

Campus Porto Velho Calama
Coordenação do Curso de Engenharia Civil

APARECIDA AMARAL DE SOUZA

**DESEMPENHO DE CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS PRODUZIDOS COM
ADIÇÕES POZOLÂNICAS**

PORTO VELHO - RO

2025

APARECIDA AMARAL DE SOUZA

**DESEMPENHO DE CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS PRODUZIDOS COM
ADIÇÕES POZOLÂNICAS**

Monografia entregue como Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia (IFRO). *Campus* Calama, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel, junto ao Curso de Engenharia Civil, sob a orientação da professora Dr. Valeria Costa de Oliveira.

PORTO VELHO - RO

2025

Souza, Aparecida Amaral de.

Desempenho de concretos autoadensáveis produzidos com adições pozolânicas / Aparecida Amaral de Souza. — Porto Velho, 2025.

71 f. : il.

Orientador(a): Prof^ª. Dra. Valéria Costa de Oliveira

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

1. Concreto autoadensável. 2. Metacaulim. 3. Sílica ativa. 4. Cinza da casca de arroz. 5. Adições minerais. I. Oliveira, Valeria Costa de (orient). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia – IFRO. III. Título.


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

APARECIDA AMARAL DE SOUZA


DESEMPENHO DE CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS PRODUZIDOS COM ADIÇÕES POZOLÂNICAS

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


Aprovado em: 05/12/2025 pela banca examinadora.

Documento assinado digitalmente
 **RODRIGO CESAR PIEROZAN**
Data: 17/12/2025 08:46:18-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Membro da Banca: Rodrigo Cezar Pierozan

Documento assinado digitalmente
 **CARLOS DRUMOND DO NASCIMENTO MORAIS**
Data: 16/12/2025 20:45:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Membro da Banca: Carlos Drumond do Nascimento Moraes

Documento assinado digitalmente
 **VALERIA COSTA DE OLIVEIRA**
Data: 16/12/2025 21:16:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientadora: Valéria Costa de Oliveira

A Deus, meus pais, minha família e em especial a minha avó, Maria do Rosário.

AGRADECIMENTOS

A DEUS, PELA DOM DA VIDA, PELA FORÇA E PELA SABEDORIA QUE ME SUSTENTARAM EM CADA PASSO DESTA CAMINHADA. FOI ELE QUEM ME DEU FORÇA E CORAGEM NOS MOMENTOS DE DÚVIDA E ESPERANÇA QUANDO O CANSAÇO PARECIA MAIOR QUE OS SONHOS.

AOS MEUS PAIS, EDIMAR ALVES DE SOUZA E GILDA DO SOCORRO ALVES AMARAL QUE SEMPRE FORAM MEU ALICERCE, MEU APOIO E MEU ABRIGO NOS DIAS QUE PRECISEI. OBRIGADA POR ACREDITAREM EM MIM MESMO QUANDO EU DUVIDEI DAS MINHAS PRÓPRIAS CAPACIDADES, POR CADA PALAVRA DE INCENTIVO, POR CADA GESTO DE AMOR E POR TODO O SACRIFÍCIO SILENCIOSO QUE ME TROUXE ATÉ AQUI. AOS MEUS IRMÃOS, MEU NAMORADO E A TODA A MINHA FAMÍLIA, QUE VIBRARAM COMIGO EM CADA CONQUISTA E ME ACOLHERAM NOS DIAS DIFÍCEIS, O CARINHO DE VOCÊS É O QUE ME MOVE.

À MINHA AVÓ, MARIA DO ROSÁRIO ALVES AMARAL, QUE MESMO NÃO ESTANDO MAIS FÍSICAMENTE PRESENTE, FOI E SEMPRE SERÁ UMA DAS MINHAS MAIORES INSPIRAÇÕES, FOI QUEM TORCEU, OROU E SONHOU ISSO COMIGO. DURANTE ESSA JORNADA, DEPOIS DA PARTIDA A CAMINHADA JÁ NÃO FOI MAIS A MESMA, MAS O PENSAMENTO NELA SEMPRE FOI PRESENTE, NAS SUAS PALAVRAS SIMPLES E CHEIAS DE SABEDORIA, E O AMOR QUE SEMPRE TRANSMITIU ME DEU FORÇAS. DEDICO A ELA PARTE DESSA VITÓRIA, COM A CERTEZA DE QUE, DE ALGUM LUGAR, ELA CONTINUA TORCENDO POR MIM.

AO GUSTAVO, CIBELE, LIZ E LAVÍNIA O MEU AGRADECIMENTO DE TODO O CORAÇÃO, POR TEREM ABERTO A PORTA DE CASA PARA ME RECEBEREM E SER MEU LAR TEMPORÁRIO, NÃO FOI SOMENTE A PORTA DE UMA MORADIA, MAS A PORTA DE UM GRANDE SONHO QUE ESTAVA INICIANDO. FORAM ALICERCE E APOIO NO INÍCIO DESSA CAMINHADA.

A MINHA ORIENTADORA, PELA PACIÊNCIA, ORIENTAÇÃO CUIDADOSA E POR COMPARTILHAR SEU CONHECIMENTO COM TANTA GENEROSIDADE. SUA DEDICAÇÃO FOI ESSENCIAL PARA QUE ESTE TRABALHO SE TORNASSE REALIDADE.

E AOS AMIGOS QUE ENCONTREI AO LONGO DO CURSO, MEU SINCERO AGRADECIMENTO. VOCÊS TORNARAM ESSA TRAJETÓRIA MAIS LEVE, DIVERTIDA E INESQUECÍVEL. CADA CONVERSA, CADA RISADA E CADA MOMENTO DE APOIO SIGNIFICARAM MUITO MAIS DO QUE PALAVRAS PODEM EXPRESSAR.

POR FIM, AGRADEÇO A TODOS QUE, DE ALGUMA FORMA, FIZERAM PARTE DESTA CAMINHADA. ESTE TRABALHO NÃO É APENAS O RESULTADO DO MEU ESFORÇO, MAS O REFLEXO DE TODO AMOR, FÉ E ESPERANÇA QUE RECEBI AO LONGO DO CAMINHO.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise sistemática do desempenho de concretos autoadensáveis (CAA) produzidos com diferentes adições pozolânicas, com foco em metacaulim, cinza da casca de arroz e sílica ativa. O estudo foi desenvolvido por meio de pesquisa bibliográfica, contemplando publicações entre 2015 e 2025, a fim de identificar como distintos percentuais de substituição do cimento Portland influenciam as propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido. Inicialmente, estruturou-se uma revisão teórica sobre o CAA, destacando suas características reológicas, requisitos normativos e a importância das adições minerais no aprimoramento do desempenho mecânico e da estabilidade da mistura. A metodologia consistiu em coletar dados de dosagens utilizadas em diversos estudos nacionais e internacionais, contemplando diferentes tipos de cimento, relações água/aglomerante e teores de substituição por adições pozolânicas. As informações foram organizadas e comparadas quanto ao comportamento das misturas no estado fresco considerando parâmetros como espalhamento, viscosidade e estabilidade e no estado endurecido, por meio da análise dos resultados de resistência à compressão axial e tração por compressão diametral. Os resultados demonstram que o metacaulim apresenta melhor desempenho quando utilizado em teores moderados, especialmente em 10%, garantindo boa fluidez, viscosidade adequada e aumento das resistências mecânicas. A cinza da casca de arroz, por sua vez, mostrou resultados positivos entre 5% e 15%, porém teores superiores tendem a prejudicar a consistência e reduzir a resistência à compressão, devido à alteração da hidratação e da estrutura da matriz cimentícia. A sílica ativa destacou-se como a adição mais eficiente, proporcionando elevada fluidez, redução de porosidade e aumento significativo da resistência, sobretudo em combinação com cimentos de alta reatividade. Conclui-se que o desempenho dos CAA depende da interação entre o tipo de cimento, a relação água/aglomerante e a reatividade das adições pozolânicas. Quando utilizadas adequadamente, essas adições contribuem para a sustentabilidade, durabilidade e eficiência mecânica do concreto, reforçando seu potencial como materiais complementares em aplicações de alto desempenho.

Palavras-chave: concreto autoadensável; metacaulim; sílica ativa; cinza da casca de arroz; adições minerais; propriedades mecânicas.

ABSTRACT

This work presents a systematic analysis of the performance of self-compacting concrete (SCC) produced with different pozzolanic additions, focusing on metakaolin, rice husk ash, and silica fume. The study was developed through bibliographic research, encompassing publications between 2015 and 2025, in order to identify how different percentages of Portland cement substitution influence the properties of concrete in the fresh and hardened states. Initially, a theoretical review of SCC was structured, highlighting its rheological characteristics, normative requirements, and the importance of mineral additions in improving the mechanical performance and stability of the mixture. The methodology consisted of collecting dosage data used in several national and international studies, including different types of cement, water/binder ratios, and levels of substitution by pozzolanic additions. The information was organized and compared regarding the behavior of the mixtures in the fresh state, considering parameters such as spreadability, viscosity, and stability, and in the hardened state, through the analysis of the results of axial compressive strength and tensile strength by diametral compression. The results demonstrate that metakaolin performs better when used in moderate amounts, especially at 10%, ensuring good fluidity, adequate viscosity, and increased mechanical strength. Rice husk ash, in turn, showed positive results between 5% and 15%, but higher amounts tend to impair consistency and reduce compressive strength due to changes in hydration and the structure of the cementitious matrix. Active silica stood out as the most efficient addition, providing high fluidity, reduced porosity, and a significant increase in strength, especially in combination with highly reactive cements. It is concluded that the performance of self-compacting cements (SCCs) depends on the interaction between the type of cement, the water/binder ratio, and the reactivity of the pozzolanic additions. When used appropriately, these admixtures contribute to the sustainability, durability, and mechanical efficiency of concrete, reinforcing their potential as complementary materials in high-performance applications.

Palavras-chave: self-compacting concrete; metakaolin; silica fume; rice husk ash; mineral admixtures; mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Ilustração do Metacaulim	24
Figura 2.2 - Ilustração da Cinza da Casca de Arroz	26
Figura 2.3 - Ilustração da sílica ativa.....	27
Figura 3.1 - Fluxograma da Metodologia.....	29
Figura 4.1 - Resistências à compressão para diferentes relações a/a em composições com 10% de MK.....	53
Figura 4.2 - Resistência a compressão para diferentes relações a/a em composição com 20% de MK.....	54
Figura 4.3 - Resistência à compressão para diferentes relações a/a em composições com 5% de CCA.....	57
Figura 4.4 - Resistência à compressão para diferentes relações a/a em composições com 15% de CCA.....	58
Figura 4.5 - Resistência à compressão para diferentes relações a/a em composições com 10% de SA	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Propriedades, Ensaio e Parâmetros de Classificação do CAA no Estado Fresco	20
Tabela 4.1 - Parâmetros de dosagem de CAA produzidos com adição de metacaulim substituindo parcialmente o cimento Portland.....	33
Tabela 4.2 - Parâmetros de dosagem de CAA produzidos com adição de CCA substituindo parcialmente o cimento Portland.	33
Tabela 4.3 - Parâmetros de dosagem de CAA produzidos com adição de sílica ativa substituindo parcialmente o cimento Portland.....	34
Tabela 4.4 - Características do estado fresco dos CAA produzidos com adições de metacaulim em 10%, 15% e 20% em substituição parcial do cimento Portland.	36
Tabela 4.5 - Caracterização Química do metacaulim.....	38
Tabela 4.6 - Características do estado fresco dos CAA produzidos com adições de CCA em 5%, 10%, 15%, 20% e 30% em substituição parcial do cimento Portland.	39
Tabela 4.7 - Caracterização química e granulometria da CCA	42
Tabela 4.8 - Características do estado fresco dos CAA produzidos com adições de sílica ativa em 10% em substituição parcial do cimento Portland.....	43
Tabela 4.9 - Características do estado fresco dos CAA produzidos com adições de metacaulim, cinza da casca de arroz e sílica ativa	45
Tabela 4.10 - Dados de resistência à compressão axial e tração por compressão diametral com adição de Metacaulim.....	46
Tabela 4.11 - Dados de resistência à compressão axial e tração por compressão diametral com adição de Cinza da Casca de Arroz	48
Tabela 4.12 – Dados de resistência à compressão axial e tração por compressão diametral com adição de sílica ativa.....	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a/a	Relação água/ aglomerante
a/agl	Relação água/ aglomerante
AL ₂ O ₃	Óxido de alumínio
CAA	Concreto Autoadensável
CAA20MK	Concreto Autoadensável 20% Metacaulim
CCA	Cinza da Casca de Arroz
CO ₂	Dióxido de Carbono
CPCCA	Corpo de Prova Cinza da Casca de Arroz
CP10%	Corpo de Prova 10%
CP30%	Corpo de Prova 30%
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
D50	Diâmetro médio de partícula
M10	Metacaulim 10%
M20	Metacaulim 20%
MK	Metacaulim
MPa	Mega Pascal
MK10%ADT”C”	Metacaulim 10% aditivo C
SA	Sílica ativa
SCA	Sílica da Casca de Arroz
SiO ₂	Dióxido de Silício
TICCA	Traço Intermediário Cinza da Casca de Arroz
TPCCA	Traço Pobre Cinza da Casca de Arroz
TRCCA	Traço Rico Cinza da Casca de Arroz
TISA	Traço Intermediário Sílica Ativa
TPSA	Traço Pobre Sílica Ativa
TRSA	Traço Rico Sílica Ativa
TRI	Traço Intermediário
TRP	Traço Pobre
TRR	Traço Rico
VMA	Modificador de viscosidade

