade	504–700	5–10	Varição nas propriedades e baixa reatividade	Alto teor de sílica; melhora a compactade e resistência
Pó de vidro	Irregular	2500	0,8–50	Alta contaminação	Melhora a durabilidade e reação pozolânica
Lama vermelha (red mud)	Irregular e em forma de agulha	2700–3400	100 até mais de 200	Alta contaminação	Alto teor de alumina, pode melhorar a hidratação
Resíduos cerâmicos	Angular	1700	Abaixo de 100	–	Melhora a compactade e o desempenho
Escória de incineração de resíduos sólidos urbanos (MSWI)	Irregular	660–1690	–	–	Melhora a microestrutura e reduz a porosidade
Cinza de lodo de papel	Irregular	Abaixo de 100	–	–	Ajusta favoravelmente a razão S/A

2.2.2 Ativadores

O ataque alcalino sobre a microestrutura dos precursores resulta na liberação de silicatos e aluminatos na solução. A solubilidade da sílica e da alumina em função do pH é apresentada na Figura 2.3.

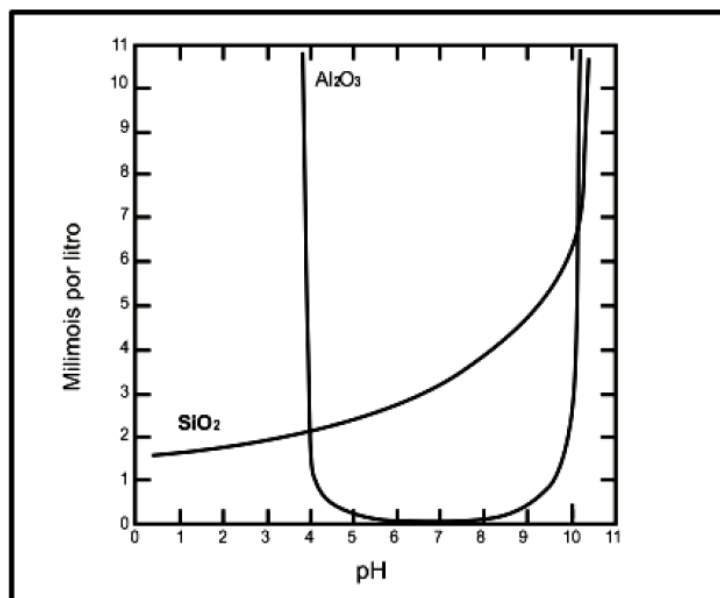


FIGURA 2.3 – Solubilidade da sílica e da alumina em função do pH (MASON, 1952).

Observa-se que a solubilidade da sílica é baixa em ambientes ácidos e elevada em meios básicos, enquanto a alumina é solúvel em ambos os extremos de pH. Portanto, para que as reações de ativação ocorram, é necessário que o pH da solução seja elevado.

Os ativadores alcalinos podem ser encontrados em duas formas: líquida — produzindo os geopolímeros de duas partes — ou sólida — geopolímeros de uma parte. Os principais ativadores alcalinos líquidos são: hidróxido de sódio (NaOH), silicato de sódio (Na_2SiO_3), hidróxido de potássio (KOH), carbonato de sódio (Na_2CO_3), carbonato de potássio (K_2CO_3) e óxido de potássio (K_2O). Os primeiros estudos de AAM focaram em ativadores líquidos, uma vez que o produto final apresenta alta resistência à compressão, aderência e capacidade de suportar cargas de fadiga. Além disso, também demonstram elevada resistência a ciclos de congelamento e descongelamento e a altas temperaturas (HEATH *et al.*, 2014).

Apesar das vantagens dos sistemas de duas partes, as soluções básicas são corrosivas e irritam a pele humana, tornando seu transporte e manuseio perigosos para os trabalhadores (AWOYERA, 2019). Outro ponto que merece atenção é que a produção de silicato de sódio ocorre entre $1200 - 1400\text{ }^\circ\text{C}$ e emite aproximadamente $1,514\text{ kg de CO}_2$ por kg de silicato produzido, além de contribuir significativamente para a poluição do ar por meio de poeira e óxidos de nitrogênio e enxofre (RAJAN, 2020).

