



**INSTITUTO FEDERAL**  
Rondônia



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE  
RONDÔNIA – (IFRO) CAMPUS PORTO VELHO CALAMA  
ENGENHARIA CIVIL**

**ILLAN DOS SANTOS SENA**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO MECÂNICO DE PASTAS CIMENTÍCIAS COM  
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL POR MATERIAIS POZOLÂNICOS**

**PORTO VELHO - RO**

**2025**

**ILLAN DOS SANTOS SENA**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO MECÂNICO DE PASTAS CIMENTÍCIAS COM  
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL POR MATERIAIS POZOLÂNICOS**

Monografia entregue como Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil, sob a orientação da professora Dr. Valéria Costa de Oliveira

**PORTO VELHO - RO**

**2025**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Gerador de Ficha Catalográfica do IFRO.

Sena, Illan dos Santos.  
Análise do desempenho mecânico de pastas cimentícias com  
substituição parcial por materiais pozolânicos / Illan dos Santos Sena.  
- Porto Velho, 2025.  
51 f. : il.


Orientador(a): Prof<sup>ª</sup>. Dra. Valéria Costa de Oliveira.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil)  
- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia -  
IFRO, Porto Velho, 2025.

1. sustentabilidade. 2. adições minerais. 3. desempenho mecânico. 4.  
cimento portland. 5. emissão de CO<sub>2</sub>. I. Oliveira, Valéria Costa de  
(orient.). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de  
Rondônia - IFRO. III. Título.


**Bibliotecário(a) Responsável:** Miria Santana Veiga, CRB-11/898

Aprovado em: 04/12/ 2025 pela banca examinadora.

Documento assinado digitalmente  
 **LIDIA BRUNA TELES GONZAGA**  
Data: 15/12/2025 20:03:55-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Membro da Banca: Lidia Bruna Teles Gonzaga

Documento assinado digitalmente  
 **AYRTON RODRIGUES FERREIRA**  
Data: 16/12/2025 12:15:24-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Membro da Banca: Ayrton Rodrigues Ferreira

Documento assinado digitalmente  
 **VALERIA COSTA DE OLIVEIRA**  
Data: 15/12/2025 11:16:25-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Orientador (a): Valéria Costa de Oliveira

## AGRADECIMENTOS

AGRADEÇO PRIMEIRAMENTE A DEUS PELA MINHA VIDA, PELA SABEDORIA E POR SEMPRE ILUMINAR O MEU CAMINHO DA VIDA, FORTALECENDO-ME DIA APÓS DIA PARA ENFRENTAR OS DESAFIOS DA VIDA.

AOS MEUS PAIS, LÚCIO MAURO TORRES SENA E GLEICIANE MENDONÇA DOS SANTOS, PELA EDUCAÇÃO E ENSINAMENTOS QUE ME DERAM, PELA PACIENTE DE LIDAR COMIGO E QUE SEMPRE MOTIVARAM-ME A SER UMA PESSOA MELHOR. AOS MEUS IRMÃOS QUE SEMPRE ACREDITARAM EM MIM. ESSE ESFORÇO É POR VOCÊS.

UM AGRADECIMENTO ESPECIAL A MINHA PRIMA MAYRA IHULY TORRES, QUE CONCEDEU-ME HOSPITALIDADE EM SUA CASA, POR DOIS ANOS, LOGO APÓS MINHA VINDA A PORTO VELHO PARA CURSAR A GRADUAÇÃO. NUNCA DEIXOU FALTAR NADA E ME TRATOU COMO FILHO, ATO ESTE QUE JAMAIS ESQUECEREI EM MINHA VIDA E SEREI ETERNAMENTE GRATO.

AOS MEUS AMIGOS ADQUIRIDOS DURANTE OS 5 ANOS DE CURSO, QUE FIZERAM-SE PRESENTE NAS SITUAÇÕES MAIS DIVERSAS POSSÍVEIS, COMO EM MOMENTOS DE DESCONTRAÇÃO E LAZER, MAS TAMBÉM NAS DIFICULDADES, PRINCIPALMENTE PÓS-PROVA ONDE ERA PROIBIDO COMENTAR SOBRE A MESMA.

A MINHA ORIENTADORA POR SEU EMPENHO, QUE ESTEVE PACIENTEMENTE AUXILIANDO-ME NA ESCRITA DESTE TRABALHO, COMPARTILHANDO TODOS OS SEUS SABERES QUE CONTRIBUÍRAM PARA A CONCRETIZAÇÃO DO MESMO.

E POR FIM, A TODAS AS PESSOAS ENVOLVIDAS EM TODA MINHA TRAJETÓRIA. ACREDITO QUE TUDO SE TORNA MAIS FÁCIL QUANDO SE TEM PESSOAS DE CONFIANÇA AO SEU REDOR.

## RESUMO

A construção civil é uma das maiores responsáveis pela emissão de dióxido de carbono, sendo necessário buscar alternativas sustentáveis que reduzam os impactos ambientais. Dentre essas soluções, destaca-se a substituição parcial do cimento Portland por materiais pozolânicos como metacaulim, sílica ativa e filler calcário, visando manter o desempenho mecânico das pastas cimentícias e reduzir a emissão de CO<sub>2</sub>. Este estudo tem como objetivo analisar os efeitos dessas adições sobre as propriedades das pastas cimentícias, tanto no estado fresco quanto endurecido, e verificar seu potencial como solução ambientalmente viável. A pesquisa foi desenvolvida por meio de uma revisão sistemática da literatura, com estudos publicados entre 2010 e 2025. Serão analisados estudos que abordam a substituição parcial do cimento por adições pozolânicas, observando características como resistência à compressão, trabalhabilidade, absorção de água e durabilidade. Os dados foram organizados em tabelas comparativas, permitindo identificar propriedades mecânicas e de absorção de água de pastas cimentícias quando produzidas com adições pozolânicas. Os resultados obtidos demonstraram que o uso controlado desses materiais promove melhorias no desempenho mecânico e reológico das pastas, além de representar uma estratégia eficaz para a mitigação das emissões de carbono, alinhando a construção civil a práticas mais sustentáveis.

**Palavras-chave:** sustentabilidade; adições minerais; desempenho mecânico; cimento portland; emissão de CO<sub>2</sub>.

## ABSTRACT

The construction industry is one of the largest contributors to carbon dioxide emissions, making it necessary to seek sustainable alternatives that reduce environmental impacts. Among these solutions, the partial replacement of Portland cement with pozzolanic materials such as metakaolin, silica fume, and limestone filler stands out, aiming to maintain the mechanical performance of cementitious pastes and reduce CO<sub>2</sub> emissions. This study aims to analyze the effects of these additions on the properties of cementitious pastes, both in the fresh and hardened states, and to verify their potential as an environmentally viable solution. The research was developed through a systematic literature review, with studies published between 2010 and 2025. Studies addressing the partial replacement of cement with pozzolanic additions will be analyzed, observing characteristics such as compressive strength, workability, water absorption, and durability. The data were organized into comparative tables, allowing the identification of mechanical and water absorption properties of cementitious pastes when produced with pozzolanic additions. The results obtained demonstrated that the controlled use of these materials promotes improvements in the mechanical and rheological performance of the pastes, in addition to representing an effective strategy for mitigating carbon emissions, aligning the construction industry with more sustainable practices.

**Keywords:** sustainability; mineral additions; mechanical performance; Portland cement; CO<sub>2</sub> emissions.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Emissão de CO <sub>2</sub> por toneladas de cimento produzido.....	16
Figura 2 – Fluxograma da Metodologia.....	20

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Indústria cimentícias instaladas no Brasil.....	17
Tabela 2 – Trabalhos selecionados para análise com base na metodologia PRISMA.....	23
Tabela 3 – Melhores desempenhos abordados em função das adições.....	42

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Estudos selecionados.....	23
Quadro 2 – Dosagem das pastas cimentícias com Metacaulim.....	26
Quadro 3 – Dosagem das pastas cimentícias com filler Calcário.....	27
Quadro 4 – Dosagem das pastas cimentícias com Sílica Ativa.....	27
Quadro 5 – Características do estado fresco das pastas cimentícias produzidas com adições de metacaulim em substituição parcial do cimento Portland.....	28
Quadro 6 – Dados das pastas cimentícias em função da massa de água (g).....	30
Quadro 7 – Características do estado fresco das pastas cimentícias produzidas com adições de filler calcário em substituição parcial do cimento Portland.....	31
Quadro 8 – Características do estado fresco das pastas cimentícias produzidas com adições de Sílica Ativa em substituição parcial do cimento Portland.....	33
Quadro 9 – Características do estado endurecido das pastas cimentícias produzidas com adições de metacaulim em substituição parcial do cimento Portland.....	34
Quadro 10 – Características do estado endurecido das pastas cimentícias produzidas com adições de filler calcário em substituição parcial do cimento Portland.....	36
Fonte: Próprio autor (2025).....	36
Quadro 11 – Características do estado endurecido das pastas cimentícias produzidas com adições de Sílica Ativa em substituição parcial do cimento Portland.....	38

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c	Relação água cimento
a/l	Relação água ligante
g/cm <sup>2</sup>	gramos por centímetros quadrados
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Fck	Resistência característica do concreto à compressão
ARI	Alta Resistência Inicial
CaO	Óxido de cálcio (cal)
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CP	Cimento Portland
CP II-32-E	Tipo de Cimento Portland
CP II-F-32	Tipo de Cimento Portland
CP II-F-40	Tipo de Cimento Portland
CP II-Z-32	Tipo de Cimento Portland
CP V-ARI	Tipo de Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
D50	Diâmetro médio das partículas
EA	Rigidez axial
Esp	Espalhamento (mm)
FC	Filler Calcário
Fc	Resistência à compressão axial (MPa)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de ferro
Fck	Resistência característica do concreto à compressão
HF	High Filler
Ma	Massa de água (g)
MC	Metacaulim
MCAR	Metacaulim de Alta Reatividade
MEF	Método dos Elementos Finitos
MF	Medium Filler
MgO	Óxido de Magnésio

MgCO <sub>3</sub>	Carbonato de Magnésio
MPa	Megapascal
PIB	Produto Interno Bruto
PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
QTD	Quantidade
SA	Sílica Ativa
SiO <sub>2</sub>	Dióxido de Silício
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
SO <sub>3</sub>	Óxido de Enxofre