LISTA DE SÍMBOLOS

μm Micrômetro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS	17
1.1.1 <i>Objetivo geral</i>	17
1.1.2 <i>Objetivo específico</i>	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 CONCRETO AUTOADENSÁVEL (CAA).....	18
2.1.1 <i>Características principais: fluidez, coesão, estabilidade</i>	19
2.2 MATERIAIS CONSTITUINTES DO CAA	21
2.3 ADIÇÕES POZOLÂNICAS	23
2.3.1 <i>Metacaulim</i>	24
2.3.2 <i>Cinza da Casca de Arroz</i>	25
2.3.3 <i>Sílica Ativa</i>	27
3 METODOLOGIA.....	29
3.1 DEFINIÇÃO DO ESCOPO E CRITÉRIOS DE SELEÇÃO	30
3.2 ESTRATÉGIA DE BUSCA E SELEÇÃO DOS ESTUDOS	30
3.3 ANÁLISE E SÍNTESE DOS RESULTADOS.....	30
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
4.1 DOSAGENS DE CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS PRODUZIDOS COM DISTINTOS PERCENTUAIS DE ADIÇÕES POZOLÂNICAS.....	32
4.1.1 <i>Análise quanto as dosagens de concretos autoadensáveis produzidos com distintos percentuais de adições pozolânicas</i>	35
4.2 ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS NO ESTADO FRESCO QUE SÃO OBTIDAS NA PRODUÇÃO DE CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS PRODUZIDOS COM DIFERENTES PERCENTUAIS DE SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND POR ADIÇÕES DE METACAU LIM, CINZA DA CASCA DE ARROZ E SÍLICA ATIVA	35
4.2.1 <i>Análises dos resultados no estado fresco dos CAA produzidos com metacaulim</i> ...	36
4.2.2 <i>Análises dos resultados no estado fresco dos CAA produzidos com cinza da casca de arroz</i>	39
4.2.3 <i>Análises dos resultados no estado fresco dos CAA produzidos com sílica ativa</i>	42
4.2.4 <i>Análises comparativas entre as propriedades do estado fresco dos concretos autoadensáveis quando produzidos com as adições de metacaulim, cinza da casca de arroz e sílica ativa</i>	44

4.3 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS PRODUZIDOS COM DIFERENTES PERCENTUAIS DE SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND POR ADIÇÕES DE METACAULIM, CINZA DA CASCA DE ARROZ E SÍLICA ATIVA	45
4.3.1 <i>Análises dos resultados no estado endurecido dos CAA produzidos com metacaulim</i>	46
4.3.2 <i>Análises dos resultados no estado endurecido dos CAA produzidos com cinza da casca de arroz.....</i>	48
4.3.3 <i>Análises dos resultados no estado endurecido dos CAA produzidos com sílica ativa</i>	50
4.4 ANÁLISES DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CAA PRODUZIDOS COM ADIÇÕES DE METACAULIM, CINZAS DA CASCA DE ARROZ E SÍLICA ATIVA	52
4.4.1 <i>Resistências à compressão de CAA produzidos com adições de metacaulim 10% e 20% de substituição parcial ao cimento Portland</i>	52
4.4.2 <i>Resistências à compressão de CAA produzidos com adições de cinza da casca de arroz 5% e 15% de substituição parcial ao cimento Portland</i>	56
4.4.3 <i>Resistências à compressão de CAA produzidos com adições de sílica ativa 10% de substituição parcial ao cimento Portland</i>	59
5 CONCLUSÃO.....	62
REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

O uso de concreto convencional tem se mostrado limitado em estruturas com densidade de armadura ou em situações de difícil concretagem, o que tem impulsionado o desenvolvimento e a aplicação de concretos especiais pela construção civil. (Gudinho; Bueno; Silva, 2022)

Diante dessas limitações, torna-se evidente a necessidade da construção civil adotar tecnologias que aliem eficiência, durabilidade e sustentabilidade, impulsionando a busca por soluções mais avançadas. Nesse cenário, o concreto autoadensável (CAA) emergiu como uma alternativa inovadora. De acordo com Dal Molin e Tutikian (2021, p. 9), “o concreto autoadensável (CAA) foi criado no Japão em 1988, sendo capaz de se moldar nas formas de maneira autônoma e preencher os vazios sem a necessidade de vibração ou compactação externa”.

O concreto autoadensável (CAA) apresenta no estado fresco características reológicas essenciais, como baixa tensão de escoamento, alta deformabilidade e viscosidade adequada, que garantem sua fluidez, coesão e habilidade passante. Essas propriedades permitem que o material flua sob seu próprio peso, preencha completamente as formas e atravesse armaduras densas sem segregação ou bloqueios, dispensando vibração externa. Assim, o CAA assegura construções mais rápidas, silenciosas e com acabamento superior, mantendo estabilidade e qualidade durante o lançamento.

Para garantir esse desempenho, devido à sua alta fluidez, o concreto autoadensável exige um controle rigoroso para evitar a segregação dos materiais. Essa estabilidade é alcançada por meio de uma viscosidade adequada, sendo recomendada a utilização de adições minerais finas, tanto pozolânicas quanto inertes para auxiliar nesse processo. Assim, torna-se necessária uma proporção maior de materiais finos na composição do CAA em comparação ao concreto convencional. (Medeiros *et al.*, 2022)

Em complemento a exigência técnica, segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), as adições pozolânicas são substâncias finas que, quando em contato com o hidróxido de cálcio e água, reagem e geram compostos cimentantes. São empregadas no concreto para aprimorar a durabilidade, a resistência química e a trabalhabilidade. A sílica ativa, o metacaulim e a cinza da casca de arroz são pozolanas altamente reativas. Essas adições melhoram a resistência e durabilidade do concreto. Além disso, contribuem para a sustentabilidade por aproveitarem resíduos ou materiais naturais

A esse respeito, os autores Vicentini, Assunção e Akasaki (2016, p. 127) definem:

O metacaulim é uma adição mineral que tem sua composição à base de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) e seu processo de produção tem menor potencial de poluição que o cimento. Comparando as temperaturas de queima na produção de metacaulim (de $600\text{ }^\circ\text{C}$ a $900\text{ }^\circ\text{C}$) e cimento ($1300\text{ }^\circ\text{C}$), nota-se que a diferença entre os valores proporciona ao metacaulim uma menor liberação de CO_2 , por necessitar menor temperatura de queima.

Completando esse conjunto de adições, pela abordagem de Bezerra (2010 *apud* Ferreira; Ribeiro, 2018), a cinza da casca do arroz (CCA), é um resíduo vegetal, amplamente investigado por diversos pesquisadores, pois observaram que a área cinza apresenta bons resultados em relação aos características físicas e mecânicas quando empregadas em argamassas e concretos. Esse uso se torna satisfatório, uma vez que as cinzas contêm um alto teor de sílica, exibindo propriedades pozolânicas, ou seja, as cinzas não têm propriedades aglomerantes quando tratadas isoladamente.

De maneira complementar, conforme Hermann *et al.*, (2016), a sílica ativa, quando empregada como adição mineral, pode desempenhar duas formas. A primeira é a ação química, por meio da reação pozolânica, em que a sílica ativa reage quimicamente com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), gerado pela hidratação do cimento, resultando em uma quantidade extra de silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Isso resulta na resistência mecânica do concreto. Ademais, como o C-S-H contribui para a diminuição de vazios e resistência à ação de agentes agressivos.

Diante do exposto, o concreto autoadensável se consolida como uma solução eficiente frente às limitações do concreto convencional, especialmente em estruturas complexas. Sua formulação, com maior teor de finos e adições minerais como sílica ativa, metacaulim e cinza da casca de arroz, confere excelente desempenho reológico e mecânico. Além disso, contribui para a sustentabilidade ao utilizar resíduos industriais e naturais. Portanto, o CAA atende com excelência às demandas técnicas e ambientais da engenharia contemporânea.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Analisar o desempenho de concretos autoadensáveis produzidos com adições pozolânicas.

1.1.2 Objetivo específico

Os objetivos específicos são:

- Coletar os dados de diferentes dosagens de concretos autoadensáveis produzidos com distintos percentuais de adições pozolânicas, a partir das referências bibliográficas selecionadas neste estudo, em um período de 2015 a 2025;
- Indicar as características no estado fresco que são obtidas na produção de concretos autoadensáveis produzidos com diferentes percentuais de substituição de cimento Portland por adições de metacaulim, cinza da casca de arroz e sílica ativa;
- Avaliar as propriedades mecânicas dos concretos autoadensáveis produzidos com diferentes percentuais de substituição de cimento Portland por adições de metacaulim, cinza da casca de arroz e sílica ativa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados o referencial teórico deste estudo, inserindo as definições e as aplicações do CAA, as principais adições pozolânicas utilizadas em sua produção e a influência destes em suas propriedades.

2.1 Concreto Autoadensável (CAA)

A busca por inovação e modernização no uso do concreto levou, no final da década de 1980, no Japão, ao desenvolvimento do concreto autoadensável. O objetivo era encontrar soluções que garantissem uma compactação completa e uniforme, já que a ausência desta era apontada como uma das principais causas do baixo desempenho das estruturas de concreto (Vivek; Sulekha; Harini, 2018).

Tutikian e Dal Molin (2021 p.10) destacam que “As duas propriedades mais importantes do CAA são a trabalhabilidade e a estabilidade”.

O CAA é uma tecnologia inovadora, desenvolvida para se moldar de forma autônoma, dispensando o uso de vibradores ou qualquer intervenção externa. Conforme a NBR 15823-1 (ABNT, 2017) o CAA se caracteriza pela capacidade de fluir sob ação do seu próprio peso, preenchendo as fôrmas e atravessando alta densidade de armaduras.

Para Sapate *et al.* (2024), o concreto autoadensável se destaca em relação ao convencional por dispensar vibração. Isso reduz o tempo de execução e melhora as condições de trabalho. Além disso, garante melhor acabamento, maior homogeneidade e menor risco de segregação. Com isso, proporciona estruturas mais duráveis e de melhor desempenho.

O concreto autoadensável é adequado para aplicação em diversos tipos de estruturas, sendo especialmente vantajoso em elementos com geometrias complexas ou elevada concentração de armaduras, por facilitar a moldagem sem necessidade de vibração (Cavalcanti, 2006 *apud* Costa; Cabral, 2019).

O concreto autoadensável é uma tecnologia vantajosa quando comparado ao concreto convencional. Costa e Cabral (2019) indicaram através de seus estudos que o tempo de concretagem, mão de obra, ruídos e quantidade de equipamentos e ferramentas em obras verticais são reduzidos quando utilizado CAA em comparação ao concreto convencional.