Dessa forma, os sistemas de uma parte surgem como uma alternativa mais segura, uma vez que os ativadores sólidos são menos perigosos e mais fáceis de manusear. Mesmo que os geopolímeros de uma parte apresentem menor resistência mecânica e necessitem de cura térmica para atingir o desempenho adequado (PROVIS, 2018), seu uso é mais escalável.

2.3 Impactos Ambientais

A principal vantagem ambiental atribuída aos AAMs reside na redução considerável de emissões de CO_2 em comparação com o cimento Portland tradicional. Estima-se que os impactos ambientais dos ativadores sólidos e líquidos sejam de 24% e 60% do impacto causado pelo OPC, respectivamente (LUUKKENEN Z. ABDOLLAHNEJAD, 2017). Além disso, a produção de AAMs frequentemente utiliza resíduos industriais como matérias-primas, como escória de alto forno, cinza de lodo de esgoto, de casca de arroz, de palha de cana-de-açúcar, entre outros (MORAES *et al.*, 2024). Portanto, além da valorização de resíduos industriais, a produção de AAMs reduz a demanda por recursos naturais de jazidas minerais e oferece uma destinação ambiental adequada, seguindo as propostas da Política Nacional de Resíduos Sólidos (POLÍTICA..., 2016).

2.4 Propriedades Mecânicas

3 Materiais e métodos

3.1 Materiais e caracterização

Para o desenvolvimento das argamassas geopoliméricas monocomponentes, utilizaram-se os seguintes componentes:

- Metacaulim (MK) fornecido pela empresa XXX;
- Sílica ativa (SF) fornecida pela empresa XXX;
- Carbonato de potássio sólido da empresa XXX;
- Hidróxido de cálcio da empresa XXX;
- Areia padronizada de quartzo da empresa XXX;
- Água destilada.

Os aglomerantes utilizados foram a sílica ativa e o metacaulim. Entretanto, a pureza encontrada no mercado do metacaulim não é suficiente para garantir precisão na caracterização das amostras cimentícias. Portanto, ele foi produzido a partir do caulim comercial, conforme detalhado na Seção 3.2. Já as fontes alcalinas são encontradas no mercado com alta pureza, portanto foi utilizada a composição físico-química fornecida pelo fabricante.

A composição química dos materiais empregados na formulação das argamassas é apresentada na Tabela 3.1.

TABELA 3.1 – Propriedades químicas dos reagentes sólidos.

Material	Composição química	Especificação (%)
Sílica ativa	SiO_2	XX,X
	Al_2O_3	XX,X
	MgO	XX,X
	CaO	XX,X
	Fe_2O_3	XX,X
Carbonato de potássio	K_2CO_3	XX,X
Hidróxido de cálcio	$Ca(OH)_2$	XX,X

Além disso, a areia de quartzo utilizada segue os padrões estabelecidos pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), representados nas Tabelas 3.2 e 3.3.

TABELA 3.2 – Resultados de requisitos físicos e químicos da areia de quartzo padronizada.

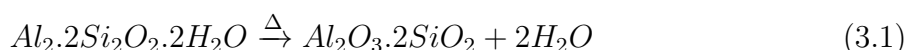
Propriedade	Resultado	Requisito ABNT NBR 7214:2015
Teor de sílica (ABNT NBR 14656:2001)	96,5%	$\geq 95\%$, em massa
Umidade (ABNT NBR 7214:2015)	0,0%	$\leq 0,2\%$, em massa
Matéria orgânica (ABNT NBR 17053:2022)	Mais clara ou igual à cor da solução padrão	Cor da solução padrão de ácido tânico a 2%

TABELA 3.3 – Composição granulométrica das frações da areia de quartzo padronizada.

Fração	Intervalo entre peneiras	Porcentagem em massa (%)	
		Resultado	Requisito ABNT NBR 7214:2015
16	(2,4 mm e 2,0 mm)	0	≤ 10
16	(2,0 mm e 1,2 mm)	97	≥ 90
30	(1,2 mm e 0,6 mm)	99	≥ 95
50	(0,6 mm e 0,3 mm)	96	≥ 95
100	(0,3 mm e 0,15 mm)	95	≥ 95

3.2 Produção do metacaulim

O metacaulim foi obtido a partir da calcinação do caulim a 700 °C por 1 hora, em um forno elétrico da marca XXX. O tempo de calcinação e temperatura ótimos foram determinados a partir de ensaios prévios, onde foi avaliado o rendimento da calcinação. Para garantir a homogeneidade do material, foram utilizadas duas formas rasas com altura máxima de XX mm. A transformação da caulinita cristalina em metacaulinita amorfa é representada pela Equação 3.1.