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
1.1 Objetivos.....	12
1.1.1 Objetivo geral.....	12
1.1.2 Objetivo específico.....	12
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>14</b>
2.1 Cimento Portland.....	14
2.2 Adições Pozolânicas.....	15
2.2.1 Metacaulim.....	16
2.2.2 Filler calcário.....	16
2.2.3 Sílica Ativa.....	16
2.3 Desempenhos de pastas cimentícias.....	17
2.3.1 Reologia.....	17
2.3.2 Trabalhabilidade e consumo de água.....	17
2.3.3 Resistência à Compressão.....	17
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>19</b>
3.1 Definição do Escopo e Critérios de Seleção.....	20
3.2 Estratégia de Busca e Seleção dos Estudos.....	20
3.3 Análise e síntese dos resultados.....	20
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>21</b>
4.1 Seleção de estudos.....	21
4.2 Materiais e percentuais de substituição do cimento Portland por metacaulim, sílica ativa e filler calcário em pastas.....	24
4.2.1 Metacaulim.....	24
4.2.2 Filler calcário.....	25
4.2.3 Sílica Ativa.....	26
4.3 Análise dos resultados no estado fresco e endurecido das pastas cimentícias produzidas com metacaulim, filler calcário e sílica ativa.....	27
4.3.1 Análise dos resultados no estado fresco das pastas cimentícias produzidas com metacaulim.....	27
4.3.2 Análise dos resultados no estado fresco das pastas cimentícias produzidas com filler calcário.....	29
4.3.3 Análise dos resultados no estado fresco das pastas cimentícias produzidas com Sílica Ativa.....	30
4.3.4 Análise dos resultados no estado endurecido das pastas cimentícias produzidas com Metacaulim.....	32
4.3.5 Análise dos resultados no estado endurecido das pastas cimentícias produzidas com filler calcário.....	34
4.3.6 Análise dos resultados no estado endurecido das pastas cimentícias produzidas com Sílica Ativa.....	36
4.4 Melhores desempenhos abordados referente as adições pozolânicas.....	39
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>42</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>44</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A construção civil destaca-se por ser um dos setores que mais emitem dióxido de carbono CO<sub>2</sub>, e por isso está desenvolvendo formas sustentáveis para mitigar este impasse. Dentre elas, está a substituição de clínquer, principal componente do cimento *Portland* e que é responsável pela grande emissão de CO<sub>2</sub> na etapa de calcinação de calcário e a queima de combustível em indústrias cimenteiras (Miller, 2016). A partir disso, a conscientização provocou uma série de estudos e estratégias para mitigar esse impacto, sendo uma delas o uso de matérias-primas com substituição parcial do cimento (Jordani, 2020).

Desta forma, as adições pozolânicas podem ser utilizadas tanto na fabricação do cimento, como adicionada diretamente nas pastas cimentícias, proporcionando vantagens econômicas e ambientais, além do ganho da durabilidade e resistências mecânicas, podendo serem empregadas em diferentes funções, alterando as propriedades que a depender da aplicação, poderão ser positivas ou negativas (Medeiros *et al.* 2017)

Segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2023), houve uma redução de 17% de emissão de CO<sub>2</sub> no período de 1990 a 2022, em virtude de adições de matérias primas, substituindo em parte cimento, onde ocorreu uma redução de 84% para 71% a relação clínquer/cimento.

Com a adição destes materiais para a redução do uso cimento, é reduzida a emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera, uma vez que este gás é gerado a partir da calcinação do clínquer (Almeida, 2015), aplicando ainda mais a sustentabilidade na construção civil.

Dito Isto, este trabalho adota uma metodologia de revisão bibliográfica, através do método PRISMA, onde seleciona-se estudos ligados a adições pozolânicas como o metacaulim, sílica ativa e filler calcário, em pastas cimentícias em um período de 2010 a 2025. Posteriormente, observa-se os ensaios no estado fresco, como o espalhamento, e endurecido, como a resistência à compressão axial e resistência à tração na compressão diametral, além da absorção de água das pastas, para comparação dos diferentes teores de adição.

Com base nesse cenário, a utilização de materiais pozolânicos em pastas cimentícias torna-se uma alternativa de mitigação em impactos ambientais. Portanto, faz-se necessário realizar um estudo que verifique o desempenho das pastas cimentícias a partir destas adições, para compreensão do comportamento ao misturar-se com o cimento, certificando-se que resultados positivos serão obtidos com estes experimentos.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Analisar, por meio de uma revisão sistemática da literatura, o desempenho mecânico de pastas cimentícias produzidas com substituição parcial do cimento Portland por materiais pozolânicos, identificando seus efeitos nas propriedades no estado fresco e endurecido.

### **1.1.2 Objetivo específico**

- Sintetizar os diferentes percentuais de substituição do cimento Portland por metacaulim, filler calcário e sílica ativa reportados na literatura entre 2010 e 2025.
- Comparar as propriedades das pastas cimentícias avaliadas nos estudos selecionados, considerando os resultados no estado fresco (espalhamento, trabalhabilidade) e no estado endurecido (resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, absorção de água).
- Identificar tendências de desempenho associadas a cada tipo de adição pozolânica, destacando teores que apresentam melhoria ou redução das propriedades avaliadas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo está apresentada a fundamentação teórica referente a indústria cimenteira, cimento Portland, adições pozolânicas e seus efeitos sobre as propriedades das pastas cimentícias.

### 2.1 Cimento Portland

Segundo Guimarães (2022) o cimento Portland é de suma importância em indústrias de construção e inevitável em obras de construção civil para garantir a qualidade de serviço e bem estar dos usuários. A composição do cimento é clínquer, ou seja, mistura de calcário argila e componentes químicos, onde pode haver adição de outros materiais dependendo da caracterização a ser alcançada (ABCP,2018).

O cimento Portland é constituído principalmente por cal (CaO), sílica (SiO<sub>2</sub>), alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), magnésia (MgO) e baixa porcentagem de anidrido sulfúrico (SO<sub>3</sub>), adicionado posteriormente a calcinação, retardando o tempo de pega do produto (Pezzuri, 2022)

No Brasil, a indústria cimenteira é composta por 93 fábricas de cimentos em seu território, implicando diretamente na economia do país, com uma taxa de crescimento de 2,9% do PIB em 2023. Além disso, o consumo aparente atingiu na casa de 62,2 milhões de toneladas, uma decrescente de 0,9% em relação ao ano anterior. A Tabela 1 indica número de instalações de indústrias cimenteiras no Brasil.

**Tabela 1** - Indústria cimentícias instaladas no Brasil.

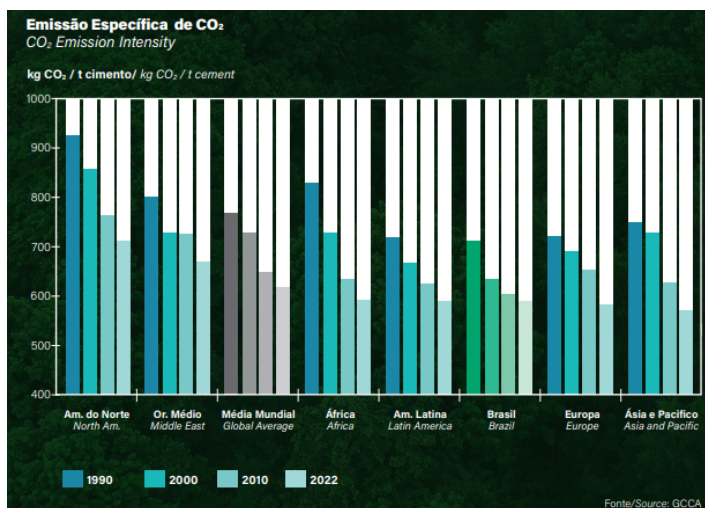
INDÚSTRIAS CIMENTÍCIAS	
QTD	REGIÃO
6	NORTE
27	NORDESTE
9	CENTRO-OESTE
38	SUDESTE
13	SUL

**Fonte:** Adaptado (Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, 2023).

Ao analisar a Tabela 1, nota-se uma grande concentração nas regiões Sudeste e Nordeste, sendo estes os principais centros de consumo do país.

Em contrapartida, a média anual de emissão de CO<sub>2</sub> foi de 580 kg/t de cimento, menor que a média mundial, com 608 kg/t. Essa redução passa muito pelas adições de matérias primas como alternativas para substituir parte do cimento em suas composições, como uso de cinzas volantes, filler calcário e argilas calcinadas Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2023). A Figura 1 aborda o comparativo de emissão de CO<sub>2</sub> nos últimos 30 anos.

**Figura 1** – Emissão de CO<sub>2</sub> por toneladas de cimento produzido.



Fonte: (Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, 2023).

Nota-se que existe uma redução na emissão do CO<sub>2</sub>. Isso acontece porque no decorrer dos anos foram tomadas decisões estratégicas para mitigar esse problema. A adição de materiais pozolanas, como metacaulim, fillers calcários e sílicas, são uma das medidas adotadas para substituição de parte do cimento em pastas, diminuindo o consumo deste material e, conseqüentemente, a emissão de CO<sub>2</sub>.

## 2.2 Adições Pozolânicas

A pozolana é um material cimentício natural ou artificial, contendo sílica de forma ativa. O material natural pode ser de origem vulcânica e sedimentar, enquanto que a artificial são materiais industriais unificados a partir de tratamentos térmicos. Este material silicoso ou sílico-aluminoso inicialmente não apresenta características cimentícias, uma vez que essas propriedades só serão tomadas a partir da presença de umidade, onde ocorre a reação química com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente (Ribeiro, 2019).

As pozolanas atuam de duas formas no concreto: fisicamente como filler, onde suas partículas da adição mineral ocupam os vazios entre os grãos de cimento tornando a pasta menos porosa, e quimicamente quando por meio de reações pozolânicas. As principais adições utilizadas são o metacaulim, sílica ativa e o filler calcário.

### **2.2.1 Metacaulim**

O metacaulim deriva da calcinação de argilas cauliníticas moídas em temperaturas baixas, formando um material pozzolânico com o Metacaulim de Alta Reatividade (MCAR). A caulinita, deve ser posta a uma temperatura entre 400° C a 550° , para desenvolver propriedades pozolânicas. A partir disso, o metacaulim começa a proporcionar características como alto consumo de água, aumento de trabalhabilidade, melhor desempenho reológico, aumento de resistências mecânicas, além da durabilidade em virtude da diminuição de vazios (Rodrigues, 2014).

Carmo *et al.* (2008), concluiu a partir de ensaios realizados que a utilização de 8% de MCAR, proporciona um aumento na resistência à compressão, bem como na trabalhabilidade, e propriedades mecânicas, além da redução de aproximadamente 17% no custo do concreto.

### **2.2.2 Filler calcário**

O filler é uma adição mineral com intuito de ajudar na diluição do cimento, melhorando a junção do material seco. De forma controlada, a necessidade de água é reduzida, mas mantendo o mesmo comportamento reológico desejável (Cecel, 2019).

Este material pode não só substituir o clínquer na fábrica, mas também substituir o ligante na aplicação em argamassas, com teores que podem chegar a 70% sem interferência na resistência, desde que haja uma diminuição na relação a/c (JOHN *et al.*, 2018).

A produção do filler exige apenas o uso de energia para moagem de seu material primário e não para calcinação, garantindo uma vantagem econômica, além de obter mais CO<sub>2</sub> presente na atmosfera, uma vez que as argamassas com filler apresentam uma taxa de carbonatação mais acelerada em comparação às que não fazem uso do material (Nascimento, 2023).