Apesar da ampla aplicação do concreto convencional, as exigências das construções atuais têm impulsionado a busca por alternativas tecnológicas mais eficientes. Como resultado, práticas tradicionais vêm sendo gradualmente substituídas por métodos construtivos mais

avançados, capazes de oferecer melhor desempenho e atender às necessidades crescentes do setor (Calesco, 2022).

2.1.1 Características principais: fluidez, coesão, estabilidade

Dal Molin e Tutikian (2021, p. 11), destaca que nem todo concreto com alta fluidez pode ser considerado autoadensável. Para que seja classificado como CAA, é essencial que atenda aos requisitos específicos dessa tecnologia como fluidez, coesão e resistência à segregação de forma simultânea.

De acordo com Tutikian e Dal Molin (2008 apud Rezende, 2016), a fluidez do concreto autoadensável está relacionada à sua capacidade de preencher as fôrmas por gravidade, enquanto a habilidade passante diz respeito ao escoamento entre armaduras sem bloqueios ou segregações.

Dessa forma, observa-se que o concreto autoadensável exige mais do que apenas fluidez, ele deve apresentar um equilíbrio entre suas propriedades no estado fresco. A combinação de fluidez, coesão e habilidade passante garante sua eficiência e desempenho. Atender a esses critérios é essencial para a correta aplicação do CAA em projetos estruturais.

A NBR 15823-1 (ABNT, 2017) estabelece que para o concreto autoadensável ser aceito no estado fresco, deve atender a alguns requisitos mínimos nas seguintes propriedades: fluidez, viscosidade plástica aparente e habilidade passante. Essas propriedades são analisadas através dos ensaios de espalhamento, T500, índice de estabilidade visual e método do anel J.

A tabela 2.1 a seguir apresenta as principais propriedades avaliadas no CAA, os respectivos métodos de ensaio utilizados para sua determinação e os parâmetros de aceitação.

Tabela 2.1 - Propriedades, Ensaio e Parâmetros de Classificação do CAA no Estado Fresco

Propriedades	Ensaio	Classes
Fluidez	Slump-Flow	SF1 - 550 A 650 SF2 - 660 A 750 SF3 - 760 A 850
Viscosidade Plástica	Funil V	VF 1 - < 9 VF 2 - 9 a 25
	t500	VS 1 - ≤ 2 VS 2 - > 2
Habilidade Passante	Anel J	PJ 1 - 0 a 25 com 16 Barras PJ 2 - 25 a 50 com 16 barras
	Caixa L	PL 1 - ≥ 0,80 com 2 barras PL 2 - ≥ 0,80 com 3 barras
Resistência à segregação	Coluna de segregação	SR 1 - ≤ 20 SR 2 - ≤ 15

Fonte: Elaboração própria adaptada da NBR 15823 (ABNT, 2017).

Além disso, os autores Castro e Pandolfelli (2009, *apud* Santos, 2018, p. 16) demonstram que para o concreto autoadensável apresentar autoadensabilidade adequada, é essencial que a mistura possua boa trabalhabilidade. A distribuição granulométrica dos materiais exerce papel fundamental nesse processo, pois influencia o empacotamento das partículas e o volume de vazios que deve ser preenchido pela pasta. Por isso, compreender essa distribuição é importante para otimizar a dosagem. Além disso, a área superficial total das partículas também afeta o comportamento no estado fresco: quanto maior o teor de finos e a superfície específica, maior será a demanda de água necessária para hidratação e para garantir a fluidez da mistura.

Além do desempenho no estado fresco, o concreto autoadensável deve garantir resistência e durabilidade no estado endurecido. Propriedades como compressão, tração e módulo de elasticidade são essenciais. Essa etapa assegura sua eficiência em aplicações estruturais.

Segundo Carneiro (2018), “as principais propriedades mecânicas do concreto destacam-se as seguintes: resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração na flexão.”

Conforme Coutinho (2011, *apud* Calado, 2015, p. 102) Os fatores que influenciam a resistência à compressão também afetam a resistência à tração do concreto. Quanto ao módulo de elasticidade, concretos com maior proporção de agregados graúdos tendem a apresentar valores mais altos, o que sugere que o CAA, por possuir menor volume desses agregados, pode apresentar módulo inferior ao do concreto convencional de composição semelhante. Nesse

contexto, ao considerar os elementos que influenciam o desempenho mecânico do concreto, torna-se relevante observar também o efeito das adições minerais sobre o comportamento no estado endurecido.

Ferro (2019) aponta que a substituição parcial do cimento por materiais finos, como adições pozolânicas ou fíler, altera as propriedades do concreto autoadensável no estado endurecido. Quando essas adições são subprodutos industriais como escória, cinza volante, sílica ativa ou sílica da casca de arroz elas ainda trazem o benefício ambiental de aproveitar resíduos. O efeito de cada material, porém, depende do teor utilizado e da sua capacidade de reagir com os produtos de hidratação do cimento, especialmente o hidróxido de cálcio.

2.2 Materiais Constituintes do CAA

O concreto autoadensável (CAA) é composto basicamente pelos mesmos materiais utilizados no concreto convencional, como cimento Portland, água, agregados miúdos e graúdos. No entanto, para garantir as propriedades específicas do CAA, como fluidez, coesão e estabilidade, sua composição costuma incluir maiores teores de materiais finos e aditivos químicos. Além disso, são frequentemente incorporadas adições minerais, tais como metacaulim, cinza volante, sílica ativa, entre outras, que contribuem para melhorar o desempenho mecânico e durabilidade do concreto.

Conforme a NBR 16697 (ABNT, 2018), cimento Portland é definido como o material que, em presença de água, forma uma pasta que endurece por hidratação e mantém sua resistência e estabilidade mesmo submersa. A norma classifica os cimentos segundo sua composição e desempenho, como o CP I (comum), CP II (com adições como escória, pozolana ou fíler), CP III (alto-forno), CP IV (pozolânico) e CP V-ARI (alta resistência inicial). Na produção do CAA, é possível utilizar os mesmos tipos de cimento empregados no concreto convencional.

Entretanto, apesar da ampla aplicação do cimento, além da sua grande importância, estudos apontam que nos últimos anos, o cimento Portland tem sido apontado como um dos principais insumos com impacto ambiental significativo, tanto devido ao seu processo industrial quanto à extração das matérias-primas. Nesse contexto, estudos ressaltam que o uso de adições minerais surge como alternativa para substituir parcialmente o cimento, mantendo o teor de finos necessário à mistura sem prejudicar o desempenho do concreto (Diniz *et al.*, 2018).

Completando a composição do concreto, a NBR 9935 (ABNT, 2024), define agregado como “material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para a

preparação de concreto ou argamassa". Esses materiais, tanto miúdos quanto graúdos, desempenham papel fundamental na trabalhabilidade, resistência mecânica e estabilidade do concreto autoadensável, exigindo, portanto, um controle rigoroso em sua seleção e proporção.

De acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2022),

Os agregados utilizados no concreto são classificados em graúdos e miúdos, conforme suas dimensões. Os agregados graúdos correspondem às partículas retidas na peneira de abertura 4,75 mm, enquanto os miúdos são os que passam e ficam retidos na peneira com abertura de malha 150 μm .

Rezende (2016), cita que o CAA é um concreto que requer adição de finos para uma melhor coesão, assim, quanto mais fino o agregado miúdo, melhor. O uso de areia grossa pode levar o concreto a segregação.

Os autores Gomes e Moraes (2021) identificaram através de seus estudos em relação aos agregados miúdos que:

[...] diferentes combinações de agregados para concreto autoadensável (CAA) tiveram a influência dos tamanhos dos grãos, principalmente, na região das frações fora da região intermediária, abaixo da fração #0,60 mm e entre #4,75 $\leq D_p \leq 9,5$ mm.

Os autores também observaram que os concretos autoadensáveis alcançaram melhores resultados em relação à autoadensabilidade quando foram utilizados agregados com parâmetros de graduação específicos, como predominância de diâmetros de partículas (PDP) em torno de 14 ± 7 , coeficiente de uniformidade (Cup) de 15 ± 4 , proporção de agregados graúdos (PAG) de 50%, e diâmetro máximo de 12,5 mm. Além disso, destacou-se a predominância de partículas com tamanho igual ou inferior a 0,60 mm e entre 4,75 mm e 9,5 mm como fatores determinantes para o bom desempenho do concreto (Gomes; Moraes, 2021).

Por fim, os aditivos constituem um dos componentes essenciais do concreto autoadensável (CAA), pois são responsáveis por garantir o desempenho adequado no estado fresco e contribuir para suas propriedades no estado endurecido. Segundo a definição da NBR 11768-1 (ABNT, 2019), aditivo é o produto incorporado ao concreto em proporção geralmente inferior a 5% da massa de ligante, com a finalidade de alterar suas propriedades tanto no estado fresco quanto no endurecido. Essa modificação pode influenciar desde a trabalhabilidade até a resistência final do material.

Conforme aponta Felipe (2022) no caso do concreto autoadensável (CAA), é mais comum a utilização de aditivos superplastificantes associados a modificadores de viscosidade. Essa informação é reforçada por Tutikian e Dal Molin (2021, p. 42) que descreve “São dois os principais tipos de aditivos usados: Os superplastificantes e os modificadores de viscosidade”.

2.3 Adições Pozolânicas

Segundo (Mehta e Monteiro, 2014 *apud* Bernardo, 2019) “As adições são materiais minerais finamente moídos que são adicionados ao concreto a fim de lhe conferir propriedades específicas”

Tutikian e Dal Molin (2021, p. 35) aponta que “Além de responsáveis pela resistência à segregação da mistura, as adições minerais podem desempenhar um papel importante para a resistência e durabilidade do concreto, tanto física quanto quimicamente” Esse entendimento reforça que o uso adequado dessas adições contribui não apenas para a estabilidade no estado fresco, mas também para a melhoria do desempenho mecânico e da vida útil do concreto autoadensável, ampliando sua eficiência e sustentabilidade.

De acordo com NBR 12653 (ABNT, 2014) material pozolânico é aquele que, embora tenha pouca ou nenhuma capacidade cimentante por si só, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), liberado pela hidratação do cimento Portland, formando compostos com propriedades cimentantes. Nesse contexto, os efeitos positivos destas pozolanas no concreto têm sido comprovados por diferentes estudos.

Pesquisas realizadas por Filho *et al.* (2020) mostram que a adição de materiais pozolânicos em pastas cimentícias melhora seu comportamento reológico, facilitando o manuseio e a mistura no estado fresco. Essas adições aumentam a fluidez e reduzem a viscosidade da pasta. Isso favorece a trabalhabilidade e o desempenho do concreto. Além disso, contribuem para a estabilidade da mistura, reduzindo exsudação e segregação.

2.3.1 Metacaulim

O metacaulim (MK) é uma adição mineral de elevada reatividade pozolânica. Ele é obtido a partir da calcinação de argilas caulínicas puras, submetidas a temperaturas entre 650 °C e 800 °C, processo que intensifica sua atividade pozolânica (Medeiros *et al.*, 2022).

A Figura 2.1 ilustra o metacaulim, destacando sua aparência física característica e sua forma finamente pulverizada, utilizada como adição pozolânica na produção do CAA.

Figura 2.1 - Ilustração do Metacaulim



Fonte: Metacaulim do Brasil (2025).

Segundo Vicentini, Assunção e Akasaki (2016, p. 127), o metacaulim é composto principalmente de sílica e alumina e possui um processo de produção menos poluente que o do cimento Portland, apresentando benefícios tanto ambientais quanto técnicos. Esses autores destacam que, além de reduzir as emissões de CO₂, essa adição mineral contribui para a melhoria das propriedades do concreto, o que a torna uma alternativa adequada para a substituição parcial do cimento na produção de CAA.