3.3 Caracterização físico-química dos precursores sólidos

A caracterização físico-química dos precursores sólidos foi realizada nos laboratórios do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), localizado em São José dos Campos-SP.

A espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS) permitiu determinar a proporção dos elementos químicos, realizada juntamente com a microscopia eletrônica de varredura (SEM) para avaliação da morfologia dos precursores sólidos.

Além disso, a difração de raios-X (XRD) foi utilizada para determinar a fase cristalina do metacaulim e da sílica ativa.

A fim de verificar a remoção dos grupos hidroxilas (OH^-) e a presença das ligações $Al-Si-O$, foi realizada a espectroscopia de infravermelho (FTIR) em um espectrômetro da marca XXX.

Por fim, a distribuição do tamanho de partícula dos sólidos empregados foi realizada através do ensaio de granulometria a laser. Partículas menores e mais irregulares tendem a apresentar maior área superficial específica e, portanto, maior reatividade em contato com a fonte alcalina, o que pode influenciar diretamente no desempenho mecânico e nas propriedades reológicas das argamassas geopoliméricas.

3.4 Produção das argamassas e pastas geopoliméricas

3.4.1 Formulação das misturas

O desenvolvimento das argamassas geopoliméricas monocomponentes seguiu um planejamento experimental sistemático, visando avaliar o efeito das diferentes composições nas propriedades físico-químicas e mecânicas.

As variáveis consideradas no estudo foram:

- Proporção entre os precursores sólidos (metacaulim e sílica ativa);
- Teor de ativadores alcalinos (K_2CO_3 e $Ca(OH)_2$);
- Relação água/sólidos (a/s);
- Relação areia/material cimentício (ar/c).

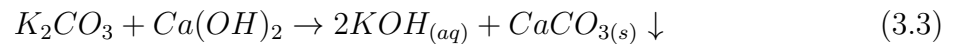
A variável de estudo deste experimento é a relação Si/Al , que será variada de 1,0 até 5,0, sendo a relação Si/Al calculada com base na proporção de metacaulim e sílica ativa.

Inicialmente, a proporção de água/sólidos foi determinada de maneira análoga a [ref xxxx](#), visando garantir a trabalhabilidade adequada das pastas.

Além disso, devido ao balanço estequiométrico, a relação Al/K será constante e igual a 1, conforme a fórmula empírica 3.2 (DAVIDOVITS, 1991), onde M é um cátion de sódio ou potássio.

$$M_n \{(SiO_2)_z AlO_2\}_n \cdot wH_2O \quad (3.2)$$

Ademais, a relação K/Ca será constante e igual a 2, respeitando a reação de precipitação do carbonato de potássio com o hidróxido de cálcio, conforme a Equação 3.3.



Tendo as proporções da pasta bem definidas, a produção das argamassas manteve a proporção de 1:3 entre o aglomerante e a areia, conforme a literatura [ref XXXX](#).

A Tabela 3.4 apresenta as diferentes formulações produzidas, com as respectivas proporções em massa dos componentes.

TABELA 3.4 – Composições das argamassas geopoliméricas produzidas.

Amostra	Precursores (%)		Ativadores (%)		a/s	ar/c	Si/Al
	MK	SF	K_2CO_3	$Ca(OH)_2$			
AGP1	XX	XX	X,X	X,X	X,XX	X,X	1,0
AGP2	XX	XX	X,X	X,X	X,XX	X,X	2,0
AGP3	XX	XX	X,X	X,X	X,XX	X,X	3,0
AGP4	XX	XX	X,X	X,X	X,XX	X,X	4,0
AGP5	XX	XX	X,X	X,X	X,XX	X,X	5,0

3.4.2 Procedimento de mistura

A produção das misturas seguiu os procedimentos normatizados. Para a produção das argamassas e ensaio de compressão, seguiram-se os procedimentos da norma brasileira (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019), já para a produção das pastas, optou-se pela norma americana (ASTM International, 2006), uma vez que a norma brasileira não especifica o procedimento de mistura para pastas cimentícias sem agregado miúdo. Ambos os procedimentos foram adaptados para o preparo de amostras de volume reduzido.