### **2.2.3 Sílica Ativa**

A Sílica Ativa (SA) resultado de processos industriais, como a utilização de ferro silício a uma temperatura elevada de aproximadamente 2000°C, obtém alto teor de dióxido de silício amorfo (SiO<sub>2</sub>), produzido durante a redução de quartzo puro (Silva, 2004).

Este material permite um melhor desempenho mecânico de pastas cimentícias, através da união com o filler e a pozolana, tornando o material mais uniforme (Hoffmann, 2001).

Para Hermann *et. al* (2016), é sugerível que o teor de sílica varie de 5% a 15% em relação a utilização de cimento, garantindo melhor trabalhabilidade das pastas, uma vez que suas partículas miúdas reduzem o vazio, aumentando a resistência, além de um consumo menor de água.

#### **2.2.4 Reologia**

A reologia é o estudo que analisa as deformações de um fluido, advindas de tensões aplicadas. O material pode estar nos três estados físicos da matéria, ou seja, sólido, líquido ou gasoso. A deformação sólida atua no que diz respeito a mudanças no volume, ou forma, enquanto que os estados líquido e gasoso estão ligados ao escoamento, onde a deformação está em função da tensão aplicada (Barra, 2016).

#### **2.2.5 Trabalhabilidade e consumo de água**

A adição de partículas finas ajudam na redução de vazios, contribuindo assim para redução da exsudação e segregação da pasta cimentícia. O aumento no volume de solos em relação a quantidade de água proporciona uma maior plasticidade e maior coesão. Por outro lado, o formato das partículas polares é quem delimita o consumo de água. As cinzas volantes necessitam de uma quantidade menor de água, uma vez que seu formato esférico é de melhor dispersão, enquanto que o metacaulim e sílica, por sua extrema finura, necessitam de mais água. Para contornar este impasse, é necessário a utilização de adições superplastificantes, que irão manter a mesma trabalhabilidade, protegendo as propriedades mecânicas e durabilidade do concreto (Almeida, 2015).

#### **2.2.6 Resistência à Compressão**

O uso de adições pozolânicas, como a cinza casca de arroz, promove uma maior resistência a compressão, uma vez que essa adição permite o refinamento dos poros e dos cristais presentes na pasta de cimento, possibilitando o aumento dessa resistência. Há outros fatores que contribuem para o ganho da resistência, tais como: a quantidade e qualidade do material, a relação a/com o superplastificante e o tipo de cura, tendo em vista que a ativação térmica é beneficiada em altas temperaturas (Almeida, 2015).

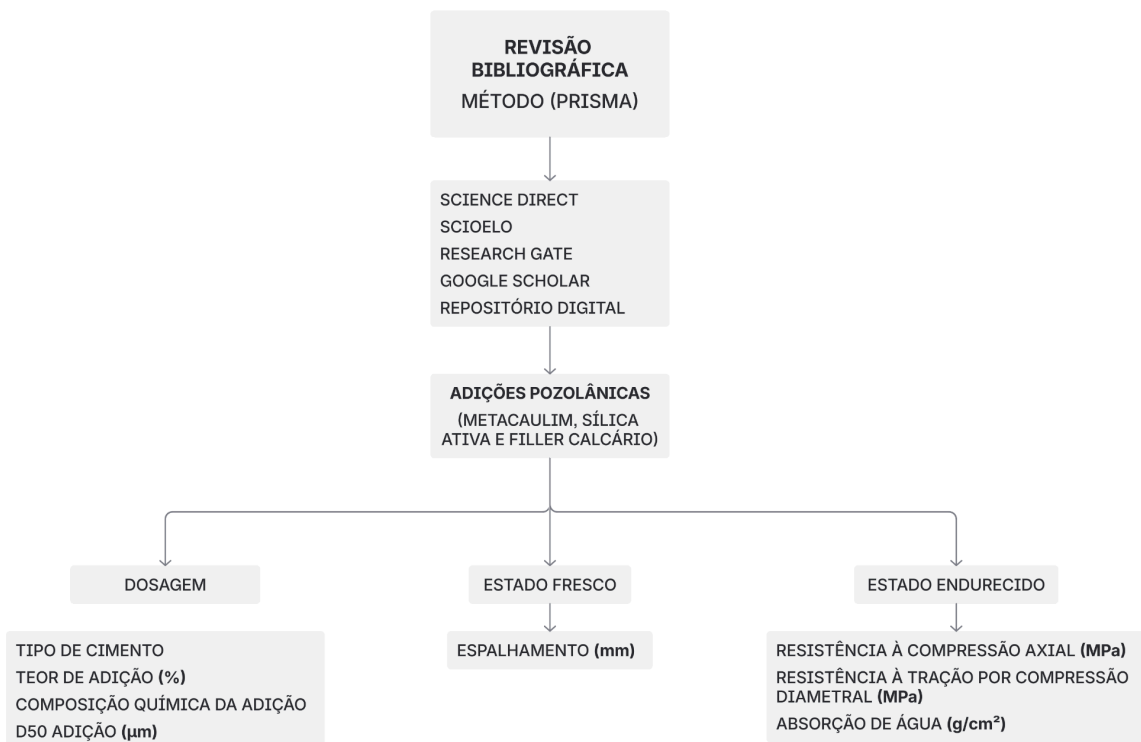
Mehta (1989), um período inicial de hidratação de 1 a 3 dias permite que a sílica contribua para resistência de um determinado concreto, onde a contribuição significativa é com 28 dias de idade.

### 3 METODOLOGIA

A metodologia adotada consiste em uma revisão sistemática da literatura sobre o uso de adições pozolânicas empregadas em pastas cimentícias, conduzida de acordo com as diretrizes do método PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) (Page *et al.*, 2021). Na sequência, com base nos dados coletados por meio de revisão bibliográfica sistemática, foi realizada uma demonstração dos principais resultados das propriedades mecânicas e da absorção de água das pastas cimentícias produzidas com metacaulim, sílica e *filler* calcário. O processo de pesquisa foi estruturado em etapas bem definidas, considerando o levantamento bibliográfico de dados empregados em diferentes estudos, com o intuito de analisar e comparar resultados da utilização de diferentes teores de adições pozolânicas empregados em pastas de cimento, caracterizando suas propriedades, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido.

A Figura 2 apresenta o fluxograma com base na metodologia utilizada neste estudo.

**Figura 2** – Fluxograma da Metodologia



Fonte: Próprio Autor (2025).

### **3.1 Definição do Escopo e Critérios de Seleção**

O estudo foi desenvolvido com o objetivo de avaliar os efeitos da substituição parcial ou total do cimento Portland por adições pozolânicas de metacaulim, sílica ativa e *filler* calcário. Para isso, serão adotados critérios rigorosos de inclusão e exclusão de publicações. Foram selecionados apenas artigos publicados em periódicos indexados entre janeiro de 2010 e setembro de 2025, classificados como research articles e que abordem especificamente a substituição de metacaulim, sílica ativa e *filler* calcário por cimento Portland, de forma a minimizar a emissão de CO<sub>2</sub>.

Foram excluídas publicações que não tratam diretamente da temática investigada, bem como aquelas que contêm dados incompletos, inconclusivos ou que não apresentam metodologia claramente definida. Foram também utilizados sites de pesquisas como Google Scholar, Research Gate, Science Direct, além de repositórios digitais das Universidades Nacionais.

### **3.2 Estratégia de Busca e Seleção dos Estudos**

A busca bibliográfica foi realizada em base de dados como ScienceDirect, SciELO, Researchgate, Google Scholar e Repositórios Digitais, utilizando a combinação de palavras-chave "adições pozolânicas" AND "cimento Portland". Posteriormente, foram analisados os diferentes estudos encontrados, verificando a relação, através do resumo, materiais utilizados, resultados e discussões, com os critérios estabelecidos.

Após esta etapa, estudos que não atendem aos critérios foram descartados, e para aqueles selecionados, foi feita uma análise mais aprofundada para conhecimento dos dados fornecidos e as discussões que os autores apresentavam.

### **3.3 Análise e síntese dos resultados**

Os estudos selecionados foram organizados e categorizados com base em diversos aspectos, incluindo o objetivo da pesquisa, o tipo de adição pozolânica analisado, as características das adições utilizadas, os percentuais de substituição aplicados às adições, os ensaios realizados, as principais limitações identificadas e os impactos ambientais associados.

As informações extraídas foram sistematizadas em tabelas e quadros comparativos, permitindo a identificação de padrões, tendências e lacunas na literatura. Esse processo possibilitará uma análise crítica dos avanços e desafios na utilização de adições pozolânicas de metacaulim, sílica ativa e *filler* calcário como material de substituição do Cimento Portland.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através da revisão sistemática, foram coletados primeiramente, 16 estudos que abordam sobre as adições pozolânicas, como o metacaulim, sílica ativa e o filler calcário, ambos dentro dos critérios estabelecidos para a seleção de estudos, como apresentado na Tabela 2. Os resultados foram organizados e discutidos conforme os principais aspectos analisados em cada estudo.

**Tabela 2** – Trabalhos selecionados para análise com base na metodologia PRISMA.

Ano	Referências
2011	Dourado <i>et al.</i> (2011)
2018	Gonçalves (2018)
2019	Oliveira (2019), Cecel (2019)
2020	Sequeira, <i>et al.</i> (2020)
2021	Costa (2021), Filho (2021), Amaral, <i>et al.</i> (2021)
2022	Costa (2022)
2023	Cavalheiros (2023), Lima (2023)
2024	Paulino <i>et al.</i> (2024), Menezes (2024), Ferreira (2024), Santos (2024)
2025	Ruhnke <i>et al.</i> (2025)

**Fonte:** Próprio Autor (2025).

Por outro lado, alguns estudos tiveram de ser descartados, não atendendo aos requisitos exigidos neste trabalho. O estudo de Oliveira (2019) foi descartado, tendo em vista que os ensaios realizados não são os exigidos por este trabalho, levando a conclusão que os objetivos de análise do autor foram características mineralógicas, físicas e químicas; ensaio de fluxos. Pelo mesmo motivo, os estudos de Filho (2021), Lima (2023) e Amaral *et al.* (2021) não foram levados em consideração, como se observa na Tabela 3, os ensaios não compatibilizam com os requeridos, estes especificados nos objetivos. Já Costa (2021) e Dourado *et al.* (2011), foram desconsiderados porque seu estudo é aplicado em concreto, e não em pastas cimentícias, tornando-se impróprio para este estudo.

#### 4.1 Seleção de estudos

Os estudos selecionados foram definidos com base em seus experimentos e dados fornecidos a partir das referências bibliográficas que apresentaram as propriedades mecânicas e de absorção de água de pastas quando o cimento Portland é substituído parcialmente por adições de metacaulim, sílica ativa e *filler* calcário.