A NBR 15894-1 (ABNT, 2010), estabelece os requisitos para o metacaulim usado como adição ao cimento Portland em concretos, argamassas e pastas. Define suas características químicas e físicas para garantir alta atividade pozolânica, que melhora resistência, durabilidade e trabalhabilidade. Obtido pela calcinação de argilas caulínicas, o metacaulim densifica a matriz do concreto e reduz a permeabilidade. O cumprimento das diretrizes normativas assegura que o metacaulim apresente o desempenho e qualidade esperado, e nesse mesmo contexto é comprovado através das pesquisas de diversos autores que sua aplicação resulta em melhorias

significativas no desempenho do concreto, evidenciando resultados positivos em termos de resistência, durabilidade e trabalhabilidade.

No estudo de Medeiros *et al.* (2022), verificou-se que a combinação de diferentes adições pozolânicas resultou em concretos autoadensáveis com desempenho significativamente superior ao traço de referência. As misturas analisadas apresentaram elevada resistência mecânica e excelente durabilidade, mesmo com menor consumo de cimento. Além disso, destacou-se a maior proteção contra a penetração de cloretos, o que evidencia a eficácia da solução combinada entre os materiais pozolânicos empregados. Esses resultados reforçam o potencial do uso combinado dessas adições na produção de concretos mais eficientes e duráveis.

Da mesma forma, os ensaios realizados por Dassoler *et al.* (2021) demonstraram que a adição de 10% de metacaulim de alta reatividade (MAR) ao concreto autoadensável reduziu a absorção de água por capilaridade, especialmente com cura úmida. Apesar de uma leve queda na resistência à compressão, os resultados foram satisfatórios. A cura úmida e o aumento da idade de ensaio (63 dias) elevaram significativamente a resistência. Houve também aumento no módulo de elasticidade com 10% de MAR aos 28 dias em cura exposta. Concluindo que a substituição parcial do cimento por MAR é viável e mantém boas propriedades físicas.

De forma alinhada a partir da aplicação de três diferentes métodos de dosagem, foi possível identificar que, para o concreto autoadensável (CAA) alcançar um bom desempenho reológico no estado fresco e satisfatórias propriedades mecânicas no estado endurecido, é recomendável que sua composição contenha, no mínimo, 40% de pasta, além da substituição de 10% do cimento por metacaulim. Essa combinação mostrou-se eficaz para garantir a qualidade e o desempenho desejado do concreto (Vicentini; Assunção; Akasaki, 2016).

2.3.2 Cinza da Casca de Arroz

Conforme Moraes (2014 *apud* Azevedo, 2021 p. 20) A queima da casca de arroz com fins de aproveitamento energético gera, como subproduto, a cinza da casca de arroz (CCA), um material residual caracterizado por sua baixa densidade, em torno de 1800 kg/m³.

A Figura 2.2 demonstra a cinza da casca de arroz, destacando sua coloração escura e textura característica, resultante da queima controlada da casca de arroz para obtenção desse material pozolânico.

Figura 2.2 - Ilustração da Cinza da Casca de Arroz



Fonte: Made-In-China (2025).

A temperatura aplicada no processo de queima da casca de arroz desempenha papel decisivo na morfologia e na eficiência pozolânica da cinza produzida. Quando a CCA é obtida sob queima controlada, especialmente em temperaturas inferiores a 600 °C, tende a apresentar sílica predominantemente amorfa, condição que favorece sua reatividade com o cimento e com o hidróxido de cálcio. Além disso, tanto a morfologia resultante quanto o tempo de moagem influenciam diretamente o nível de atividade pozolânica do material, refletindo de forma significativa no desempenho das misturas cimentícias (Silva *et al.*, 2015).

De acordo com estudos que investigaram a substituição parcial do cimento Portland por sílica proveniente da queima da casca de arroz em concretos autoadensáveis, foi demonstrado que é possível utilizar até 30% de SCA sem comprometer as resistências mecânicas do material.

Mendes (2015) conseguiu demonstrar através de suas pesquisas que o concreto autoadensável com cinza da casca de arroz (CCA) tiveram desempenho parcialmente satisfatório no estado fresco, mas apresentaram maior resistência mecânica e pasta endurecida mais resistente, mesmo com maior relação água/cimento. Além disso, o módulo de elasticidade mostrou que esses concretos possuem maior ductilidade, correlacionando-se com a resistência à compressão.

No estudo realizado por Alcantara *et al.* (2018), foi investigada argamassas autoadensáveis com 35% de cinza da casca de arroz (CCA) e superplastificante, comparando-

as a argamassas vibradas convencionais. Os resultados mostraram que as argamassas com CCA apresentaram boa mobilidade, sem segregação, além de maior resistência mecânica e menor absorção de água, mesmo com maior relação água/cimento, destacando a eficácia da CCA no desempenho do material.

2.3.3 Sílica Ativa

A sílica ativa é um subproduto da indústria metalúrgica, obtido durante a produção de silício metálico ou ligas de ferro-silício em fornos elétricos a cerca de 2000 °C. Nesse processo, o quartzo é reduzido, liberando um gás rico em dióxido de silício amorfo (SiO_2), que se condensa e forma a sílica ativa, um material altamente reativo (Silva; Libório, 2004 *apud* Menezes, 2024).

A Figura 2.3 a seguir demonstra a imagem ilustrativa da sílica ativa.

Figura 2.3 – Ilustração da sílica ativa



Fonte: TEC Machine Fibras Estruturais (2025).

“A sílica ativa pode ser considerada uma adição com propriedades cimentícias, já que reagem principalmente com o hidróxido de cálcio liberado pela hidratação dos silicatos do cimento” (Neville, 2016 *apud* Silva, 2024 p.32).

Conforme a NBR 13956-1 (ABNT, 2012) especifica que a sílica ativa é uma pozolana alta reatividade constituída essencialmente de partículas esféricas com diâmetros menores que 10^{-6} m de sílica no estado amorfo. Além disso, essa adição pode ser classificada em duas formas: densificada e não densificada. A forma não densificada é mais reativa, porém difícil de manusear. Já a densificada tem maior densidade, facilitando o transporte e a dosagem.

Estudos como o de Gudinho *et al.* (2022) mostraram que substituir de 7% a 10% do cimento por sílica ativa melhora a fluidez, resistência e durabilidade do concreto autoadensável (CAA). Embora os insumos sejam caros, há economia na mão de obra, pois não é preciso vibrar

ou nivelar. A combinação com aditivos otimiza ainda mais o desempenho, tornando o CAA superior ao concreto convencional. A aplicação é viável no mercado goiano devido à disponibilidade dos materiais.

De forma similar, Souza (2021) verificou que a adição de 10% de sílica ativa no concreto não aumentou significativamente a necessidade de superplastificante, mantendo a trabalhabilidade próxima ao traço de referência. No estado endurecido, a sílica ativa melhorou a durabilidade, reduzindo a porosidade e a migração de íons cloreto. Também proporcionou melhores resultados em absorção, resistividade elétrica e carbonatação. Esses ganhos decorrem da reação pozolânica que aprimora a microestrutura do concreto. Assim, a sílica ativa se mostrou eficiente para melhorar o desempenho sem comprometer o estado fresco.

Já Batistela (2023) verificou que a adição de sílica ativa ao cimento CPZ-II-32 reduziu a fluidez no estado fresco, devido ao aumento da coesão pela maior superfície de contato, tornando a mistura mais viscosa. No estado endurecido, a sílica ativa promoveu um ganho de resistência mecânica de aproximadamente 60%, resultado das reações pozolânicas que formam silicato de cálcio. O cimento de alta resistência inicial apresentou boa estabilização com a adição, mantendo a viabilidade de uso. O pH diminuiu aos 7 dias devido ao consumo de hidróxido de cálcio e aumentou aos 28 dias pela liberação de cal hidratada. Esses resultados indicam melhorias significativas na resistência e modificações químicas ao longo do tempo.

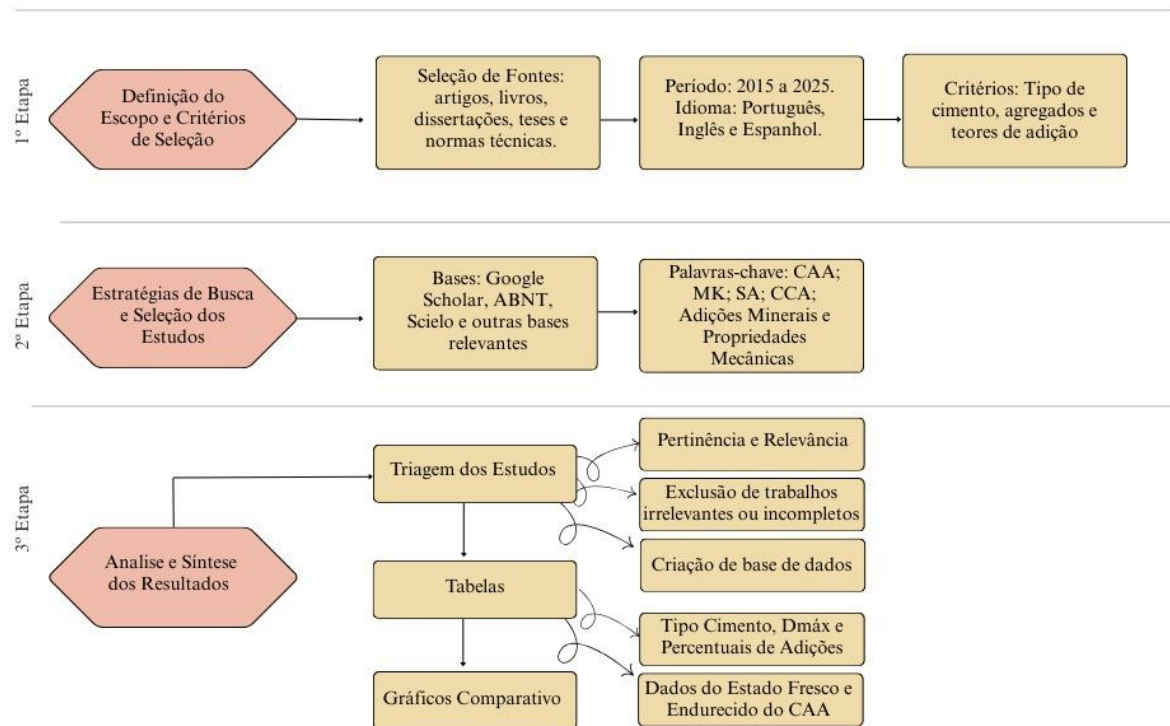
3 METODOLOGIA

O trabalho desenvolvido trata-se de uma pesquisa bibliográfica sistemática, cujo objetivo é analisar os materiais constituintes dos concretos autoadensáveis, com ênfase nas adições pozolânicas tais como metacaulim, cinza da casca de arroz e sílica ativa.

“Pesquisa bibliográfica é um tipo específico de produção científica: é feita com base em textos, como livros, artigos científicos, ensaios críticos, dicionários, enciclopédias, jornais, revistas, resenhas, resumos” (Marconi; Lakatos, 2017). Portanto, a pesquisa bibliográfica permite o acesso de informações, estudos e dados já produzidos por outros autores possibilitando a compreensão e análise de fenômenos diferentes, sem que haja a necessidade de desenvolver estudos em campo ou experimentos.

A Figura 3.1 apresenta o fluxograma das etapas que compõem o desenvolvimento da pesquisa, permitindo visualizar de forma organizada e sequencial todo o procedimento adotado.

Figura 3.1– Fluxograma da Metodologia



Fonte: Elaboração própria (2025).

3.1 Definição do Escopo e Critérios de Seleção

Para o desenvolvimento deste estudo, foram selecionadas fontes confiáveis, incluindo artigos acadêmicos e científicos, livros, dissertações, teses e normas técnicas nacionais e internacionais, que fundamentaram a investigação sobre o uso de adições pozolânicas em concretos autoadensáveis. Foram incluídos trabalhos publicados entre 2015 e 2025, redigidos em português, inglês e espanhol, que atenderam aos critérios de inclusão previamente estabelecidos. A seleção priorizou estudos que apresentaram informações detalhadas sobre o tipo de cimento empregado, o diâmetro máximo dos agregados e os teores de substituição utilizados, além de ensaios no estado fresco e suas propriedades mecânicas, garantindo a consistência e a comparabilidade dos dados coletados.