3.4.3 Moldagem e cura dos corpos de prova

Para o ensaio de compressão, os corpos de prova foram preparados em moldes prismáticos de dimensões $XX \times XX \times XX$ mm, previamente lubrificados com desmoldante à base de óleo.

Para cada composição, foram moldados 9 corpos de prova, destinados aos ensaios nas idades de 1, 3 e 7 dias (3 corpos de prova para cada idade). Não foi necessário realizar os testes aos 28 dias, pois a cura térmica dos aglomerantes empregados apresenta alto ganho de resistência inicial, conforme demonstrado na literatura [ref XXX](#).

Optou-se por realizar a cura térmica em uma estufa mantida a $(60 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa mínima de 95% por 24 horas, conforme recomendado na norma (Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2006), para garantir a ativação dos aglomerantes e acelerar o processo de cura. Vale ressaltar que o desmolde foi realizado 24 horas após o início do processo de cura.

A desmoldagem foi realizada após 24 horas da moldagem, e os corpos de prova foram imediatamente transferidos para as condições de cura correspondentes até a idade de ensaio.

Para as análises microestruturais, pequenas amostras foram separadas, tendo a hidratação interrompida por imersão em álcool etílico e filtragem a vácuo, seguida de secagem em estufa a 40°C por 24 horas. Tais amostras foram armazenadas em recipientes herméticos para evitar uma nova hidratação.

3.5 Caracterização das misturas geopoliméricas

3.5.1 Ensaios no estado endurecido

3.5.1.1 Resistência à compressão

Para o ensaio de resistência à compressão, os corpos de prova foram inseridos em uma prensa hidráulica da marca XXX, modelo XXX, aplicando-se carga com velocidade de XXX N/s até a ruptura. A resistência foi calculada pela equação:

$$R_c = \frac{F_c}{A_t} \quad (3.4)$$

Onde:

- R_c é a resistência à compressão, em MPa;
- F_c é a carga máxima aplicada, em N;
- A_t é a área da seção transversal, em mm².

Para análise estatística, realizou-se o teste de Tukey, permitindo identificar diferenças significativas entre os grupos de amostras, considerando um nível de significância de XXX%.

3.5.2 Análises microestruturais

3.5.2.1 Difração de raios X (XRD)

As análises de difração de raios X foram realizadas em amostras moídas das pastas, com granulometria inferior a 75 µm, nas idades de 7 e 28 dias. Utilizou-se um difratômetro da marca XXX, modelo XXX.

3.5.2.2 Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

A espectroscopia de infravermelho foi realizada em amostras moídas das pastas, com granulometria inferior a 45 µm, nas idades de 1, 3 e 7 dias. Utilizou-se um espectrômetro da marca XXX, modelo XXX, na faixa de XXX a XXX cm⁻¹, com resolução de XXX cm⁻¹ e XXX varreduras.

3.5.2.3 Microscopia eletrônica de varredura (SEM)

A análise microestrutural das pastas foi realizada por microscopia eletrônica de varredura, utilizando um microscópio da marca **XXX**, modelo **XXX**, acoplado a um espectrômetro de energia dispersiva de raios X (EDS). As amostras foram preparadas a partir de fragmentos cilíndricos das pastas moldadas em um canudo de plástico descartável.

4 Resultados e discussão

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Sed sit amet magna auctor, consectetur orci eu, mattis enim. Nulla vulputate ligula odio, nec cursus lacus rhoncus nec. Vivamus laoreet rutrum quam, ut pharetra dui dapibus quis. Etiam vel malesuada mi. Ut turpis massa, sodales ac turpis vel, varius laoreet sapien. Ut imperdiet, velit laoreet placerat pellentesque, arcu erat elementum elit, ut tempus nulla nibh sit amet purus. Interdum et malesuada fames ac ante ipsum primis in faucibus.