Desta forma, verificou-se o teor de adição pozolânica empregado para substituir parte do CP e a influência no comportamento de pastas cimentícias. Para isso, os estudos deveriam apresentar os ensaios executados a fim de obter os dados necessários para avaliação e caracterização, tanto em estudo reológico, como a trabalhabilidade, e propriedades mecânicas (resistências de compressão e resistência à tração por compressão diametral) e absorção de água. Outros fatores também foram levados em consideração, como o tipo de cimento e a composição química e diâmetro dos grãos das adições pozolânicas.

A seguir, serão apresentadas em tabelas, as características de cada estudo, separando-as por fases como a dosagem e os ensaios, no estado fresco e endurecido, além da análise individual para cada composição. O Quadro 1 mostra os estudos selecionados.

**Quadro 1** – Estudos selecionados com base no método PRISMA.

<b>Autor</b>	<b>Tipo de adição</b>	<b>Cimento</b>	<b>Percentual de adição (%)</b>	<b>Absorção de água (g/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Principais ensaios</b>
Dourado <i>et al.</i> (2011)	Metacaulim	CP II-F-32.	0, 5, 8 e 10	0% = 0,0454 5% = 0,0414 8% = 0,0281 10% = 0, 0292	Abatimento do tronco de cone; Resistência à compressão axial; Resistência à tração por compressão diametral; módulo de elasticidade e absorção de água.
Oliveira (2019)	Metacaulim	CP V – ARI	10, 15 e 20	Não executou.	Características mineralógicas, físicas e químicas; Ensaio de fluxos.
Costa (2021)	Metacaulim	CP V – ARI	0, 5, 10 e 20	0% = 0,0513 5% = 0,0254 10% = 0,0501 20% = 0,0487	Resistência à compressão axial; Absorção de água por imersão.
Filho (2021)	Metacaulim	CP V – ARI	10 e 20	Não executou	Granulometria a laser; Fluorescência de raios-x; Difração de raio-x

Costa (2022)	Metacaulim	CP V – ARI	20	0,1125	Índice de consistência; densidade de massa e teor de água; porosidade e resistência à compressão .
Cavalheiros (2023)	Metacaulim	CP V - ARI	10, 15 e 20	10% = 0,046 15% = 0,1 20% = 0,1	Espalhamento; Resistência à compressão Axial; Resistência à tração por compressão diametral ; Absorção de água por capilaridade; Densidade de massa.
Ferreira (2024)	Metacaulim	CP II F–40	5, 10 e 15	Não apresentou	Espalhamento; Resistência à compressão axial e tração na flexão.
Paulino <i>et al.</i> (2024)	Metacaulim	CP V - ARI	0, 10 e 20	0% = 0,252 10% = 0,279 20% = 0,75 (as 36h)	ensaio de consistência, teor de ar incorporado, resistência à compressão e flexão, densidade de massa, teor de absorção,
Cecel (2019)	Filler calcário	CP V-ARI	43 e 70		Abatimento; Resistência à compressão axial e compressão da tração na flexão.
Sequeira, <i>et al.</i> (2020)	Filler calcário	CP V -ARI	0, 10, 20 e 30	0% = 0,016 10% = 0,013 20% = 0,01 30% = 0,0125	absorção de água; resistência à tração na flexão e compressão; resistência potencial de aderência à tração
Costa (2022)	Filler calcário	CP V – ARI	20	0,1387	Índice de consistência; densidade de massa e teor de água; porosidade e resistência à compressão .
Lima (2023)	Filler calcário	CP V-ARI	10, 35 e 50	Não executou	Refletância Solar; Emitância Térmica; Rugosidade; Intensidade de Carbono da refletância.

Ruhnke, <i>et al.</i> (2025)	Filler calcário	CP II-Z-32,	15, 20 e 25	0%= 0,598 15%= 0,493 20%= 0,395 25%= 0,327	teor de ar incorporado, squeeze flow; absorção de água; resistência à tração e compressão; módulo de elasticidade.
Gonçalves (2018)	Sílica Ativa	CP V – ARI	10, 15, 20 e 25	Não executou	Resistência à Compressão; Densidade; Porosidade;
Amaral, <i>et al.</i> (2021)	Sílica Ativa	CP V – ARI	5, 10, 15 e 20	Não executou	Granulometria a laser; Cinética das reações de hidratação.
Cavalheiros (2023)	Sílica ativa	CP V - ARI	10, 15 e 20	10% = 0,044 15% = 0,02068 20% = 0,04	Espalhamento; Resistência à compressão Axial; Resistência à tração compressão diametral ; Absorção de água por capilaridade; Densidade de massa.
Menezes, (2024)	Sílica ativa	CP II-Z-32,	15, 25 e 35	15% = 0,12 25% = 0,1446 35% = 0,1226	Slump flow; V-funnel; Resistência à compressão axial, Resistência à tração por compressão diametral e absorção de água
Santos <i>et al.</i> (2024)	Sílica ativa	CP II–32–E	5, 8 10 e 15	Não executou	Abatimento; Resistência à compressão axial.

Fonte: Próprio autor (2025).

O Quadro 1 apresenta os estudos selecionados para análise, onde foram observados os dados fornecidos e ensaios realizados para saber se compatibiliza ou não com os objetivos deste trabalho.

#### **4.2 Materiais e percentuais de substituição do cimento Portland por metacaulim, sílica ativa e filler calcário em pastas.**

Neste tópico serão apresentados os materiais e os percentuais de substituição de cimento Portland por metacaulim, sílica ativa e filler calcário em pastas. Portanto, as Tabelas

4, 5 e 6 apresentam as dosagens utilizadas, isto é, o tipo de cimento, teor de adição utilizado, o diâmetro médio das partículas das adições e a composição química, todas elas referentes às suas respectivas adições.

#### 4.2.1 Metacaulim

No Quadro 2 é abordado os materiais utilizados para a dosagem das pastas cimentícias com adição de metacaulim.

**Quadro 2** – Dosagem das pastas cimentícias com Metacaulim.

Autor	Tipo de cimento	Percentual de adição (%)	D50 da adição (µm)	Composição química da adição (%)
Filho et al. (2020)	CP V – ARI	10 e 20	3,48	SiO <sub>2</sub> (67,658) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (24,387) Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (4,849)
Cavalheiros (2023)	CP V – ARI	10, 15 e 20	Não Informado	SiO <sub>2</sub> (50–56) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (35–44,5)
Paulino, et. al (2024)	CP V – ARI	10, 20 e 30	0,84 a 22,66	SiO <sub>2</sub> (49,74) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (36,74) Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ( 7,24)
Ferreira (2024)	CP II F–40	5, 10 e 15	4,8	SiO <sub>2</sub> (59,50) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (33,50) Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (1,50)
Costa (2022)	CP V – ARI	20	1,8 a 2	SiO <sub>2</sub> (57) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (34) Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (2)

**Fonte:** Próprio autor (2025).

Com base no Quadro 2, nota-se que o intervalo dos teores de adições pozolânicas para substituição parcial do CP variam de 5% a 30%, sendo os mais usados os de 10% e 20%.

O cimento utilizado predominantemente foi o CP V – ARI, uma vez que esse possui valores mínimos de adições em sua composição (Filho, 2021) e ainda o CP–II–F–40, este apenas por ser o fornecido no local onde o estudo foi realizado.

O D50 da adição de metacaulim variou de 0,84 a 22,66 µm . Com relação a composição química, observou-se a soma  $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 \geq 70\%$ , que é o mínimo exigido pela NBR 12653 (ABNT, 2014) para realização de atividades pozolânicas.

#### 4.2.2 Filler calcário

O Quadro 3 apresenta as características de dosagem utilizadas nos estudos de *filler* calcário, como o tipo de cimento e o teor de adição e diâmetro médio das partículas e composição química da adição.

**Quadro 3** – Dosagem das pastas cimentícias com *filler* Calcário.

Autor	Tipo de cimento	Percentual de adição (%)	D50 da adição (µm)	Composição química da adição (%)
Cecel (2019)	CP V - ARI	43 e 70	2,49 a 8,83	CaCO <sub>3</sub> ≥ 94
Costa (2022)	CP V – ARI	20	1,8 a 2	CaCO <sub>3</sub> ≥ 80 MgCO <sub>3</sub> ≤ 18
Sequeira, et al. (2020)	CP V - ARI	10, 20 e 30	Não Informado	Não Informado
Ruhnke, et al (2025)	CP II–Z–32	15, 20 e 25	15	Não Informado

Fonte: Próprio autor (2025).

Com relação ao *filler* calcário, nota-se uma mínima diferença em relação ao metacaulim, onde o intervalo para o teor de adição é de 10% a 70%, sendo o de 20% o mais comum entre eles. Porém esses teores de *filler* calcário são relativamente baixos em relação ao máximo que pode ser atingido. Isso ocorre porque este material não só pode ser incorporado para substituir o clínquer na fase de fabricação, mas também pode ser empregado direto na pasta cimentícia, podendo chegar a teores de 70%, como o estudo de Cecel (2019) sem influenciar na resistência mecânica, contanto que haja mudança na relação a/c (Lima, 2023).

Os cimentos utilizados foram o CP V – ARI e o CP II–Z–32. Este último leva em sua composição 6% a 14% de pozolana, implicando em uma material com menor permeabilidade (Ritter, 2024). O D50 do filler mostra que a variação foi de 1,8 a 15 µm.

#### 4.2.3 Sílica Ativa

O Quadro 4 exhibe as composições das pastas produzidas com a substituição de CP por sílica ativa, tipo de cimento e o teor utilizado, dos diferentes estudos selecionados.

**Quadro 4** – Dosagem das pastas cimentícias com Sílica Ativa.

Autor	Tipo de cimento	Percentual de adição (%)	D50 da adição (µm)	Composição química da adição (%)
-------	-----------------	--------------------------	--------------------	----------------------------------

Gonçalves (2018)	CP V - ARI	10, 15, 20 e 25	0,2	SiO <sub>2</sub> (95)
Cavalheiros (2023)	CP V – ARI	10, 15 e 20	45	SiO <sub>2</sub> ≥85%; H <sub>2</sub> O ≤3%,
Menezes, (2024)	CP V - ARI	15, 25 e 35	4,75	Não Informado
Santos et al. (2024)	CP II–32–E	5, 8 10 e 15	0,03 a 0,3	SiO <sub>2</sub> (94)

**Fonte:** Próprio autor (2025).

Quanto aos percentuais de substituição do CP por sílica ativa, observa-se que o intervalo utilizado nos estudos variam de 5% a 35%, onde o mais utilizado foi de 15%. Esses diferentes tipos de dosagem influenciam nos resultados obtidos, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido.

O cimento predominante foi o CP V – ARI, por conta das suas características pozolânicas. Observa-se que a composição possui alto teor de SiO<sub>2</sub>, composto gasoso reativo, que é produzido durante a redução do quartzo puro, dentro de fornos elétricos com temperaturas de aproximadamente 2000° C (Silva, 2004).

O D50 abordado no estudo de Cavalheiros (2023) foi bastante elevado, podendo ter interferido nos resultados de resistência à compressão, estes que serão apresentados adiante.