3.2 Estratégia de Busca e Seleção dos Estudos

A obtenção dos dados foi conduzida por meio de pesquisas estruturadas em diversas plataformas digitais especializadas, tais como Google Scholar, ABNT Coleção e Scielo, entre outras bases relevantes. A pesquisa foi orientada por um conjunto de palavras-chave selecionadas estrategicamente, como “concreto autoadensável”, “metacaulim”, “sílica ativa”, “cinza da casca de arroz”, “adições minerais” e “propriedades mecânicas”, contemplando também sinônimos e variações pertinentes. Essa abordagem permitiu mapear de maneira abrangente e sistemática os estudos disponíveis, assegurando a coleta de dados coerentes e representativos para a análise das adições pozolânicas em concretos autoadensáveis.

3.3 Análise e síntese dos resultados

Após a etapa de triagem, procedeu-se a uma avaliação detalhada das publicações selecionadas, considerando sua pertinência ao tema e a contribuição para o alcance dos objetivos da pesquisa. Foram excluídos trabalhos incompletos ou que não apresentaram correlação direta com a pesquisa. Esse procedimento possibilitou a construção de uma base de dados, capaz de consolidar diferentes perspectivas teóricas e metodológicas presentes na literatura sobre concretos autoadensáveis.

Com o intuito de estruturar a análise dos dados, foi inicialmente elaborado tabelas contendo os estudos publicados que abordaram o uso de adições minerais como metacaulim,

cinza da casca de arroz e sílica ativa em concretos autoadensáveis. Nessa etapa preliminar, foram extraídas informações gerais de cada trabalho, tais como o tipo de cimento empregado, diâmetro máximo característico dos agregados e os percentuais de adição utilizados, constituindo a base para o conjunto de resultados.

Posteriormente, essa base de dados foi refinada com o objetivo de atender ao segundo eixo da investigação, mantendo-se apenas os estudos que apresentavam dados completos e compatíveis com os parâmetros estabelecidos, incluindo valores de slump-flow, T500 e J-Ring test no estado fresco, bem como os resultados mecânicos no estado endurecido. Para essa etapa, adotaram-se como referência os valores de resistência à compressão axial aos 28 dias e de resistência à tração por compressão diametral aos 28 e 45 dias, por se tratar de idades amplamente utilizadas como parâmetro comparativo em estudos de desempenho do concreto autoadensável.

O resultado desse processo foi a elaboração de tabelas, formadas exclusivamente por pesquisas que proporcionaram dados suficientes para análise comparativa, garantindo rigor metodológico e consistência na interpretação dos resultados, construídos a partir de um apanhado geral do primeiro objetivo, procedendo-se a uma seleção mais criteriosa dos estudos, considerando apenas aqueles que atendiam aos parâmetros específicos estabelecidos na pesquisa, ou seja, que apresentavam resultados referentes ao comportamento do concreto tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

E para concluir foram realizados a construção dos gráficos comparativos, selecionados teores de substituição representativos para cada adição mineral, considerando a disponibilidade de dados e a necessidade de avaliar diferentes condições de dosagem. Em todos os casos, foram considerados a/a, tipo de cimento e resistência à compressão axial, com toda a organização realizada no Excel.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados referentes ao comportamento dos concretos autoadensáveis, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, produzidos com a incorporação de adições pozolânicas como: metacaulim, cinza da casca de arroz e sílica ativa. A análise desses dados permite compreender de forma comparativa a influência de cada material sobre o desempenho final dos CAA estudados.

Durante a seleção dos estudos bibliográficos, alguns autores foram excluídos da análise comparativa por não atenderem aos critérios definidos. O estudo de Diniz *et al.* (2018) foi desconsiderado, uma vez que o traço desenvolvido combinava simultaneamente duas adições, metacaulim e pozolana da casca de arroz, o que inviabilizou a avaliação individual do efeito de cada material. De modo semelhante, o trabalho de Medeiros (2016) também foi excluído por apresentar a mesma limitação metodológica. Já o autor Schmidt (2016) não foi contemplado, pois seus resultados se restringiam ao estado endurecido do CAA, com idades de 3 e 7 dias, não correspondendo aos parâmetros adotados nesta pesquisa, que estabelecem resistência à compressão axial aos 28 dias e resistência à tração por compressão diametral aos 28 e 45 dias.

4.1 Dosagens de concretos autoadensáveis produzidos com distintos percentuais de adições pozolânicas

O levantamento inicial dos dados foi conduzido com o propósito de subsidiar o primeiro objetivo específico desta pesquisa, voltado à identificação e compilação de diferentes dosagens de concretos autoadensáveis produzidos com distintos percentuais de adições pozolânicas. Para tal, foi executada uma revisão bibliográfica sistematizada, abrangendo estudos experimentais disponíveis na literatura técnica que empregaram metacaulim, cinza da casca de arroz e sílica ativa como materiais suplementares ao cimento Portland, no período de 2015 a 2025.

As Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 reúnem os parâmetros de dosagem extraídos das publicações selecionadas, contemplando o tipo de cimento, o diâmetro máximo dos agregados e os percentuais de substituição utilizados em cada composição analisada.

Na Tabela 4.1 são apresentados os dados referentes às misturas que empregaram metacaulim como material pozolânico.

Tabela 4.1 - Parâmetros de dosagem de CAA produzidos com adição de metacaulim substituindo parcialmente o cimento Portland.

Autor	Tipo de Cimento	D_{máx} Agregado (mm)	Percentuais Utilizados
Diniz, <i>et al</i> (2018)	CPV-ARI	12,5	20% e 30%
Farias, <i>et al</i> (2012)	CP-II F 32	6,3	10%, 15% e 20%
Medeiros (2016)	CPV-ARI RS	12,5	20% e 30%
Miranda (2018)	CP II F - 40	12,5 e 19	10% E 20%
Paulino e Gomes (2015)	CP V ARI RS	9,5 e 19	10%
Santos (2016)	CP V ARI RS	12,5	10% E 20%
Schmidt (2016)	CPV-ARI	não identificado	10% E 20%
Vicentini; Assunção; Akasaki (2016)	CP II-Z-32	não identificado	10%, 20% e 30%
Vicentini; Belluzi; Akasaki (2017)	CP II-Z-32	não identificado	20% e 30%

Fonte: Elaboração própria (2025).

Verificou-se que os percentuais de substituição do cimento Portland por metacaulim variaram entre 10% e 30%, predominando o uso dos cimentos CPV-ARI e CP II-Z-32. O diâmetro máximo característico dos agregados (D_{máx}) apresentaram faixas entre 6,3 mm e 19 mm.

A Tabela 4.2 consolida as principais condições de dosagem aplicadas nos estudos consultados, contemplando informações relativas ao tipo de cimento utilizado, percentual de substituição, e granulometria dos agregados referentes às composições de concretos autoadensáveis que utilizaram cinza da casca de arroz (CCA) como adição mineral.

Tabela 4.2 - Parâmetros de dosagem de CAA produzidos com adição de CCA substituindo parcialmente o cimento Portland.

Autor	Tipo de Cimento	D_{máx} Agregado (mm)	Percentuais Utilizados
Cadorin (2016)	CP II-Z-32	12,5	5% e 15%
Dorneles; Sokolovicz (2024)	CP-V ARI	19,0	15%
Ferreira; Ribeiro (2018)	CPV-ARI	12,5	5% 10% 20%
Ferro (2019)	CPV-ARI	9,5	5%, 10%, 15%
Medeiros, <i>et al</i> (2022)	CP-V ARI RS	12,5	20 e 30 %
Mendes (2015)	CP II Z-32	19,0	35%
Padoin (2017)	CP IV-32	9,5	10% 20% E 30%

Fonte: Elaboração própria (2025).

Os trabalhos analisados dos concretos autoadensáveis produzidos com CCA indicaram percentuais de substituição variando entre 5% e 35%, sendo mais comuns os teores intermediários, de 10% a 20%. Esta alta variação percentual indica a influência da qualidade final da CCA após a queima em termos dos parâmetros de temperatura de incineração, solo de plantio do arroz, tipo de forno que impactam no diâmetro médio das partículas e o teor de SiO₂. Neste sentido, Fernandes (2020) cita que a CCA obtida através de combustão controlada da casca de arroz pode conter 87-97% de sílica e alguma quantidade de impurezas metálicas.

Contudo, De Oliveira Carrêa *et al.*, (2024) citam que as CCA geradas em usina termoelétrica de indústria de beneficiamento de grãos, com queima não controlada (400 a 500°C, por 15 a 30 minutos), possui entre 69,7% e 72,0% de óxido de silício (SiO₂) e D50 de aproximadamente 50 µm. A concentração de silício aumenta nas cinzas, conforme ocorre o aumento da temperatura e do tempo de queima das cascas de arroz (500°C a 700°C, por 30 a 240 minutos) e a moagem em moinhos de discos promovem uma redução do D50 entre 6,12 e 14,1 µm.

Os tipos de cimento empregados nas dosagens dos CAA produzidos com adição parcial de CCA com maior frequência foram CPV-ARI e CP II-Z-32, e o diâmetro máximo característico dos agregados (D_{máx}) variou de 9,5 mm a 19 mm.

Por fim, a Tabela 4.3 apresenta as composições que utilizaram a sílica ativa como adição mineral nos CAA, demonstrando os parâmetros de dosagem considerados nos trabalhos, incluindo percentual de substituição do cimento, tipo de cimento, e granulometria dos agregados, permitindo a sistematização das diferentes combinações de materiais utilizadas para a produção de concretos autoadensáveis com sílica ativa.

Tabela 4.3 - Parâmetros de dosagem de CAA produzidos com adição de sílica ativa substituindo parcialmente o cimento Portland.

Autor	Tipo de Cimento	D_{máx} Agregado (mm)	Percentuais Utilizados
Bacarji, <i>et al</i> (2019)	CPB-40	4,75	10%
Barboza; Storch; Almeida Filho (2020)	CP II-Z-32	9,5	10%
Dorneles; Sokolovicz (2024)	CPV –ARI	19,0	15%
Ferreira; Ribeiro (2018)	CPV-ARI	12,5	10%
Mata (2018)	CP II-F 32	12,5	10%
Mendes (2019)	CP-II F 40	19,0	10%

Fonte: Elaboração própria (2025).

Os percentuais de substituição identificados para os CAA produzidos com SA analisados situam-se principalmente entre 10% e 15%, sendo o primeiro o mais empregado. Observa-se que não houve predominância de um tipo específico de cimento, sendo empregados diferentes tipos ao longo dos estudos, o que evidencia a diversidade de condições de dosagem de CAA adotadas na literatura. O diâmetro máximo dos agregados ($D_{m\acute{a}x}$) variou de 4,75 mm a 19 mm.

4.1.1 Análise quanto as dosagens de concretos autoadensáveis produzidos com distintos percentuais de adições pozolânicas

As faixas de substituição do cimento Portland por adições identificadas permitem observar tendências quanto ao uso de cada material: o metacaulim é frequentemente aplicado em teores de até 10% e 20%, a cinza da casca de arroz apresenta variação mais ampla, chegando a 35%, enquanto a sílica ativa é usada em menores proporções, entre 10% e 15%, devido à sua alta reatividade.

Os diâmetros máximos característicos dos agregados variam de 4,75mm a 19mm. O tipo de cimento empregado na produção dos CAA são aqueles com menor teor de adições tais como o CP V-ARI, CP II F-40 e CP II Z-32. Esses parâmetros servirão de base para a análise comparativa do desempenho dos CAA nos estados frescos e endurecidos apresentados nas próximas seções.

4.2 Análise das características no estado fresco que são obtidas na produção de concretos autoadensáveis produzidos com diferentes percentuais de substituição de cimento Portland por adições de metacaulim, cinza da casca de arroz e sílica ativa

Neste tópico são discutidos os resultados obtidos dos CAA no estado fresco quando o cimento Portland é substituído por adições pozolânicas. O segundo objetivo específico deste estudo foi estruturado de forma a demonstrar as características do CAA no estado fresco quando produzidos com diferentes percentuais de substituição de cimento Portland por adições de metacaulim, cinza da casca de arroz e sílica ativa. Assim, foram elaboradas tabelas distintas para cada adição, de modo a organizar e comparar de maneira mais clara os resultados obtidos

pelos autores selecionados, considerando os parâmetros e variáveis de interesse definidos para esta pesquisa.