Aenean ipsum ex, hendrerit et dapibus ut, imperdiet eu tellus. Duis tincidunt orci non fermentum rhoncus. Aenean nec sapien ultrices, lobortis nisl vel, ornare odio. Cras feugiat, erat sed gravida pellentesque, massa massa eleifend dolor, eget efficitur libero lacus nec diam. Morbi quis accumsan erat, et laoreet tortor. Etiam eu dolor fringilla, commodo est in, suscipit nunc. Fusce sit amet iaculis eros, cursus accumsan leo. Praesent pellentesque tortor ac tortor gravida fermentum. Praesent sed enim orci. Sed tincidunt hendrerit vulputate. Maecenas vitae purus vitae lorem semper malesuada sed ut ipsum. Curabitur ac justo vel turpis mattis tincidunt. Nulla at imperdiet dolor. Morbi faucibus eget tellus interdum auctor.

Donec aliquam interdum ipsum vitae bibendum. Praesent vitae aliquam purus. Fusce non nunc in diam consectetur tristique. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia curae; Cras porta metus mauris, in congue leo molestie vitae. Duis tincidunt, neque nec vulputate aliquam, purus sapien luctus neque, id molestie nunc velit non dolor. Curabitur lacinia libero ut egestas congue. Aenean ut tellus id erat volutpat dictum at nec massa. Cras ullamcorper cursus risus ac sodales. Nunc enim tellus, malesuada dapibus accumsan ac, auctor finibus lorem. Aliquam erat volutpat. Curabitur eget suscipit neque. Quisque interdum sem eu rutrum gravida. In hac habitasse platea dictumst. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit.

Mauris luctus euismod purus vitae volutpat. Ut aliquam posuere nibh vitae consequat. Nam ultricies maximus orci, ac placerat enim ornare ac. Fusce condimentum metus tellus, pharetra ultricies sem semper pellentesque. Integer leo metus, finibus sed tempor nec, cursus ultricies augue. Nunc vel convallis diam. Proin nec elit nisl. Etiam justo tortor, condimentum eu sagittis vitae, iaculis quis erat. Donec vulputate et nibh non consequat.

Suspendisse a lobortis justo.

Sed non ipsum id nulla facilisis bibendum non sit amet purus. Integer non tristique neque. In id bibendum enim. Phasellus condimentum finibus augue, ut ultrices nulla tincidunt ac. Vivamus eget mauris sed velit dapibus dictum scelerisque nec nisl. Curabitur mollis sapien a odio vulputate ultricies. Aenean facilisis eget ipsum non vestibulum. Sed tortor odio, mollis pulvinar mi id, rhoncus facilisis eros. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In urna turpis, euismod non fringilla a, sagittis id libero. Fusce vulputate feugiat nunc vel dictum. Quisque vestibulum ex non faucibus vehicula. Proin vel vulputate tortor. Sed a leo sollicitudin, ultrices sapien at, rutrum dui. Curabitur lectus libero, rhoncus nec posuere ut, porttitor id mauris.

5 Conclusão

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Nullam venenatis augue id augue ultrices, et gravida magna vehicula. Cras volutpat suscipit iaculis. Praesent varius ac orci sed ultrices. Vivamus vestibulum molestie lorem. Maecenas id congue tortor. Aliquam erat volutpat. Nullam ornare tortor et nunc sagittis laoreet. Sed at turpis et quam facilisis elementum. Nullam ultrices elit ut accumsan ultricies. Nulla sit amet tellus lacus. Vestibulum ac lectus velit. Donec nunc odio, mattis nec orci sed, porta lobortis lectus.

Proin ultricies elit vitae mi efficitur eleifend. Nulla non lorem consectetur, placerat dui quis, feugiat urna. Quisque sed ligula massa. Donec finibus placerat orci, eget mollis justo rutrum a. Sed luctus feugiat congue. Phasellus libero felis, tempor quis rutrum pretium, porttitor ac nisi. Praesent euismod malesuada enim a rhoncus. Aliquam gravida fringilla aliquam. Proin nunc lorem, convallis fringilla eleifend et, tempus quis orci. Phasellus bibendum, tellus eu elementum posuere, odio lacus maximus eros, nec lobortis lectus nisi a turpis. Vivamus viverra felis et dolor viverra interdum. Nulla convallis nisi eu sapien egestas aliquet sit amet eget risus. Phasellus vel quam vel lacus commodo lacinia.