### **4.3 Análise dos resultados no estado fresco e endurecido das pastas cimentícias produzidas com metacaulim, *filler* calcário e sílica ativa.**

Neste tópico serão abordados e discutidos os resultados dos estudos selecionados no estado fresco, quanto no estado endurecido, das adições de metacaulim, sílica ativa e *filler* calcário. A fim de demonstração, as tabelas elaboradas neste tópico apresentaram esses dados com clareza, de forma organizada para que as conclusões sejam tomadas de forma cuidadosa.

#### **4.3.1 Análise dos resultados no estado fresco das pastas cimentícias produzidas com metacaulim.**

O Quadro 5 apresenta os resultados de espalhamentos obtidos em função do teor de metacaulim utilizados nos seus respectivos estudos.

**Quadro 5** – Características do estado fresco das pastas cimentícias produzidas com adições de metacaulim em substituição parcial do cimento Portland.

Autor	Percentual de substituição	espalhamento das amostras com teores(mm)	Espalhamento de referência (mm)
-------	----------------------------	--	---------------------------------

	(%)		
Costa (2022)	20	140	187
Cavalheiros (2023)	10	169	–
	15	149	154
	20	150	–
Ferreira (2024)	5	99,10	–
	10	99,59	100 ± 5
	15	97,32	–
Paulino et al. (2024)	10	285	285
	20	286,67	

**Fonte:** Próprio autor (2025).

No estudo de Costa (2022), o Quadro 5 mostra que o percentual de 20% de adição do metacaulim resultou em um menor espalhamento. O autor atribui esse resultado ao diferencial tamanho das partículas do cimento e da adição, onde o metacaulim é inferior ao cimento, ocasionando assim uma maior quantidade de água para atingir a mesma trabalhabilidade.

No estudo de Cavalheiros (2023), a análise no estado fresco para espalhamento foi baseada no método de mini-abatimento desenvolvido por Kantro (1980). Para isso, o valor obtido pela pasta de referência foi de 154 mm. Desta forma, ao analisar a Tabela 4.6, observa-se que apenas a pasta com teor de 10% obteve resultado maior, com espalhamento de 169mm, enquanto que o teor de 15% apresentou 149 mm e o de 20%; 150mm. Com base nesses valores, percebe-se que o metacaulim ajuda no comportamento reológico e dispersão das pastas, porém com teores mais baixos, como o de 10% obtido.

No estudo de Ferreira (2024), para verificação do espalhamento, o autor utilizou valores para massa de água, relação a/c e a/l. Todos estes valores estão dentro do que foi proposto em sua metodologia, ou seja, 80 a 120 (mm). O Quadro 6 apresenta os dados obtidos em função da massa de água. A primeira pasta chamada de **500C00MET** refere-se aos valores de referência, tendo em vista que o teor de metacaulim nela é 0%. A pasta **475C25MET** corresponde ao teor de 5% de metacaulim incorporado. A pasta de **450C50MET** corresponde ao teor de 10% e a pasta **425C75MET** corresponde a 15% de teor de metacaulim adicionado.

**Quadro 6** – Dados das pastas cimentícias em função da massa de água (g)

<b>500C00MET</b>			<b>475C25MET</b>			<b>450C50MET</b>			<b>425C75MET</b>		
$M_a$	$E_{sp}$	$F_c$	$M_a$	$E_{sp}$	$F_c$	$M_a$	$E_{sp}$	$F_c$	$M_a$	$E_{sp}$	$F_c$
280	83,33	21,29	290	90,39	19,29	305	89,19	16,66	<b>320</b>	<b>97,32</b>	<b>15,17</b>
<b>290</b>	<b>100,18</b>	<b>20,36</b>	<b>300</b>	<b>99,10</b>	<b>18,13</b>	310	91,02	16,31	325	101,11	12,46
300	100,50	19,36	310	100,69	16,74	<b>315</b>	<b>99,59</b>	<b>16,57</b>	330	98,94	13,17
310	101,16	18,56	320	100,79	13,84	320	100,37	14,04	335	117,01	11,30
320	108,10	16,85	330	107,36	11,59	325	111,34	13,71	340	103,36	11,02
<b>Legenda:</b>			<b>Ma</b> = Massa de água (g) - <b>a/c</b> = relação água cimento - <b>a/l</b> = relação água ligante								
			<b>Esp</b> = Espalhamento (mm) - <b>Fc</b> = Resistência média à compressão axial (MPa)								

Fonte: Ferreira (2024).

Observa-se que o menor espalhamento encontra-se em **500C00MET**, com 83,33 mm, enquanto que o máximo está em **425C75MET**, com 117,01 mm. Outro fator a ser observado, é que quanto maior o teor de adição do metacaulim, menor é a resistência à compressão axial. Isso ocorre porque ao adicionar o metacaulim, a relação a/c deve aumentar para que o espalhamento fique dentro do exigido. Com isso, os resultados em negrito foram utilizados para ser usado novamente em ensaios, porém sendo incorporado em concreto permeável.

No estudo de Paulino et al. (2024), foi dividido em tempo de estabilização de 0h, 36h e 48h. No tempo de 0h, a amostra de referência obteve o mesmo valor que a de 10%, com 285 mm, e menor que a de 20% com 286,67mm. No tempo de 36h, a amostra de referência resultou em espalhamento maior que as demais, com 278,33 mm, enquanto que a de 10% apresentou 265,00 mm e a de 20%; 258,33 mm.

E por fim, para o tempo de 48h, a amostra de referência apresentou espalhamento de 273,33 mm, menor que a do tempo anterior, mais ainda maior que as demais, sendo a teor de 10% com 251,67 mm e a de 20% com 245,00 mm. Observa-se que com o passar do tempo, o espalhamento de ambas amostras decaiu. No entanto, quanto maior o teor de adição, maior será a diferença do espalhamento. O autor explica que a adição do MC pode ter gerado grandes aglomerados que reteram a água, não permitindo que ela contribuísse para a fluidez da mistura.

#### **4.3.2 Análise dos resultados no estado fresco das pastas cimentícias produzidas com *filler* calcário.**

O Quadro 7 apresenta os resultados de espalhamentos obtidos em função do teor de *filler* calcário utilizados nos seus respectivos estudos.

**Quadro 7** – Características do estado fresco das pastas cimentícias produzidas com adições de *filler* calcário em substituição parcial do cimento Portland.

Autor	Percentual de substituição (%)	Espalhamento das amostras com teores (mm)	Espalhamento de referência (mm)
Cecel (2019)	43	265	265
	70	265	265
Sequeira et al (2020)	10	236	

	20	242	236
	30	256	
Costa (2022)	20	188	187
Ruhnke, et al (2025)	15, 20 e 25	Não executou	Não executou

**Fonte:** Próprio autor (2025).

No estudo de Cecel (2019), ambas amostras com percentuais de adição atingiram o valor de referência de espalhamento. Isso ocorreu porque foi realizado ajuste na relação de água/cimento, com uma redução de 4,8% do percentual de 43% chamado de MF, e 7,7% do percentual de 70% chamado de HF, para amostras sem aditivo superplastificante. Para amostras com aditivos superplastificantes, a redução foi de 13,5% para o percentual MF e 17,8% para HF.

A partir do estudo de Sequeira (2020), observa-se que o percentual de 10% de substituição do CP por filler calcário não apresentou variação em relação à amostra de referência, ambas com 236 mm de espalhamento. Já as substituições percentuais de 20% e 30% mostraram resultados superiores, com 242 mm e 256 mm, respectivamente. Isso mostra que quanto maior o percentual de adição do *filler* calcário, maior a fluidez da argamassa. Este fato ocorre devido a finura da adição que preenche os vazios das pastas, fazendo com que a água acabe excedendo a quantidade necessária.

Já no estudo de Costa (2022), o percentual utilizado foi de 20% que obteve um espalhamento de 188 mm, próximo ao de referência, ou seja, adição conseguiu ter uma boa relação com a pasta analisada, preenchendo bem os vazios e absorvendo água, ocasionando em uma boa trabalhabilidade.

#### **4.3.3 Análise dos resultados no estado fresco das pastas cimentícias produzidas com Sílica Ativa.**

O Quadro 8 apresenta os resultados de espalhamentos obtidos em função do teor de sílica ativa utilizados nos seus respectivos estudos.

**Quadro 8** – Características do estado fresco das pastas cimentícias produzidas com adições de Sílica Ativa em substituição parcial do cimento Portland.

Autor	Percentual de substituição (%)	Espalhamento das amostras com teores(mm)	Espalhamento de referência (mm)
Gonçalves (2018)	10, 15, 20 e 25	Não executou	Não executou
Cavalheiros (2023)	10	150	–
	15	133	154
	20	138	–
Menezes (2024)	15	340	Não Informado
	25	370	
	35	320	
Santos et al (2024)	5	132,00	–
	8	128,40	137,70
	10	144,80	–
	15	108,95	–

**Fonte:** Próprio autor (2025).

No estudo de Cavalheiros (2023), a análise no estado fresco para espalhamento foi baseada no método de mini-abatimento desenvolvido por Kantro (1980). Com isso, o valor de espalhamento da amostra de referência foi de 154 mm. Este valor foi superior a todas as amostras com teores de adição da sílica ativa, onde o teor de 10% obteve espalhamento de 150 mm, teor de 15%; 133 mm e o teor de 20%; 138 mm. Desta forma, nota que a sílica ativa apresenta uma menor dispersão de partículas se comparada a adição de metacaulim do mesmo estudo.

No estudo de Menezes (2024), foram utilizadas amostras com teores de 15%, 25% e 35%, com relação de a/c = 0,68, e três amostras de 15%, variando a relação de a/c em 0,68, 0,63 e 0,55. Com relação a variação dos percentuais de substituição, o de 15% apresentou espalhamento de 340 mm, enquanto que o de 25% foi 370 mm e o de 35%; 320 mm. Estes altos valores de espalhamentos ocorreu pela quantidade extra de superplastificantes utilizados nos ensaios, ocasionando nas segregações ocorridas.

A partir do estudo de Santos et al. (2024), com os valores apresentados na Tabela 9, observa-se que quanto maior o valor da adição, mais longe fica do resultado de referência. Isso foi demonstrado para a substituição de 15%, que o valor do espalhamento foi de 108,95 mm, implicando que não houve uma boa trabalhabilidade. Em contrapartida, a substituição de 5% foi o mais próximo, com 132 mm de espalhamento. Os demais tiveram resultados superiores ao de referência, o que indica também uma boa trabalhabilidade.

#### 4.3.4 Análise dos resultados no estado endurecido das pastas cimentícias produzidas com Metacaulim.

Neste tópico serão exibidos resultados e discussões das influências de teores de adição por metacaulim no estado endurecido. O Quadro 9 apresenta os dados como a resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e absorção de água.

**Quadro 9** – Características do estado endurecido das pastas cimentícias produzidas com adições de metacaulim em substituição parcial do cimento Portland.