4.2.1 Análises dos resultados no estado fresco dos CAA produzidos com metacaulim

A análise dos resultados no estado fresco dos CAA produzidos com metacaulim são apresentados na Tabela 4.4. Considerou-se os critérios estabelecidos pelas normas NBR 15823-2 (ABNT, 2017) (Concreto autoadensável – Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento T500) e NBR 15823-3 (ABNT, 2017) (Concreto autoadensável – Determinação do espalhamento com o anel J). Esses ensaios permitem avaliar, respectivamente, a fluidez, a viscosidade plástica aparente e a capacidade de passagem do concreto, parâmetros essenciais para o desempenho do CAA no estado fresco.

Tabela 4.4 - Características do estado fresco dos CAA produzidos com adições de metacaulim em 10%, 15% e 20% em substituição parcial do cimento Portland.

MK 10%				
Autor	Identificação Concretos	Slump-Flow (mm)	T500 (S)	J Ring Test (mm)
Farias, et al (2012)	CAA-02	632,5	2,59	6,25
Miranda (2018)	M10	665	2,38	-
Paulino e Gomes (2015)	MK10%ADT"C"	686	2,80	-
Santos (2016)	CAA10MK	740	3,10	33
Vicentini; Assunção; Akasaki (2016)	CAA ₄₀₋₁₀	615	-	-
MK 15%				
Farias, et al (2012)	CAA-03	647,5	3,84	5,00
MK 20%				
Farias, et al (2012)	CAA-04	562,5	3,97	11,25
Miranda (2018)	M20	675	2,15	0
Santos (2016)	CAA20MK	700	4,20	37
Vicentini; Assunção; Akasaki (2016)	CAA ₄₀₋₂₀	605	-	-

Fonte: Elaboração própria (2025).

A NBR 15823-1 (ABNT, 2017) classifica os CAA conforme os procedimentos de ensaios da NBR 15823-2 (ABNT, 2017) conforme as Classes de espalhamento (slump-flow), SF1 (550 a 650mm), SF2 (660 a 750mm) e SF3 (760-850mm). Desta forma verifica-se que na

literatura os CAA produzidos com metacaulim promovem espalhamentos compreendidos entre as classes SF1 e SF2.

Os resultados de Slump-flow dos CAA analisados variaram aproximadamente entre 562,5 mm e 740 mm, demonstrando que a maioria das misturas apresentou comportamento compatível com as exigências da NBR 15823-1 (ABNT, 2017), que define como satisfatórios os concretos capazes de escoar livremente, sem segregação. Nos teores de 10% e 15% de metacaulim, observou-se boa fluidez e estabilidade, com valores médios acima de 600 mm, indicando adequada trabalhabilidade. Já para o teor de 20%, notou-se redução no espalhamento, especialmente no estudo de Farias, *et al.*, (2012) que obteve aproximadamente 562,5 mm, comportamento associado ao aumento do teor de finos e à consequente elevação da viscosidade da mistura.

O resultado do ensaio (T500) é o intervalo de tempo, em segundos, entre o início e o final do escoamento do concreto, a partir do diâmetro do molde (200 mm) até a marca circular de diâmetro 500 mm da placa-base. (ABNT NBR 15823-2, 2017). A partir dos estudos selecionados observou-se classes de viscosidade plástica aparente t500 (sob fluxo livre) valores entre 2,15 s e 4,2 s, permanecendo dentro da faixa VS2 indicada pela NBR 15823-1 (ABNT, 2017), que considera esse intervalo como representativo de concretos adequado para a maioria das aplicações correntes, apresenta efeito tixotrópico que acarreta menor pressão sobre as fôrmas e melhor resistência à segregação.

Neste sentido Miranda (2018) e Farias, *et al.*, (2012) apresentaram misturas com menores tempos, comportamentos mais fluidos, com maior velocidade de escoamento, enquanto tempos mais altos, como o obtido por Santos (2016), sugerem misturas mais coesas e viscosas, possivelmente devido à maior absorção de água pelas partículas finas ou menor dosagem de aditivo superplastificante.

O ensaio J-Ring, conforme descrito na NBR 15823-3 (ABNT, 2017), é utilizado para avaliar a capacidade de passagem do concreto autoadensável entre obstáculos, simulando a presença de armaduras. Os resultados encontrados na literatura apresentaram valores de diferença entre o diâmetro de espalhamento livre e o medido com o anel J variando de 5 mm a 37 mm. Diferenças menores, próximas de 5 mm, indicam passagem livre e boa coesão da mistura, evidenciando que o concreto manteve sua fluidez sem ocorrência de bloqueios.

Já os valores mais elevados, como o registrado por Santos (2016), que apresentou diferença de 37 mm, indicam restrição significativa ao escoamento, possivelmente relacionada ao aumento da viscosidade e da coesão do material em função do teor de metacaulim (20%) e

das características reológicas da mistura. A fluidez da pasta diminui com o aumento de teor de metacaulim, uma vez que esse material possui área superficial significativamente maior que a cinza volante, elevando a demanda de água da mistura. Com isso, a quantidade de água livre diminui e a fluidez é prejudicada (Ling *et al.*, 2018).

Ao relacionar os resultados da Tabela 4.4 com a Tabela 4.5, que apresenta a caracterização química dos metacaulins empregados pelos autores, observa-se uma correlação direta entre a composição e o desempenho no estado fresco.

Tabela 4.5 - Caracterização Química do Metacaulim

Autor	Composto Químico - % em massa	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃
Miranda (2018)	50,54	42,28
Santos (2016)	58,0	34,00
Vicentini; Assunção; Akasaki (2016)	58,39	35,47

Fonte: Elaboração própria (2025).

O metacaulim utilizado por Miranda (2018) possui 50,54% de SiO₂ e 42,28% de Al₂O₃, indicando um material com elevada concentração de alumina, o que tende a aumentar a reatividade pozolânica, mas também a demanda de água. Ainda assim, o concreto em questão apresentou bons resultados de fluidez e tempo de escoamento, sugerindo que o ajuste na dosagem de aditivo superplastificante compensou o efeito da maior reatividade do material.

Já o metacaulim empregado por Santos (2016) apresenta 58% de SiO₂ e 34% de Al₂O₃, composição mais equilibrada e com maior teor de sílica, característica que favorece a formação de misturas mais estáveis, com menor absorção de água e melhor comportamento reológico, o que justifica os elevados valores de Slump-flow e o baixo tempo de escoamento observados em seus resultados. Por outro lado, o material de Vicentini; Assunção; Akasaki (2016), com 58,39% de SiO₂ e 35,47% de Al₂O₃, apresentou comportamento distinto, possivelmente em função do tipo de cimento utilizado (CP II-Z-32), que apresenta pozolana em sua composição, podendo influenciar em menor espalhamento e ligeira perda de fluidez.

De modo geral, a análise integrada das Tabelas 4.4 e 4.5 evidencia que as variações na composição química e nas características físicas do metacaulim influenciam diretamente o comportamento do CAA no estado fresco, afetando sua fluidez, viscosidade e capacidade de passagem. Misturas com teores intermediários de metacaulim (até 15%) e maior proporção de sílica ativa apresentaram desempenho mais equilibrado, conforme os critérios estabelecidos

pelas normas da ABNT, garantindo simultaneamente autoadensabilidade e estabilidade da mistura.

4.2.2 Análises dos resultados no estado fresco dos CAA produzidos com cinza da casca de arroz

Dando sequência à análise dos resultados, a Tabela 4.6 apresenta os dados referentes ao estado fresco do concreto autoadensável com adição de cinza da casca de arroz (CCA) em diferentes teores de substituição do cimento Portland. Mantiveram-se os parâmetros de avaliação, com o objetivo de comparar o comportamento reológico do concreto em função dessa nova adição mineral, conforme os estudos selecionados. Os dados foram organizados a partir das informações apresentadas na Tabela 4.2, considerando apenas os autores que atendiam aos critérios estabelecidos. O estudo de Medeiros *et al.*, (2022) foi excluído por empregar simultaneamente duas adições minerais, metacaulim e pozolana da casca de arroz, o que poderia comprometer a comparação direta dos resultados.

Tabela 4.6 - Características do estado fresco dos CAA produzidos com adições de CCA em 5%, 10%, 15%, 20% e 30% em substituição parcial do cimento Portland.

CCA 5%				
Autor	Identificação Concretos	Slump-Flow (mm)	T500 (S)	J Ring Test (mm)
Ferreira; Ribeiro (2018)	TICCA	600	-	600
	TRCCA	500	-	500
	TPCCA	560	-	560
Ferro (2019)	SCA	780	2,5	31
Cadorin (2016)	CPCCA	550	2,71	36
CCA 10%				
Ferreira; Ribeiro (2018)	TICCA	540	-	540
	TRCCA	520	-	520
	TPCCA	560	-	560
Ferro (2019)	SCA	666	2,8	28
Padoin (2017)	CP10%	635	-	25
CCA 15%				
Ferro (2019)	SCA	615	3,0	15
Cadorin (2016)	CPCCA	550	3,6	45

CCA 20%				
Ferreira; Ribeiro (2018)	TICCA	540	-	560
	TRCCA	560	-	590
	TPCCA	580	-	570
Padoin (2017)	CP20%	597	-	22
CCA 30%				
Padoin (2017)	CP30%	525	-	50

Fonte: Elaboração própria (2025).

Observa-se que Ferreira e Ribeiro (2018) apresenta três traços para cada porcentagem de adição mineral, TICCA, TRCCA e TPCCA, correspondentes, respectivamente, ao traço intermediário, traço rico e traço pobre em pasta. Essa diferenciação possibilita avaliar o impacto do teor de pasta sobre a fluidez e a capacidade de passagem do concreto. Nota-se que nos teores de CCA (5%, 10% e 20%), o comportamento segue uma tendência coerente: o traço rico (TRCCA) apresenta os menores valores de espalhamento, exceto na porcentagem de 20%, onde o (TRCCA) alcança um espalhamento maior que o (TICCA) enquanto o pobre (TPCCA) tende a alcançar maiores diâmetros. Essa relação evidencia que o aumento da quantidade de pasta confere maior coesão à mistura, reduzindo a mobilidade do concreto, ao passo que traços mais pobres, por conterem menor teor de finos, favorecem o escoamento.

No que se refere ao Slump-Flow, os valores variaram entre 500 mm e 600 mm para Ferreira e Ribeiro (2018), enquadrando-se parcialmente na faixa recomendada pela NBR 15823-1 (ABNT, 2017), que estabelece valores compreendidos na classe SF1 de espalhamento. Essa faixa inferior pode ser atribuída à alta finura e à natureza pozolânica da CCA, que aumenta a demanda de água e reduz a fluidez da mistura.

Em contrapartida, Ferro (2019) obteve para o percentual de substituição de 5% de CCA, 780 mm (classe de escoamento SF3), o que indica misturas com melhor capacidade de deformação, possivelmente devido a ajustes na relação água/cimento ou à menor incorporação de adição. O que foi confirmado por Padoin (2017), ao utilizar 30% de adição de CCA, apresentou Slump-Flow de 525 mm, valor inferior ao mínimo exigido pela norma (550 mm), o que caracteriza uma redução significativa da fluidez do concreto. Esse comportamento reforça o efeito negativo do aumento excessivo de finos, que intensifica a absorção de água e aumenta a viscosidade da mistura.

De forma semelhante, Cadorin (2016) obteve valores de 550 mm (classe de escoamento SF1) para os teores de 5% e 15% de CCA, situando-se no limite inferior da faixa normativa, o

que indica misturas com escoamento mais restrito, mas ainda dentro do comportamento aceitável para concretos autoadensáveis. Esses resultados demonstram que teores moderados de CCA tendem a manter a trabalhabilidade em níveis adequados, enquanto adições elevadas, como as de 30%, comprometem a autoadensabilidade do material.

