

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.

22f.

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. 22f. 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 1.1 – Proibido estacionar cupins. Legenda grande, com o objetivo de demonstrar a indentação na lista de figuras. 14

FIGURA 2.1 – Cupim cibernético. 16

FIGURA A.1 – Uma figura que está no apêndice 21

Lista de Tabelas

TABELA 2.1 – Exemplo de uma Tabela 15

Lista de Abreviaturas e Siglas

CTq	computed torque
DC	direct current
EAR	Equação Algébrica de Riccati
GDL	graus de liberdade
ISR	interrupção de serviço e rotina
LMI	linear matrices inequalities
MIMO	multiple input multiple output
PD	proporcional derivativo
PID	proporcional integrativo derivativo
PTP	point to point
UARMII	Underactuated Robot Manipulator II
VSC	variable structure control

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	14
1.1	Contextualização	14
2	ESCOPO	15
2.1	Modelagem no espaço das juntas	15
3	METODOLOGIA	17
3.1	Controle combinado	17
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
5	CONCLUSÃO	19
	REFERÊNCIAS	20
	APÊNDICE A – TÓPICOS DE DILEMA LINEAR	21
A.1	Uma Primeira Seção para o Apêndice	21
	ANEXO A – EXEMPLO DE UM PRIMEIRO ANEXO	22
A.1	Uma Seção do Primeiro Anexo	22

1 Introdução

1.1 Contextualização

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, que permite seu uso em escala em qualquer local. 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 clinker 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).



FIGURA 1.1 – Proibido estacionar cupins. Legenda grande, com o objetivo de demonstrar a indentação na lista de figuras.

2 Escopo

2.1 Modelagem no espaço das juntas

Manipuladores subatuados diferem dos totalmente atuados pois são equipados com um número de atuadores que é sempre menor que o número de graus de liberdade (GDL). Portanto, nem todos os GDL podem ser controlados ativamente ao mesmo tempo (SBORNIAN, 2004). Por exemplo, com um manipulador planar de 3 juntas equipado com dois atuadores, ou seja, duas juntas ativas e uma passiva, pode-se controlar ao mesmo tempo duas das juntas a qualquer instante, mas não todas. Para controlar todas as juntas de um manipulador subatuado, deve-se usar um controle sequencial. Este princípio foi provado pela primeira vez por arai usando argumentos dinâmicos linearizados (JOEA; JOHN, 2003), e é a base para a modelagem no espaço das juntas e no espaço Cartesiano. A Tabela 2.1 apresenta os resultados (ASSENMACHER *et al.*, 1993; SILBERSCHATZ *et al.*, 1991; CAROMEL *et al.*, 1998).

Devido ao fato de que no máximo n_a coordenadas generalizadas (ângulos das juntas ou variáveis cartesianas) podem ser controladas num dado instante, o vetor de coordenadas generalizadas é dividido em duas partes, representando as coordenadas generalizadas ativas e as coordenadas generalizadas passivas (CALLAGHAN *et al.*, 1995).

Considerando um robô manipulador rígido, malha aberta, e de n -juntas em série. Seja q a representação de seu vetor de posição angular das juntas e τ a representação de seu vetor de torque. A equação dinâmica pelo método de Lagrange é dada por:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}}\right) - \frac{\partial L}{\partial q} = \tau^T. \quad (2.1)$$

TABELA 2.1 – 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

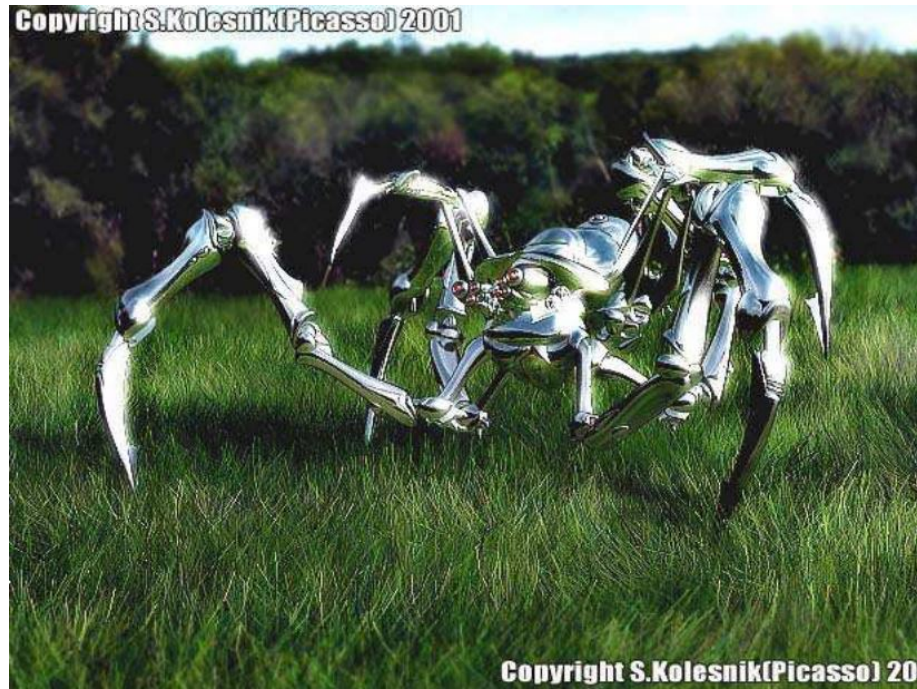


FIGURA 2.1 – Cupim cibernético.