Autor	Percentual de adição (%)	Resistência à Compressão axial (MPa)	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	Absorção de água (g/cm <sup>2</sup> )
		28 dias	28 dias	
Costa (2022)	0	40	–	–
	20	47	–	–
Cavalheiros (2023)	0	44,69	3,46	0,033
	10	36,71	3,52	0,044
	15	34,27	4,12	0,021
	20	59,18	2,96	0,04
Ferreira (2024)	0	44,48	–	–
	5	35,55	–	–
	10	32,46	–	–
	15	33,04	–	–
Paulino et al. (2024)	0	12,45	–	0,252
	10	19,59	–	0,279
	20	15,34	–	0,75

Fonte: Próprio autor (2025).

No estudo de Costa (2022) o percentual de adição utilizado foi o de 20% de metacaulim em substituição parcial do Cimento Portland, além da pasta de referência, nas idades de 7, 28 e 90 dias. No resultado de resistência à compressão axial, observou-se um resultado positivo em relação à referência. Na idade de 28 dias, o percentual de substituição de 20 % obteve resistência de 47 MPa contra 40 MPa para o de referência. Já na idade de 91 dias, o teor de 20% resultou em resistência de 50 MPa contra 48 MPa para o de referência. Conforme o autor, pode ser explicado porque a reação pozolânica é relativamente lenta, uma vez que carece de presença de hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento.

No estudo de Cavalheiros (2023), os teores utilizados foram de 10%, 15% e 20% da adição de metacaulim em substituição parcial do Cimento Portland, além da pasta de referência. Para a resistência à compressão axial, a Tabela 10 mostra que o teor de 20% foi bem alto, com 59,28 MPa, superando o de 15% com 34,27 MPa e o de 10% com 36,71 MPa, estes que foram menores que o de referência, que obteve resistência de 44,69 MPa.

Já para a resistência à tração por compressão diametral, o teor de 15% apresentou o desempenho melhor, com resistência de 4,12 MPa, superando o de 20% com 2,96 MPa, o de 10% com 3,52 MPa e o de referência com 3,46 MPa. Essas análises foram feitas com a idade de 28 dias, conforme NBR 7215 (ABNT, 2019).

Para absorção de água por capilaridade, baseando-se na NBR 15259 (ABNT, 2005), o teor de 15% apresentou melhor desempenho, com pico aos 15 minutos, obteve uma absorção de 0,01 g/cm<sup>2</sup>, permanecendo até os 30 minutos e caindo posteriormente. O teor de 10% apresentou maior absorção, onde aos 15 minutos, a absorção foi de 0,046 g/cm<sup>2</sup>.

No estudo de Ferreira (2024), foi necessário reduzir o teor de água. Isso ocorreu porque a pasta de referência apresentava uma alta fluidez. Desta forma, essa redução do teor de água ocasionou no aumento de resistência à compressão axial das amostras, evidenciada na Tabela 11.

No estudo de Paulino et al., (2024), os teores utilizados foram de 10% e 20% da adição de metacaulim em substituição parcial do Cimento Portland, além da pasta de referência. Para a resistência à compressão axial, observou-se que o teor de 10% apresentou uma maior resistência, com 19,59 MPa, já o de 20% apresentou resistência de 15,34 MPa, que por sua vez foi maior que o de referência, com 12,45 MPa.

Quanto a absorção de água, o teor de 20% apresentou uma grande absorção após 36h de estabilização, com valor de 0,75 g/cm<sup>2</sup>, enquanto que o de 10% nas mesmas condições resultou no valor de absorção de 0,279 g/cm<sup>2</sup>, e o de referência com o valor de 0,252 g/cm<sup>2</sup>. O

autor defende que esse fenômeno por ter ocorrido pelo fato que o metacaulim tem origem em argila, ou seja, absorve mais água.

#### 4.3.5 Análise dos resultados no estado endurecido das pastas cimentícias produzidas com *filler* calcário.

Neste tópico serão exibidos resultados e discussões das influências de teores de adição por *filler* calcário no estado endurecido das pastas. O Quadro 10 apresenta os dados das propriedades de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e absorção de água.

**Quadro 10** – Características do estado endurecido das pastas cimentícias produzidas com adições de *filler* calcário em substituição parcial do cimento Portland.

Autor	Percentual de adição (%)	Resistência à Compressão axial (MPa)		Resistência à tração por compressão diametral (MPa)		Absorção de água (g/cm <sup>2</sup> )
		28 dias	90 dias	28 dias	90 dias	
Cecel (2019)	0	–	39,4	–	1,7	–
	43	–	54,3	–	1,3	–
	70	–	47,7	–	2,9	–
Sequeira et al. (2020)	0	8,96	–	2,49	–	–
	10	8,17	–	2,06	–	–
	20	8,17	–	1,97	–	–
	30	4,16	–	1,60	–	–
Costa (2022)	0	40	48	–	–	–
	20	33	36	–	–	–
Ruhnke et al. (2025)	0	2,69	–	1,06	–	0,598
	15	2	–	0,82	–	0,493
	20	1,71	–	0,68	–	0,395
	25	1,47	–	0,59	–	0,327

Fonte: Próprio autor (2025).

No estudo de Cecel (2019) observa-se que os teores de adição obtiveram resultados positivos comparados aos de referência no ensaio de resistência à compressão axial. A amostra com teor de 43% obteve a maior resistência, com 47,7 MPa, seguida da amostra com

teor de 70%, com resistência de 54,3 MPa. O autor acredita que estes valores podem estar ligados ao fato de que não houve preservação de temperatura para as amostras, sendo submersas apenas 5 minutos antes dos ensaios. Com relação a resistência da tração por compressão diametral, a amostra com teor de 43% obteve o menor valor, de 1,3 MPa, menor até mesmo que a de referência, que foi de 1,7 MPa, enquanto que a amostra com teor de 70% obteve resistência de 2,9 MPa.

No estudo de Sequeira et al., (2024), os teores utilizados foram de 10%, 20% e 30% da adição de *filler* calcário em substituição parcial do Cimento Portland, além da pasta de referência. Em relação a resistência à compressão, baseando se na NBR 13279 (ABNT, 2005), os teores de 10% e 20% obtiveram os valores de 8,17 MPa. O percentual de substituição de 30% apresentou resistência à compressão de 4,16 MPa. Desta forma, verifica-se que todas as dosagens apresentaram propriedade mecânica menor que a da pasta de referência, com 8,96 MPa.

Para a resistência à tração por compressão diametral, o teor de 10% apresentou melhor desempenho em relação aos demais teores, onde apresentou 2,06 MPa. O teor de substituição de 20% resultou em 1,97 MPa e o de 30%; 1,60 MPa. Porém, mostraram resistência mecânica inferior ao traço de referência, que resultou em 2,49 MPa. Observa-se que quanto maior o teor de adição, menor é a resistência. O autor informa que isso ocorre devido o cimento atuar como um ligante entre as partículas de agregados submetidas a estes ensaios, comportamento que o *filler* não apresenta.

No estudo de Costa (2022), foi utilizado o teor de 20% da adição de *filler* calcário em substituição parcial do Cimento Portland, além da pasta de referência. Para os valores de resistência à compressão, o teor de 20% apresentou valores menores que o traço de referência. Na idade de 28 dias, o teor de 20% obteve resistência de 33 MPa contra 40 MPa da pasta de referência. Na idade de 91 dias, o teor de 20% resultou em resistência de 36 MPa contra 48 MPa.

No estudo de Ruhnke, et al (2025), os teores utilizados foram de 15%, 20% e 25% da adição de *filler* calcário em substituição parcial do Cimento Portland, além da pasta de referência. Assim como nos outros estudos, as pastas com adições de *filler* calcário tiveram valores menores que traço de referência, tanto na compressão, quanto na resistência à tração por compressão diametral.

Quanto aos valores obtidos para a resistência à compressão, a pasta de referência obteve 2,69 MPa, o teor de 10%; 2 MPa, o de 20%; 1,71 MPa e o de 25% ; 1,47 MPa. Os valores obtidos de resistência à tração por compressão diametral foram de 1,06 MPa para a pasta de

referência, de 0,82 MPa para o teor de substituição de 10%; de 0,68 MPa para o teor de 20% e de 0,59 MPa para o teor de 25%. Observa-se, nos estudos, que quanto maior o teor de adição, menor é a resistência mecânica.

#### 4.3.6 Análise dos resultados no estado endurecido das pastas cimentícias produzidas com Sílica Ativa.

Neste tópico serão exibidos resultados e discussões das influências de teores de adição por sílica ativa no estado endurecido. O Quadro 11 apresenta os dados como a resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e absorção de água.

**Quadro 11** – Características do estado endurecido das pastas cimentícias produzidas com adições de Sílica Ativa em substituição parcial do cimento Portland.

Autor	Percentual de adição (%)	Resistência à Compressão axial (MPa)		Resistência à tração por compressão diametral (MPa)		Absorção de água (g/cm <sup>2</sup> )
		7 dias	28 dias	7 dias	28 dias	
Gonçalves (2018)	10	–	107	–	–	–
	15	–	121	–	–	–
	20	–	88	–	–	–
	25	–	130	–	–	–
Cavalheiros (2023)	10	–	32,80	–	2,86	0,04
	15	–	32,72	–	3,93	0,02
	20	–	24,64	–	2,06	0,04
Menezes (2024)	15	13,39	31,99	3,4	4,71	12%
	25	19,70	30,59	2,31	2,95	14,46%
	35	22,39	25,74	2,02	3,26	12,26%
Santos et al (2024)	5	15,58	–	–	–	–
	8	19,76	–	–	–	–
	10	17,83	–	–	–	–
	15	9,01	–	–	–	–

Fonte: Próprio autor (2025).

No estudo de Gonçalves (2018), observa-se que o teor de 25% obteve maior resistência à compressão axial, com valor de 130 MPa. A redução para 15% não resultou em

grande perda de resistência, podendo ser empregada para dosagem de pastas de cimento. A explicação provável é o fato de ter reduzido a quantidade de materiais finos, acarretando uma menor retenção de água, possibilitando uma hidratação e reação pozolítica mais eficiente.

No estudo de Cavalheiros (2023), os teores utilizados foram de 15%, 20% e 25% da adição de Sílica Ativa em substituição parcial do Cimento Portland, além da pasta de referência.

Para análise da resistência por compressão axial, a pasta de referência obteve valores maiores do que as que possuíam teores de adições. A pasta de referência apresentou valor de 44,69 MPa, o teor de 10%; 32,8 MPa, o teor de 15%; 32,72 MPa e o teor de 20% resultou no valor de 24,64 MPa. A autora acredita que a velocidade de mistura dos materiais não conseguiu desaglomerar as partículas de sílica e que o aditivo plastificante retardador pode ter contribuído para a não obtenção de resistência à compressão nas primeiras idades. Ela afirma ainda que foram utilizados 6 corpos de provas com adição de sílica não peneirada, e que isso acarretou em baixos valores de resistência à compressão, comprovando assim a primeira hipótese da mesma.