O parâmetro T500, que representa o tempo necessário para o concreto atingir 500 mm de espalhamento e reflete sua viscosidade, apresentou valores entre 2,5 s e 3,6 s para as dosagens de CAA empregadas por Ferro (2019) e Cadorin (2016), o que indica classificação VS2 indicada pela NBR 15823-1 (ABNT, 2017), demonstrando misturas de viscosidade moderada e escoamento estável.

Quanto aos resultados dos ensaios J-Ring, observou-se que Ferreira e Ribeiro (2018) apresentaram valores idênticos de diâmetro de espalhamento entre o Slump-Flow e o J-Ring, variando de 500 mm a 600 mm, o que indica diferença nula (0 mm) para os teores de 5% e 10% de CCA. Já para o teor de 20%, verificaram-se diferenças de 20 mm, 30 mm e 10 mm para os traços intermediário, rico e pobre, respectivamente. Isso significa que o concreto manteve sua capacidade de escoamento mesmo na presença de obstáculos, evidenciando excelente habilidade de passagem (Classe PJ 1) e para o traço rico (Classe PJ 2), conforme a NBR 15823-1 (ABNT, 2017).

Em contrapartida, os autores Cadorin (2016) e Padoin (2017) apresentaram diferenças mais significativas entre os valores de espalhamento livre e com o anel J, variando aproximadamente entre 45 mm e 50 mm para teores de 15% e 30%, respectivamente, sugerindo maior restrição ao fluxo devido à obstrução parcial pela armadura simulada no ensaio. Essa diferença entre os resultados pode estar associada às características da mistura, principalmente ao teor e à reatividade da cinza de casca de arroz utilizada.

Por fim, a relação entre os resultados da Tabela 4.6 e da Tabela 4.7, que apresenta a caracterização química da CCA, evidencia que o elevado teor de Dióxido de Silício (SiO_2) encontrado no material reforça sua natureza pozolânica e explica o aumento da viscosidade observado nos ensaios. Essa característica, embora reduza o espalhamento no estado fresco, pode ser benéfica no estado endurecido, contribuindo para o refinamento da microestrutura e para a melhoria da resistência mecânica e durabilidade do concreto.

Tabela 4.7 - Caracterização química e granulometria da CCA

Autor	Composto Químico % em massa	Granulometria (μm)
	SiO ₂	D50
Ferro (2019)	91,08	19,92
Padoin (2017)	91,48	6,00

Fonte: Elaboração própria (2025).

A Tabela 4.7 de caracterização química da CCA evidencia que ambas as cinzas de casca de arroz apresentaram elevado teor de dióxido de silício amorfo, com valores superiores a 91%, o que confirma o potencial pozolânico do material. No entanto, observa-se uma diferença significativa na granulometria das amostras: enquanto a CCA utilizada por Ferro (2019) apresenta D50 de 19,92 μm , a de Padoin (2017) é consideravelmente mais fina, com D50 de apenas 6,00 μm . Essa distinção granulométrica é relevante, Panato *et al.*, (2023, p.3) afirma em seu trabalho “[...] sua reatividade está diretamente ligada à sua área superficial específica externa, isto é, à área de superfície associada à distribuição de tamanho de partícula medida” partículas mais finas tendem a aumentar a reatividade pozolânica, favorecer o empacotamento das partículas e contribuir para maior densificação da matriz cimentícia.

Pela abordagem de Panato *et al.*, (2023) a CCA apresenta elevada sensibilidade às variações de finura, de modo que a redução do tamanho das partículas tende a potencializar seus efeitos positivos nas propriedades do compósito cimentício. Assim, apesar de ambos os materiais apresentarem composições químicas semelhantes, a diferença na finura pode influenciar diretamente o desempenho mecânico e reológico dos concretos produzidos.

4.2.3 Análises dos resultados no estado fresco dos CAA produzidos com sílica ativa

A Tabela 4.8 reúne os resultados referentes ao comportamento do concreto autoadensável com adição de sílica ativa (SA) em 10% de substituição parcial do cimento Portland, analisado no estado fresco. Esses dados foram extraídos da Tabela 4.3, priorizando os estudos que apresentavam informações compatíveis com os parâmetros de comparação adotados nesta pesquisa. Determinados trabalhos não foram considerados nesta etapa, como de Barboza; Storch; Almeida Filho (2020), por empregarem filler em sua composição, Dorneles; Sokolovicz (2024) e Mata (2018), por disponibilizarem apenas resultados no estado endurecido do CAA.

Os dados, organizados na Tabela 4.8, foram obtidos a partir dos estudos de Ferreira e Ribeiro (2018), Bacarji *et al.*, (2019) e Mendes (2019). O objetivo é compreender como a

substituição parcial do cimento por 10% de sílica ativa influencia o espalhamento (Slump-Flow), a viscosidade (T500) e a capacidade de passagem (J-Ring). Ressalta-se que os autores analisados não disponibilizaram informações referentes à caracterização química da sílica utilizada, o que impossibilita uma correlação direta entre sua composição e o comportamento reológico das misturas no seu estado fresco.

Tabela 4.8 - Características do estado fresco dos CAA produzidos com adições de sílica ativa em 10% em substituição parcial do cimento Portland

SA 10%				
Autor	Identificação Concretos	Slump-Flow (mm)	T500 (S)	J Ring Test (mm)
Ferreira; Ribeiro (2018)	TISA	550	-	550
	TRSA	550	-	550
	TPSA	600	-	600
Bacarji, <i>et al</i> (2019)	3	780	0,97	-
	8	595	1,75	-
	13	560	2,02	-
Mendes (2019)	TRP	666	2,2	528
	TRI	678	2,4	535
	TRR	686	2,2	526

Fonte: Elaboração própria (2025).

De modo geral, os valores de espalhamento variaram entre 550 mm e 780 mm, indicando que as misturas apresentaram as três classes conforme a NBR 15823-1 (ABNT, 2017). Ferreira e Ribeiro (2018) apresentaram valores de 550 a 600 mm (classe SF1), utilizando cimento CP V-ARI e agregado graúdo com $D_{máx}$ de 12,5 mm, apresentaram slump-flow de 550 mm para os traços TISA e TRSA, ambos enquadrados na classe SF1 (550–650 mm), indicando um concreto com espalhamento moderado e adequado para aplicações que não exigem elevada capacidade de preenchimento. O traço TPSA atingiu 600 mm, permanecendo também dentro da classe SF1.

Observa-se, portanto, que, mesmo com alterações na relação água/aglomerante, os concretos mantiveram comportamento reológico estável, com diferenças nulas entre os diâmetros medidos no ensaio J-Ring, o que demonstra excelente capacidade de passagem e coesão do concreto, possivelmente associada à adequada proporção de materiais finos e à boa dispersão da sílica ativa na matriz cimentícia.

Em contrapartida, o Bacarji *et al.*, (2019), que empregaram cimento branco CPB-40 e agregado miúdo ($D_{máx}$ 4,75 mm), obtiveram slump-flow variando entre 560 e 780 mm, abrangendo desde a classe SF1 (550–650 mm) até SF3 (760–850 mm). O traço com maior espalhamento (780 mm) e menor viscosidade ($T_{500} = 0,97$ s) indica elevada fluidez, possivelmente favorecida pela granulometria mais fina dos agregados, característica que reduz o atrito interno da mistura. Já Mendes (2019), utilizando CP II-F-40 e brita de 19 mm de origem granítica, apresentou slump-flow entre 666 e 686 mm, posicionando-se na faixa SF2, com T_{500} entre 2,2 e 2,4 s, evidenciando mistura mais viscosa, mas ainda com excelente capacidade de preenchimento.

Quanto aos resultados dos ensaios realizados empregando o J-Ring, os resultados obtidos por Mendes (2019) apresentaram diferenças expressivas entre os diâmetros de espalhamento livre e com obstáculos, variando entre 138 mm e 160 mm para os traços TRP, TRI e TRR. Esses valores ultrapassam significativamente o limite recomendado pela NBR 15823-1 (ABNT, 2017), que considera diferenças de até 50 mm como indicativas de boa capacidade de passagem. Essa elevada discrepância evidencia que as misturas apresentaram restrição ao escoamento entre os obstáculos, possivelmente em função da alta finura e reatividade da sílica ativa, que aumentam a coesão e a viscosidade da pasta. Além disso, a combinação entre o teor de sílica e a relação água/aglomerante adotada pode ter contribuído para a formação de uma matriz mais densa, resultando em menor mobilidade do concreto no estado fresco.

4.2.4 Análises comparativas entre as propriedades do estado fresco dos concretos autoadensáveis quando produzidos com as adições de metacaulim, cinza da casca de arroz e sílica ativa

Neste tópico foi realizada uma análise das propriedades no estado fresco dos CAA produzidos com as diferentes adições, conforme a Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Características do estado fresco dos CAA produzidos com adições de metacaulim, cinza da casca de arroz e sílica ativa

Adição	Percentuais	Slump-Flow (mm)	T500 (S)
Metacaulim	10	SF1/SF2	VS2
	20	SF1/SF2	VS2
Cinza da casca de arroz	5	SF1	VS2
	15	SF1	VS2
Sílica ativa	10	SF2/SF3	VS1/VS2

Fonte: Elaboração própria (2025).

Os resultados da Tabela 4.9 foram listados conforme os percentuais de adições mais empregados na literatura e filtros de valores das propriedades de CAA no estado fresco. Desta forma, objetivou-se demonstrar as classes de espalhamento (Slump-flow) e T500 obtidas por tipo de adição e percentuais.

Conclui-se que os percentuais de metacaulim de 10% e 20% promovem classes similares de CAA. No caso das CCA, os percentuais de substituição não devem ultrapassar 15% em função da perda de consistência dos concretos autoadensáveis. Já a sílica ativa o percentual de 10% é o padrão de substituição e está adição demonstrou promover classes de espalhamento compreendidas entre SF2 e SF3, porém a viscosidade pode alcançar classes SF1.

Esse caso é confirmado pelos resultados de Bacarji et al. (2019), que apresentaram slump-flow variando de 560 a 780 mm, alcançando inclusive a classe SF3 nos traços de maior fluidez. Além disso, os valores de T500 entre 0,97 s e 2,02 s indicam viscosidade compatível com as faixas previstas, comprovando que a sílica ativa, mesmo em teor relativamente elevado, mantém excelente desempenho reológico. Assim, conclui-se que a SA a 10% é extremamente eficaz em promover elevada fluidez sem comprometer a estabilidade.

4.3 Avaliação das propriedades mecânicas dos concretos autoadensáveis produzidos com diferentes percentuais de substituição de cimento Portland por adições de metacaulim, cinza da casca de arroz e sílica ativa

Nesta seção são apresentados os dados e discussões quanto ao estado endurecido do concreto autoadensável quando produzidos em substituição parcial do cimento Portland por metacaulim, cinza da casca de arroz e sílica ativa.

4.3.1 Análises dos resultados no estado endurecido dos CAA produzidos com metacaulim

A Tabela 4.10 apresenta os valores de resistência à compressão axial e de tração por compressão diametral dos concretos autoadensáveis com adição de metacaulim (MK) em teores de 10% e 20%, determinados aos 28 e 45 dias de idade. Esses resultados permitem avaliar a influência do metacaulim sobre o comportamento mecânico do concreto, considerando tanto o ganho de resistência quanto o desempenho em diferentes idades de cura.

Tabela 4.10 - Dados de resistência à compressão axial e tração por compressão diametral com adição de Metacaulim

10% MK			
Autor	Resistência à Compressão (MPa) 28 dias	Resistência à tração por Compressão Diametral (Mpa) 28 dias	Resistência à tração por Compressão Diametral (Mpa) 45 dias
Vicentini; Assunção; Akasaki (2016)	35,78	0	0
Santos (2016)	66,00	0	0
Miranda (2018)	49,00	4,1	0
Paulino e Gomes (2015)	39,70	0	0
20% MK			
Santos (2016)	60,00	0	0
Miranda (2018)	61,80	4,3	0
Vicentini; Assunção; Akasaki (2016)	23,22	0	0

Fonte: Elaboração própria (2025).