Donec ultrices ac nisi nec elementum. Aenean pellentesque pellentesque pulvinar. Ut aliquet nulla vitae porttitor hendrerit. Nullam venenatis nisl nec ipsum malesuada ultricies. Curabitur massa erat, auctor in ipsum non, semper ornare nunc. Donec non felis eget diam porta rhoncus. Mauris id lectus sed arcu iaculis dictum et vitae velit. Cras sit amet neque vel sapien interdum fermentum sit amet eu lorem. Fusce urna sem, pretium a facilisis id, aliquet at mi. Etiam elementum eget est et porttitor. Morbi ultricies lorem a arcu mattis, eget egestas ex ultrices. Pellentesque bibendum sed est ac imperdiet.

Referências

ANDREW, R. M. Global co 2 emissions from cement production. **Earth System Science Data**, Copernicus GmbH, v. 10, n. 1, p. 195–217, 2018.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 7215: Cimento Portland — Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, Brasil, 2019. Segunda edição. Publicada em 28/02/2019.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **ABNT NBR 9479:2006 - Argamassa e concreto — Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova**. 2. ed. Rio de Janeiro, Brasil, maio 2006. Válida a partir de 30 de junho de 2006.

ASTM International. **ASTM C305: Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency**. West Conshohocken, PA, USA, 2006. Designação oficial: ASTM C305-06.

AWOYERA, A. A. P. O. A critical review on application of alkali activated slag as a sustainable composite binder. **Miscellaneous**, v. 11, p. e00268–e00268, 2019.

BERNAL, S. A.; GUTIÉRREZ, R. M. de; PROVIS, J. L. Engineering and durability properties of alkali-activated slag concretes. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 33, p. 99–108, 2014.

DAVIDOVITS, J. Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 37, p. 1633–1656, 08 1991.

DIVISION, U. N. P. **World population prospects: The 1994 revision**. [S.l.]: UN, 1995.

DUXSON A. FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, J. L. P. P. Geopolymer technology: the current state of the art. **EBSCOhost Academic Search Premier**, v. 42, n. 9, p. 2917–2933, 2006.

GIERGICZNY, Z. Fly ash and slag. **Cement and Concrete Research**, v. 124, p. 105826, 2019. ISSN 0008-8846.

HEATH, A.; PAINE, K.; MCMANUS, M. Minimising the global warming potential of clay based geopolymers. **Journal of Cleaner Production**, v. 78, p. 75–83, 2014.

IEA; WBCSD. **Cement Technology Roadmap 2009: Carbon Emissions Reductions up to 2050**. Paris, France and Geneva, Switzerland, 2009.

- KE, X.; BERNAL, S. A.; PROVIS, J. L. One-part alkali-activated materials: State-of-the-art and perspectives. **Cement and Concrete Research**, Elsevier, v. 140, p. 106336, 2021.
- LUUKKENEN Z. ABDOLLAHNEJAD, J. Y. T. One-part alkali-activated materials: A review. **Elsevier ScienceDirect Journals**, v. 103, p. 21–34, 2017.
- MASON, B. Principles of geochemistry. **Miscellaneous**, v. 74, n. 3, p. 262, 1952.
- MORAES, J.; MORAES, M.; BATISTA, J.; AKASAKI, J.; FONT, A.; TASHIMA, M.; SORIANO, L.; BORRACHERO, M.; PAYÁ, J. Influence of sugar cane straw ash in metakaolin-based geopolymers. **Construction and Building Materials**, v. 444, p. 137835, 2024.
- NODEHI, M.; TAGHVAEE, V. M. Alkali-activated materials and geopolymer: a review of common precursors and activators addressing circular economy. **Circular Economy and Sustainability**, v. 2, p. 165–196, 2022.
- PACHECO-TORGAL, F.; LABRINCHA, J.; LEONELLI, C.; PALOMO, A.; CHINDAPRASIRT, P. (Ed.). **Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes**. Oxford, UK: Elsevier, 2014. ISBN 9781782422884.
- POLÍTICA Nacional de Resíduos Sólidos: Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, e legislação correlata. 3. ed. Brasília: Câmara dos Deputados, Edições Câmara, 2016. (Série Legislação, n. 230). ISBN 978-85-402-0496-6.
- PROVIS, J. L. Alkali-activated materials. **Nature Reviews Materials**, Nature Publishing Group, v. 3, n. 6, p. 276–277, 2018.
- PROVIS, J. L.; BERNAL, S. A. Geopolymers and related alkali-activated materials. **Annual Review of Materials Research**, Annual Reviews, v. 44, p. 299–327, 2014.
- PROVIS, J. L.; DEVENTER, J. S. J. van (Ed.). **Geopolymers: Structure, Processing, Properties and Industrial Applications**. Cambridge, UK: Woodhead Publishing / CRC Press, 2009. ISBN 9781845694494.
- PROVIS, J. v. D. J. L. Geopolymerisation kinetics. 1. in situ energy-dispersive x-ray diffractometry. **Elsevier ScienceDirect Journals**, v. 62, n. 9, p. 2309–2317, 2007.
- QIN, Y.; QU, C.; MA, C.; ZHOU, L. One-part alkali-activated materials: State of the art and perspectives. **Polymers**, v. 14, n. 22, p. 5046, 2022.
- RAJAN, P. K. H. S. Sustainable development of geopolymer binder using sodium silicate synthesized from agricultural waste. **Elsevier ScienceDirect Journals**, v. 286, p. 124959–124959, 2020.
- RAKHIMOVA, N. R.; RAKHIMOV, R. Z. Reaction products, structure and properties of alkali-activated metakaolin cements incorporated with supplementary materials – a review. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 1, p. 1522–1531, 2019.
- SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-co2 cement-based materials industry. **Cement and concrete Research**, Elsevier, v. 114, p. 2–26, 2018.