O Lagrangiano L é definido como a diferença entre as energias cinética e potencial do sistema:

$$L = T - P \quad (2.2)$$

A energia cinética total dos ligamentos é representada:

$$T = \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} \quad (2.3)$$

3 Metodologia

3.1 Controle combinado

Conforme vimos na seção 3.1 podemos controlar um sistema nao linear como através da técnica do torque computado, usando um controlador PD dado por:

$$\tau' = \ddot{q}_d + K_v(\dot{q}_d - \dot{q}) + K_p(q_d - q) , \quad (3.1)$$

sendo q_d , \dot{q}_d e \ddot{q}_d a posição desejada, a velocidade desejada e a aceleração desejada; K_p e K_v são matrizes diagonais $n \times n$, sendo que cada elemento da diagonal é um ganho positivo e escalar.

Aqui M_{est} e b_{est} são modelos estimados da matriz de inércia, M , e do vetor de torques não inerciais, b , do robô real, respectivamente. A equação de malha fechada do sistema é:

$$\ddot{e} + K_v\dot{e} + K_pe = M_{est}^{-1}[(M - M_{est})\ddot{q} + (b - b_{est})] . \quad (3.2)$$

Em um manipulador real, podem existir distúrbios externos tais como atrito, variação de torque dos atuadores, e perturbações em virtude das cargas no robô. Se a soma destes distúrbios for definida como d_{ext} e adicionada à (3.2), teremos

$$\ddot{e} + K_v\dot{e} + K_pe = M_{est}^{-1}[(M - M_{est})\ddot{q} + (b - b_{est}) + d_{ext}] . \quad (3.3)$$

4 Resultados e discussão

Neste trabalho realizou-se o projeto de uma metodologia de controle subótimo redundante da junta passiva de um manipulador com três graus de liberdade instantaneamente. Para este propósito usou-se nas formulações o vetor gradiente de uma função escalar que estima o acoplamento entre a junta passiva e as ativas desse manipulador. Aqui a redundância foi usada da melhor maneira possível sem focalizar o efeito global. Portanto, este método deve ser denominado de *controle ótimo local por redundância*. A principal vantagem dessa formulação é a computação em tempo real, que é necessária para o controle do manipulador experimental. Além disso esse método pode ser usado com diferentes tipos de controladores, uma vez que as alterações são feitas nas equações dinâmicas do manipulador.

A consequência direta observada nessa formulação é a redução dos torques na fase de controle da junta passiva, e consequente redução da energia elétrica gasta. Isso ocorre devido ao fato de que ao longo da trajetória do manipulador o índice de acoplamento de torque tende a ser maximizado, e portanto, menor é o torque necessário nos atuadores para se conseguir o posicionamento da junta passiva do manipulador.

Outros resultados indiretos obtidos são: um movimento mais uniforme e suave do manipulador e um tempo de acomodação menor tanto no posicionamento da junta passiva quanto das ativas, conforme podemos observar nos gráficos de desempenho dos resultados apresentados. Isso ocorre porque a maximização do acoplamento entre as juntas facilita o controle. Assim ocorrem menos picos de torque, e como as juntas ativas tem “menos trabalho” para posicionar a passiva estas se movem menos na direção contrária ao movimento daquelas, diminuindo assim as velocidades alcançadas e os tempos de posicionamento.

Uma extensão deste trabalho pode ser a implementação de um *controle ótimo global por redundância* da junta passiva do manipulador. Para isto pode-se fazer o planejamento *off-line* da trajetória das juntas de modo a minimizar a energia consumida. Alguns estudos foram feitos nesse sentido, usando o Princípio Mínimo de Pontryagin, mas sem resultados satisfatórios até o momento.

5 Conclusão

lorem ipsum

Referências

ANDREW, R. M. Global co₂ emissions from cement production. **Earth System Science Data**, Copernicus GmbH, v. 10, n. 1, p. 195–217, 2018.

ASSENMACHER, H.; BREITBACH, T.; BUHLER, P.; HÜBSCH, V.; SCHWARZ, R. Panda: supporting distributed programming in L++. *In*: EUROPEAN CONFERENCE ON OBJECT-ORIENTED PROGRAMMING, 7., 1993, Kaiserslautern. **Proceedings** [...]. Berlin: Springer, 1993. p. 361–383. (Lecture Notes in Computer Science, v. 707).

CALLAGHAN, B.; PAWLOWSKI, B.; STAUBACH, P. **NFS version 3 protocol specification**: RFC 1831. London, 1995. 68 p.

CAROMEL, D.; KLAUSER, W.; VAYSSIÈRE, J. Towards seamless computing and metacomputing in Java. **Concurrency in Practice and Experience**, v. 10, n. 11–13, p. 1043–1061, available at: <http://www-sop.inria.fr/~sloop/javall/index.html>. Accessed on: 20 fev. 2000, set./nov. 1998.

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

IEA; WBCSD. **Cement Technology Roadmap 2009: Carbon Emissions Reductions up to 2050**. Paris, France and Geneva, Switzerland, 2009. Available at: <https://www.iea.org/reports/cement-technology-roadmap-2009>.

JOEA, J. G.; JOHN, J. G. Importance of coffee in computer sciences. *In*: CONFERENCE ON COFFEE IMPORTANCE, 1., 2000, Java Island. **Proceedings** [...]. Java Island: Java Island Press, 2003. p. 99–100.

SBORNIAN, W. **Um exemplo de tese de doutorado**. 2004. 169 f. Thesis (Doutorado em Aeronáutica) — Instituto de Alguma Coisa, Universidade Sei Lá de Onde, Santo Antônio da Patrulha, 2004. 1 CD-ROM.

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.

SILBERSCHATZ, A.; PETERSON, J. L.; GALVIN, P. B. **Operating system concepts**. 3rd. ed. New York: Springer, 1991.

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 Uma Seção do Primeiro Anexo

Algum texto na primeira seção do primeiro anexo.

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 22
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			