Na resistência por tração por compressão diametral, o teor de 15% apresentou o melhor desempenho, com 3,93 MPa, seguido da pasta de referência com 3,46 MPa, o teor de 10%; 2,86 MPa e teor de 20%; 2,06 MPa. Desta forma, a autora comparou seu trabalho com de outro autor, e ao contrário do que afirma, no trabalho dela, com exceção do teor de 15%, os demais não tiveram boa resistência nas primeiras idades.

Em relação à absorção de água, o teor de 15% obteve um menor valor de absorção de água em seu pico, que foi de 0,02068 g/cm<sup>2</sup> em apenas 15 minutos e depois estabilizando em 0,01 g/cm<sup>2</sup>. O teor de 10% foi o que mais absorveu água, com 0,044 g/cm<sup>2</sup> em 5 minutos, e depois decaindo para 0,01 g/cm<sup>2</sup>. Já o teor de 20% apresentou valores similares aos de 15%, com seu maior resultado de 0,04 g/cm<sup>2</sup> em 15 minutos. A autora cita que esses valores de baixa absorção de água são atribuídos ao refinamento dos poros na argamassa e no aumento correspondente nos valores de ascensão capilar.

No estudo de Menezes (2024), realizou-se o ensaio de resistência à compressão axial, conforme prescrito pela NBR 5739 (ABNT, 2007), e de tração por compressão diametral, NBR 7222 (ABNT, 2011), e a avaliação da absorção d'água, conforme a NBR 7215 (ABNT, 2007). Os teores utilizados foram de 15%, 25% e 35%.

Ao analisar os resultados presentes no Quadro 11 para a resistência à compressão axial, observa-se que a sílica contribuiu para a resistência mecânica nos primeiros 7 dias, porém ao longo do tempo, as amostras com menor percentual de substituição aumentam as

propriedades mecânicas. A hipótese é que a sílica ativa na hidratação, absorve parte da água, ou dificultando a difusão interna de água no interior da pasta. Para a resistência à tração por compressão diametral, observa-se que a presença da sílica ocasiona uma menor resistência, independente da idade das amostras, possivelmente pela segregação interna, fragilizando o material.

No estudo de Santos et al. (2024), de acordo com o Quadro 12, a amostra com teor de 8% obteve a maior resistência à compressão axial, com 19,76 MPa após 7 dias de idade.

**Quadro 12** – Resultado dos procedimentos experimentais do estudo de Santos et al. (2024)

Série	CP (nº)	Idade	Fci (MPa)	Fcm (MPa)	Porcentagem de sílica (%)
<b>S1O</b>	1	7	17,93	17,27	0
	2	7	16,60		
	3	14	22,00	22,26	
	4	14	22,51		
<b>S1AO</b>	1A	7	18,33	19,61	0
	2A	7	20,88		
	3A	14	20,88	31,03	
	4A	14	21,19		
<b>S2O</b>	5	7	18,13	15,58	5
	6	7	13,04		
	7	14	23,94	24,45	
	8	14	24,96		
<b>S3O</b>	9	7	21,19	19,76	8
	10	7	18,33		
	11	14	30,76	28,57	
	12	14	26,38		
<b>S4O</b>	13	7	18,84	17,83	10
	14	7	16,81		
	15	14	19,05	19,51	
	16	14	19,96		

<b>S50</b>	17	7	7,23	9,01	15
	18	7	10,80		
	19	14	17,42	15,84	
	20	14	14,26		

**Fonte:** Santos et al. (2024)

Ao analisar o Quadro 12, nota-se que os resultados foram obtidos com idades de 7 e 14 dias, com dois corpos de prova para cada. Para ambas as idades, o teor de 8% se sobressaiu em relação aos demais. É possível observar também que a série com aditivo (S1AO) obteve resistência à compressão menor que a série sem aditivo (S1O), com valores de 22,06 MPa e 21,03 MPa, respectivamente. Já para as séries com adição de sílica ativa, as compostas por teores de 5% e 8% ganharam resistência com o aumento da idade. Em contrapartida, a série com teor de 10%, apesar de ter ganho resistência, apresentou um valor menor que os teores de 5% e 8%, evidenciando que a quantidade de adição e o tempo de cura têm desempenhos importantes no desempenho das misturas, uma vez que esse aumento demanda mais água.

Desta forma, conclui-se que a adição de sílica ativa apresenta valores positivos para substituição parcial do cimento portland, contanto que os teores sejam balanceados para alcançarem melhores desempenhos, não comprometendo a eficácia das pastas cimentícias.

#### **4.4 Melhores desempenhos abordados referente as adições pozolânicas.**

Neste tópico, serão apresentados os melhores valores obtidos de espalhamento, resistência à compressão axial e tração na flexão e absorção de água, abordados neste estudo, individualmente para as adições de metacaulim, filler calcário e Sílica Ativa, com seus respectivos graus de teores adicionados. Na Tabela 3, estes dados são informados para uma melhor compreensão dos efeitos de cada adição na substituição parcial do CP.

**Tabela 3** – Melhores desempenhos abordados em função das adições.

<b>Adição Pozolânica</b>	<b>Propriedade</b>	<b>Desempenho</b>	<b>Teor de adição (%)</b>
MC	Espalhamento	286,67 mm	20
MC	Resistência à Compressão axial	59,18 MPa	20
MC	Resistência à Tração por Compressão diametral	4,12 MPa	15

MC	Absorção de água	0,021 g/cm <sup>3</sup>	15
FC	Espalhamento	265 mm	43 e 70
FC	Resistência à Compressão axial	54,30 MPa	43
FC	Resistência à Tração por Compressão diametral	2,9 MPa	70
FC	Absorção de água	0,327 g/cm <sup>2</sup>	20
SA	Espalhamento	150 mm	10
SA	Resistência à Compressão axial	130 MPa	25
SA	Resistência à Tração por Compressão diametral	4,71 MPa	15
SA	Absorção de água	0,02 g/cm <sup>2</sup>	15

**Fonte:** Próprio autor (2025).

Os valores apresentados na Tabela 14 foram atribuídos com base na no melhor desempenho analisado em suas respectivas adições pozolânicas.

Com relação ao espalhamento, baseou-se não só no maior valor obtido, mas também na proximidade com os valores de referência, uma vez que cada estudo possui seu objetivo próprio, além da aplicação em diferentes situações. Portanto, para o MC, o desempenho destacado é o de 286,67 mm que foi apresentado pelo traço referência no valor de 273,33 mm, e seu teor correspondente é o de 20%. Para o FC, o espalhamento foi de 265 mm para teor de 43% e 70%, igual ao de referência. Vale destacar que nesse estudo, de Cecel (2019), os valores da relação água/cimento foram modificados para que o espalhamento mantivesse o mesmo valor. Se não considerar tais manipulações, o espalhamento ideal seria o de 256 mm, referente ao teor de 30%, onde o valor de referência foi de 236 mm. Para SA, o melhor desempenho de espalhamento foi de 150 mm com referência em 154 mm, para um teor de 10%.

Com relação a Resistência por Compressão Axial, em adição de MC a maior resistência foi de 59,18 MPa para um teor de 20%. Para adição de FC, a maior resistência aos 28 dias foi de 33 MPa, com teor de 20% e aos 90 dias de 54,30 MPa com teor de 43%. Para SA, a maior resistência aos 7 dias foi de 22,39 MPa, com teor de 35% e aos 28 dias foi de 130 MPa, com teor de 25%.

Com relação a Resistência à Tração por Compressão diametral, em adição de MC a maior resistência foi de 4,12 MPa com teor de 15%. Para adição de FC, a maior resistência em 28 dias foi de 2,06 MPa, com teor de 10% e aos 90 dias foi de 2,9 MPa, com teor de 70%. Para SA, a maior resistência aos 7 dias foi de 3,4 MPa, com teor de 15% e aos 28 dias foi de 4,71 MPa, com teor de 15%.

Com relação a absorção de água, o melhor desempenho observado é o menor entre eles. Em adição de MC, tal desempenho foi de 0,021 g/cm<sup>2</sup>, correspondente ao teor de 15%. Em adição de FC, o desempenho selecionado foi de 0,327 g/cm<sup>2</sup>, referente ao teor de 25%. Já para adição de SA, o desempenho com menor absorção de água foi de 0,02 g/cm<sup>2</sup>, correspondente ao teor de 15%.

Desta forma, observa-se que cada teor de adição interfere nos desempenhos analisados. Logo, a finalidade das pastas produzidas implicará na escolha do teor a ser utilizado, uma vez que para uma boa trabalhabilidade, a resistência à compressão axial poderá sofrer diminuição. Outro fator é a correlação de teor e tempo, onde nos primeiros dias as maiores adições podem obter bons resultados, mas a longo prazo esses valores se invertem, por conta do fenômeno de retenção de água, como no estudo de Menezes (2024).

## 5 CONCLUSÃO

Este estudo foi realizado em forma de revisão bibliográfica através do método PRISMA sobre a adição de materiais pozolânicos em pastas cimentícias. Através deste, foi possível avaliar os efeitos causados pela adição de metacaulim, filler calcário e sílica ativa em pastas cimentícias com diferentes teores, visando a substituição parcial do Cimento Portland.

A metodologia foi eficiente, uma vez que contribuiu para o peneiramento e seleção dos estudos desejados conforme objetivos deste trabalho. Os estudos apresentaram as informações necessárias como os ensaios realizados, resultados obtidos e discussões, além dos materiais utilizados e o teor de adição das pozolânicas utilizadas.

Portanto, conclui-se que os resultados deste estudo foram satisfatórios, podendo observar que a influência das adições pozolânicas em pastas para substituição parcial do cimento, ocasionam valores consideráveis, devendo atentar-se ao percentual de substituição e tipo de adição a ser empregado em matrizes cimentícias, que varia dependendo da finalidade. No quesito sustentabilidade, estes resultados são de suma importância, já que a substituição parcial do cimento está diretamente ligado à menor emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera.

Para futuros estudos neste ramo, é fundamental a realização de Programa experimental, observando os percentuais de adições que acarretem melhorias no desempenho dos materiais cimentícios, uma vez que o intuito é contribuir com a durabilidade das edificações e com o meio ambiente.

## REFERÊNCIAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. **O encadeamento da indústria do cimento no Brasil.** [S. l.], 2023. Disponível em: <https://abcp.org.br/o-encadeamento-da-industria-do-cimento-no-brasil-2/>. Acesso em: 04 jun. 2025.

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. **Cimento: diferentes tipos e aplicações.** [S. l.], s.d. Disponível em: <https://abcp.org.br/cimento-diferentes-tipos-e-aplicacoes/>. Acesso em: 25 jun. 2025.