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

Apêndice A - Tópicos de Dilema Linear

A.1 Uma Primeira Seção para o Apêndice

A matriz de Dilema Linear M e o vetor de torques inerciais b , utilizados na simulação são calculados segundo a formulação abaixo:

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$



FIGURA A.1 – Uma figura que está no apêndice

Anexo A - Exemplo de um Primeiro Anexo

A.1 Anexo A: Exemplo de Anexo

Exemplo de uma tabela.

TABELA A.1 – Exemplo de uma Tabela

Parâmetro	Unidade	Valor da simulação	Valor experimental
Comprimento, α	m	8,23	8,54
Altura, β	m	29,1	28,3
Velocidade, v	m/s	60,2	67,3

Exemplo de uma equação

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}}\right) - \frac{\partial L}{\partial q} = \tau^T. \tag{A.1}$$

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO TC	2. DATA 26 de maio de 2025	3. DOCUMENTO Nº DCTA/ITA/DM-018/2025	4. Nº DE PÁGINAS 37
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Desenvolvimento de cimento ativado alcalinamente monocomponente com precursores sólidos de baixo teor de cálcio e fontes alcalinas alternativas.			
6. AUTOR(ES): Felipe Mello dos Reis			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Cupim; Cimento; Estruturas			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Cupim; Dilema; Construção			
10. APRESENTAÇÃO: (X) Nacional () Internacional ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação. Programa de Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica. Departamento de Estruturas e Edificações. Orientador: Prof. Dr. João Cláudio Bassan de Moraes . Coorientadora: Pamela Rodrigues Passos Severino. Defesa em 26/05/2025. Publicada em 26/05/2025.			
11. RESUMO: Na busca por alternativas mais sustentáveis ao cimento Portland, os cimentos ativados alcalinamente têm sido amplamente estudados. No entanto, a maioria dos processos de mistura ocorre em duas etapas, o que impacta a viabilidade e a eficiência construtiva. Um avanço importante nessa área é o desenvolvimento de sistemas monocomponentes, que simplificam a produção e tornam a tecnologia mais acessível e prática. Ainda assim, os estudos atuais se concentram em precursores ricos em cálcio, enquanto o uso de fontes alcalinas tradicionais apresenta desafios relacionados à segurança e ao custo. Este trabalho propõe o desenvolvimento de um cimento ativado alcalinamente monocomponente utilizando precursores sólidos de baixo teor de cálcio, como sílica ativa e metacaulim, e fontes alcalinas mais seguras e acessíveis, como carbonato de potássio e hidróxido de cálcio, garantindo resistência mecânica adequada e maior viabilidade para aplicação na construção civil.			
12. GRAU DE SIGILO: (X) OSTENSIVO () RESERVADO () SECRETO			