**ABNT NBR 5739:** Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

**ABNT NBR 7215:** Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

**ABNT NBR 7215:** Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

**ABNT NBR 7222:** Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

**ABNT NBR 12653:** Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ALMEIDA, Alisson Anunciação de. **Caracterização química e física de pozolanas comumente utilizadas na Região Metropolitana do Recife – RMR.** 2021. 99 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2021. Disponível em: <https://attena.ufpe.br/handle/123456789/46272>. Acesso em: 25 jun. 2025.

AMARAL, M.; MACIOSKI, G.; DE MEDEIROS, M. H. F. **Atividade pozolânica da sílica ativa: análise em pastas cimentícias com diferentes níveis de substituição.** Revista Matéria, Porto Alegre, v. 26, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210003.13023>

AQUINO FILHO, João Sérgio de. **Avaliação da influência de adições minerais no comportamento reológico de pastas cimentícias utilizando o mini cone.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil e Ambiental) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/25462>. Acesso em: 21 ago. 2025.

CARMO, J. B. M.; PORTELLA, K. F. **Estudo comparativo do desempenho mecânico da sílica ativa e do metacaulim como adições químicas minerais em estruturas de concreto,** 2008, p. 309 -318. 2008.

CAVALHEIRO, Regina Brasil; PIOREZAN, Rodrigo César; OLIVEIRA, Valéria Costa de; LOUZADA, Rafael Pereira; MORAIS, Carlos Drumond do Nascimento. **Análise das propriedades mecânicas de pastas cimentícias com adição de metacaulim e microssílica.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES – CBPAT 2024, 17–20 jul. 2024, Fortaleza, CE. Anais [...]. [S.l.: s.n.], 2024. Acesso em: 21 nov. 2025.

CECEL, Rafael Testoni. **Proposta metodológica para participação popular na definição de estratégias em planejamento urbano.** 2019. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-26082019-104226/publico/RafaelTestoniCecelCorr19.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2025.

COSTA, Eliane Betânia Carvalho. **Efeito da substituição de cimento por misturas de calcário e metacaulim na resistência mecânica de matrizes cimentícias.** Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/372411296\\_Efeito\\_da\\_substituicao\\_de\\_cimento\\_por\\_misturas\\_de\\_calcario\\_e\\_metacaulim\\_na\\_resistencia\\_mecanica\\_de\\_matrizes\\_cimenticias](https://www.researchgate.net/publication/372411296_Efeito_da_substituicao_de_cimento_por_misturas_de_calcario_e_metacaulim_na_resistencia_mecanica_de_matrizes_cimenticias). Acesso em: 12 set. 2025.

COSTA, J. M. **Análise da influência de diferentes teores de materiais cimentícios suplementares em concreto**. 2021. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/items/1faa987a-e8c9-49c6-a7d1-47c36a24dec4>. Acesso em: 21 ago. 2025.

DOURADO, K. C. de A. et al. **Influência da pozolana em concretos moldados em Caruaru – Pernambuco – Brasil**. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE PATOLOGIA DA CONSTRUÇÃO; CONGRESSO DE CONTROLE DE QUALIDADE NA CONSTRUÇÃO, 11. e 13., 2011, La Antigua Guatemala. Anais [...] La Antigua Guatemala: ALCC, 2011. p. 195–202. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/280316853\\_INFLUENCIA\\_DA\\_POZOLANA\\_EM\\_CONCRETOS\\_MOLDADOS\\_EM\\_CARUARU\\_-\\_PERNAMBUCO\\_-\\_BRASIL](https://www.researchgate.net/publication/280316853_INFLUENCIA_DA_POZOLANA_EM_CONCRETOS_MOLDADOS_EM_CARUARU_-_PERNAMBUCO_-_BRASIL) Acesso em: 16 out. 2025.

FERREIRA, Ayrton Rodrigues. **Influência da substituição parcial do cimento Portland por metacaulim nas propriedades mecânicas e na espessura de pasta do concreto permeável**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos), São Leopoldo (RS), 2024. Disponível em: <http://repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/13438>. Acesso em: 24 out. 2025.

GONÇALVES, Geciane da Silva. **Otimização da resistência à compressão de pastas cimentícias com superdosagem de aditivo dispersante e adição de sílica ativa e sol-gel**. 2018. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018. Disponível em: <http://repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/13438>. Acesso em: 20 nov. 2025

HERMANN, A.; LANGARO, E. A.; SILVA, S. H. L.; KLEIN, N. S. **Empacotamento de partículas de cimento e sílica ativa em pastas pelo uso de modelo analítico**. Revista Ibracon de estruturas e materiais, v. 9, n. 1, p. 48-65, fev. 2016.

HOFFMAN, A. T. **Influência da adição de sílica ativa, relação água/aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos em concretos**. 2001, 132 p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

JOHN, V. M. et al. **Fillers in cementitious materials** — Experience, recent advances and future potential. Cement and Concrete Research, Report of UNEP SBCI WORKING GROUP ON LOWCO<sub>2</sub> ECO-EFFICIENT CEMENT-BASED MATERIALS. v. 114, p. 65–78, 1 dez. 2018.

JORDANI, Bárbara. *Hidratação do cimento portland na presença de elevados teores de filler dolomito com diferentes finuras*. 2020. Trabalho apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, 2020. Disponível em: <http://www.repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/9494>. Acesso em: 11 de dezembro de 2025.

KASTING, J. F.; CATLING, D. **Evolution of a Habitable Planet. Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, [s. l.], v. 41, n. 1, p. 429–463, 2003.

LIMA, Edler de Souza. **Fundamentos de Reologia de Polímeros**. [S.l.], [s.d.]. Disponível em: <https://www.ifba.edu.br/professores/edler/ENG%2020%20-%20McFluidos/Fundamentos%20Reologia%20polimeros.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2025.

LIMA, Lucas Nascimento de. **Influência da substituição de ligante por filler calcário na refletância de pastas de cimento**. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/368513947\\_Influencia\\_da\\_substituicao\\_de\\_ligante\\_por\\_filler\\_calcario\\_na\\_refletancia\\_de\\_pastas\\_de\\_cimento](https://www.researchgate.net/publication/368513947_Influencia_da_substituicao_de_ligante_por_filler_calcario_na_refletancia_de_pastas_de_cimento). Acesso em: 18 jun. 2025.

LIMA, Samantha Pinheiro Buás de. **Estudo da produção e aplicação em pastas cimentícias de sílica gel proveniente das cinzas da casca do arroz**. 2009. 219 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 18 de maio de 2009. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/3483> . Acesso em: 16 jul. 2025

MEDEIROS, M. H. F. de; RAISDORFER, J. W.; HOPPE FILHO, J. **Influência da sílica ativa e do metacaulim na velocidade de carbonatação do concreto: relação com resistência, absorção e relação a/c**. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 125-139, out./dez. 2017. DOI: 10.1590/s1678-86212017000400189. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212017000400189>. Acesso em: 11 de dezembro de 2025.

MENEZES, Isadora Fukuda de. **A influência do teor de sílica ativa como fíler em argamassas autoadensáveis, nas propriedades reológicas e no desempenho no estado fresco e no endurecido**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Ilha Solteira, 2024. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/f621852d-ae67-4abc-835c-4bb6251f0d92>. Acesso em: 25 out. 2025.

MILLER, S. A.; HORVATH, A.; MONTEIRO, P. J. M. **Readily Implementable Techniques Can Cut Annual CO2 Emissions from the Production of Concrete by over 20%**. *Environmental Research Letters*, v. 11, n. 7, p. 074029, 2016.

OLIVEIRA, Sávio Viana. **Reologia de pastas cimentícias contendo adições de minerais**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Unidade Acadêmica de Engenharia Civil, Campina Grande, PB, 2019. Disponível em: <https://dspace.sti.ufcg.edu.br/handle/riufcg/23631>. Acesso em: 21 ago. 2025.

PAULINO, Igor Maurício et al. **Uso de metacaulim em substituição ao cimento em argamassas estabilizadas**. *Contribuciones a Las Ciencias Sociales*, São José dos Pinhais, v. 17, n. 6, p. 01-22, 2024. DOI: 10.55905/revconv.17n.6-365. Acesso em: 18 out. 2025.

PERUZZI, Antônio de Paulo. **Comportamento das fibras de vidro convencionais sem matriz de cimento Portland modificada com látex e adição de sílica ativa**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 22 jul. 2002. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18131/>. Acesso em: 02 jun. 2025.

RIBEIRO, Renata Possamai. **Pasta de cimento Portland reforçada com fibra de vidro: efeito da adição sobre as propriedades mecânicas**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2019. Disponível em: <https://repositorio.unesc.net/handle/1/10565>. Acesso em: 02 jun. 2025.

RITTER, Juliana. **Análise do comportamento físico e mecânico do solo do Câmpus Universitário de Várzea Grande adicionado de cimento CP II Z32** [recurso eletrônico]. Cuiabá/MT: Universidade Federal de Mato Grosso, 2024. Disponível em: <http://bdm.ufmt.br/handle/1/4374>. Acesso em: 14 nov. 2025.

RODRIGUES, Dardânia Aparecida Evangelista. **Efeitos da adição de metacaulim na absorção capilar e profundidade de carbonatação de concretos**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-AUUJWK>. Acesso em: 22 jun. 2025.

R-RUHNKE, Lara Biancato; MARON DA COSTA, Marianne do Rocio de Mello. **Análise da substituição parcial de cimento por filer calcário em argamassas de revestimento com base em modelos de empacotamento de partículas**. In: XV Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 15., 2025, [s.l.]. Anais ... [s.l.]: [s.n.], 2025. DOI: <https://doi.org/10.46421/sbta.v15.6873>

SANTOS, Carlos Fernando dos; SILVA, Lukas Victor de Araújo; LIMA, Matheus Fernandes de; DONADONI, Miguel da Silva; BRAGA, Nicolas Pelegrino. **Análise dos efeitos do uso de sílica ativa na resistência à compressão do cimento Portland**. Jundiaí-SP: Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza (ETEC Vasco Antônio Venchiarutti), 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Técnico em Edificações). Disponível em: <https://ric.cps.sp.gov.br/handle/123456789/33414>. Acesso em: 24 out. 2025.

SEQUEIRA, Eduardo Martins; GHISLENI, Geisiele. **A influência da adição de filler calcário em substituição parcial ao cimento em argamassa estabilizada de revestimento de parede**. Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, Florianópolis, v. 9, ed. esp., p. 518–537, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.19177/rgsa.v9e0202020-38>

SILVA, F. G.; LIBORIO, J. B. L. **Durabilidade do concreto de alto desempenho com sílica de Fe-Si ou silício metálico em ambientes marinhos**. USP, São Carlos, SP. 2004.

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **Relatório anual 2023**. [S.l.], 2024. Disponível em: <https://snic.org.br/numeros-relatorio-anual.php>. Acesso em: 23 jun. 2025.

TAVARES, João Victor Teles. **Avaliação do uso do resíduo cerâmico e do metacaulim para o desenvolvimento de cimentos sustentáveis**. 2025. — f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Campus de Crateús, Universidade Federal do Ceará, Crateús, 2025. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/80011> . Acesso em: 16 jul. 2025