Observa-se que, para o teor de 10% de metacaulim, o maior valor de resistência à compressão foi obtido por Santos (2016), atingindo 66,00 MPa, seguido por Miranda (2018), com 49,00 MPa. Estes pesquisadores utilizaram o cimento CP V ARI RS e CP II F 40, respectivamente.

Santos (2016) utilizou agregados graúdos de rochas de granito e gnaiss e diâmetro máximo característico de 12,5 mm, o que possibilita obter ganhos de resistência à compressão quando comparado a pesquisadora, Miranda (2018) que utilizou em seu estudo duas faixas granulométricas de agregado graúdo de origem calcária, uma com dimensão máxima característica de 12,5 mm e a outra com essa dimensão igual a 19 mm, e relação a/a de 0,61 o

que explica a possível redução da resistência à compressão, mesmo empregando na dosagem um cimento que apresenta aos 28 dias 40 MPa.

Quanto ao comparativo entre os diferentes minerais de composição dos agregados graúdos, sabe-se da alta absorção de água, da quantidade de material pulverulento e da baixa resistência da brita calcária frente à granítica, assim faz-se necessário estudá-la e relacionar um traço trabalhável, por uso de superplastificantes e beneficiamento do agregado, afim de viabilizar o seu uso nos canteiros de obras (Paiva Filho, 2017). Agregados graúdos de origem calcária acarretam redução de propriedades mecânicas, mesmo quando dosados com cimentos Portland de resistência à compressão de 40 MPa.

A relação água/aglomerante também influencia nos resultados das propriedades mecânicas, de maneira que o aditivo superplastificante devam contribuir para redução de água na dosagem dos CAA, porém sem apresentar segregação e exsudação.

Santos (2016) utilizou uma relação água/aglomerante de 0,48, enquanto Paulino e Gomes (2015) utilizaram 0,56, o que explica em partes a redução da resistência à compressão, obtida de 39,70 MPa, mesmo empregando na dosagem do CAA, o cimento CP V ARI RS e agregados graúdos de origem do granito e gnaïsse.

O estudo de Vicentini; Assunção; Akasaki (2016) resultou em resistência à compressão de 35,78 MPa. Os autores utilizaram agregado graúdo de brita basáltica, cimento Portland II-Z-32 e relação água/aglomerante de 0,43.

Estes resultados evidenciam variações de resultados de resistência à compressão dos CAA, para um mesmo percentual de substituição parcial de cimento Portland por metacaulim de 10%, a depender das condições de dosagem e do tipo de material utilizado.

Em relação à tração por compressão diametral, nota-se que apenas Miranda (2018) apresentou valores expressivos, com 4,1 MPa e 4,3 MPa aos 28 dias, indicando um bom desenvolvimento da coesão interna e da aderência entre a pasta e os agregados. Os demais estudos não realizaram ensaio desta propriedade mecânica.

Para o teor de 20% de metacaulim, verificou-se que as resistências à compressão variaram entre 23,22 MPa (Vicentini; Assunção; Akasaki, 2016) e 61,80 MPa (Miranda, 2018), demonstrando que a elevação do teor de adição nem sempre resulta em melhoria das propriedades mecânicas.

No ensaio de tração por compressão diametral, apenas Miranda (2018) apresentou resultados, com 4,3 MPa aos 28 dias, o que sugere que a substituição de 20% de cimento por

metacaulim manteve um bom desempenho na resistência à tração, indicando adequada coesão da matriz cimentícia.

De modo geral, os resultados mostram que o metacaulim contribui para o ganho de resistência à compressão e tração por compressão diametral, especialmente no teor de 10%, atuando como adição pozolânica eficiente na melhoria das propriedades mecânicas do concreto autoadensável. Entretanto, teores mais elevados, como 20%, podem ocasionar redução na resistência, possivelmente em razão do excesso de substituição de cimento.

4.3.2 Análises dos resultados no estado endurecido dos CAA produzidos com cinza da casca de arroz

A Tabela 4.11 apresenta os resultados de resistência à compressão axial e tração por compressão diametral dos concretos autoadensáveis com adição de cinza da casca de arroz (CCA) em diferentes teores de substituição parcial do cimento Portland, 5%, 10%, 15%, 20% e 30%. A análise desses dados permite compreender a influência dessa adição mineral sobre o comportamento mecânico do concreto, tanto em termos de ganho de resistência quanto na evolução dessas propriedades ao longo do tempo, considerando idades de 28 e 45 dias.

Tabela 4.11 - Dados de resistência à compressão axial e tração por compressão diametral com adição de Cinza da Casca de Arroz

CCA 5%			
Autor	Resistência à Compressão (Mpa) 28 dias	Resistência à tração por Compressão diametral (Mpa) 28 dias	Resistência à tração por Compressão diametral (Mpa) 45 dias
Ferreira; Ribeiro (2018)	39,90	0	2,69
	32,50	0	2,48
	24,50	0	1,58
Ferro (2019)	57,06	4,32	0
Cadorin (2016)	26,53	0	0
CCA 10%			
Ferreira; Ribeiro (2018)	34,90	0	3,25
	32,10	0	2,38
	16,50	0	1,65
Ferro (2019)	56,53	3,90	0
Padoin (2017)	25,92	2,33	0
CCA 15%			
Dorneles; Sokolovicz (2024)	58,10	0	0
Ferro (2019)	48,09	3,92	0

Cadorin (2016)	14,65	0	0
CCA 20%			
Ferreira; Ribeiro (2018)	18,50	0	1,00
	33,60	0	2,47
	18,60	0	1,44
Padoin (2017)	27,78	2,06	0
CCA 30%			
Padoin (2017)	27,77	2,72	0

Fonte: Elaboração própria (2025).

Observando os resultados, verificou-se que, para o teor de 5% de CCA, as resistências à compressão variaram de 24,50 MPa no traço pobre de Ferreira e Ribeiro (2018) a 57,06 MPa em Ferro (2019), indicando desempenho satisfatório do CAA com baixos teores de substituição. Essa variação pode ser explicada pelas diferenças nas relações água/aglomerante e nas características dos agregados.

Ferreira e Ribeiro (2018) utilizaram três traços TICCA ($a/a = 0,55$), TRCCA ($a/a = 0,47$) e TPCCA ($a/a = 0,65$), com agregado graúdo de 12,5 mm, o que justifica a diferença entre seus próprios resultados, o menor desempenho ocorreu no traço de maior a/a (TPCCA). Já Cadorin (2016), com relação $a/a = 0,63$, alcançou resistência de 26,53 MPa, semelhante ao traço pobre de Ferreira e Ribeiro (2018), reforçando o efeito prejudicial de maiores teores de água na matriz cimentícia.

Em relação resistência à tração por compressão diametral, os valores também foram consistentes, sendo possível alcançar uma resistência de 4,32 MPa aos 28 dias e aos 45 dias uma variação de 1,58 MPa a 2,69 MPa, o que demonstra boa coesão interna da matriz e interação adequada entre pasta e agregado mesmo com a incorporação da CCA.

No teor de 10% de CCA, observa-se uma leve redução média da resistência à compressão, variando entre 16,50 MPa (Ferreira; Ribeiro, 2018) e 56,53 MPa (Ferro, 2019), enquanto os valores de tração mantiveram-se entre 3,90 MPa e 2,33 MPa aos 28 dias, e 1,65 MPa a 3,25 MPa aos 45 dias, sugerindo que a adição continua a contribuir positivamente para a resistência à tração mesmo com a redução da resistência à compressão.

Para o teor de 15% de CCA, destaca-se o estudo de Dorneles e Sokolovicz (2024), que obteve 58,10 MPa de resistência à compressão mesmo utilizando uma relação a/a de 1,44 e agregado basáltico de 19 mm, evidenciando uma reação pozolânica mais intensa e formação de uma matriz mais densa. Nos demais estudos, como o de Ferro (2018), o aumento do teor de substituição resultou na redução da resistência à compressão, porém, a resistência à tração por compressão diametral manteve-se praticamente constante entre 10% e 15%, indicando que o

incremento de CCA afetou mais significativamente o comportamento à compressão do que o comportamento à flexão.

Para os teores de 20% e 30%, como já citado, é notável uma tendência de redução nos valores de resistência, indicando que teores mais elevados de CCA podem comprometer a hidratação adequada do cimento e a integridade da matriz. Em 20% de substituição, as resistências variaram entre 18,50 MPa e 27,78 MPa, e em 30%, atingiram 27,77 MPa (Padoin, 2017), com resistência à tração por compressão diametral de 2,72 MPa, evidenciando a limitação da adição em proporções muito elevadas.

De modo geral, os resultados indicam que a cinza da casca de arroz atua de forma eficiente como adição pozolânica quando utilizada em teores moderados, especialmente entre 5% e 15%, favorecendo o ganho de resistência e a melhoria das propriedades mecânicas do concreto autoadensável. No entanto, teores superiores a 20% tendem a reduzir o desempenho global, o que é confirmado pelos autores Sell Junior et al., (2019) que comprovaram por meio de seus estudos que teores de substituição por cinza de casca de arroz acima de 10% tendem a provocar redução perceptível na resistência à compressão.

4.3.3 Análises dos resultados no estado endurecido dos CAA produzidos com sílica ativa

Em continuidade, serão apresentados os valores de resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral obtidos em diferentes estudos que investigaram o uso de 10% e 15% de sílica ativa como material suplementar em substituição parcial ao cimento Portland. A inclusão desses dados permite estabelecer uma análise comparativa entre pesquisas que adotaram esse percentual de substituição, tipos de cimento, relação água/aglomerante, possibilitando compreender como essas variáveis influenciam o desempenho mecânico do concreto. Assim, a síntese apresentada na Tabela 4.12 constitui um ponto de partida para avaliar o comportamento das misturas e identificar tendências relacionadas à utilização da sílica ativa, fornecendo subsídios para a discussão detalhada dos resultados a seguir.

Tabela 4.12 – Dados de resistência à compressão axial e tração por compressão diametral com adição de sílica ativa

SA 10%			
Autor	Resistência à Compressão (Mpa) 28 dias	Resistência à tração por Compressão diametral (Mpa) 28 dias	Resistência à tração por Compressão diametral (Mpa) 45 dias
Ferreira; Ribeiro (2018)	42,9	0	4,35
	47,9	0	3,36
	37,9	0	2,89
Mata (2018)	36,8	0	0
Mendes (2019)	38,9	4,19	0
	45,2	4,48	0
	50,4	4,56	0
SA 15%			
Dorneles; Sokolovicz (2024)	59,0	0	0

Fonte: Elaboração própria (2025).

Observa-se que, para o teor de 10% de sílica ativa, os maiores valores de resistência à compressão aos 28 dias foram obtidos por Mendes (2019), atingindo 50,4 MPa, seguido por 45,2 MPa e 38,9 MPa, resultados relacionados às variações de relação água/aglomerante aplicadas no estudo (0,50; 0,58 e 0,62, respectivamente). A utilização de diferentes relações a/a explica, em grande parte, a dispersão dos valores, uma vez que menores teores de água tendem a favorecer o ganho de resistência, “à medida que a relação a/agl de um concreto diminui maior sua resistência à compressão” (Lima, 2019, p. 16)

Ferreira e Ribeiro (2018), utilizando cimento CP V-ARI e relações a/a de 0,55, 0,47 e 0,65 para os traços intermediário, rico e pobre, obtiveram resistências de 42,9 MPa, 47,9 MPa e 37,9 MPa, respectivamente. Assim como no estudo de Mendes (2019), observa-se clara influência da relação água/aglomerante, visto que o menor valor (0,47) resultou no maior desempenho mecânico.

Mata (2018), por sua vez, adotou relação a/a de 0,40 e cimento CP II-F-32, obtendo resistências de 36,8 MPa. Apesar da baixa relação a/a condição normalmente favorável ao desenvolvimento de resistência, o emprego de um cimento de classe de resistência inferior e com adição de fíler calcário justifica os valores menores em comparação aos estudos conduzidos com cimento CP V-ARI.

Em relação à resistência à tração por compressão diametral, apenas Mendes (2019) apresentou valores aos 28 dias, variando entre 4,19 MPa e 4,56 MPa, indicando adequada coesão interna e boa interação pasta-agregado. Ferreira e Ribeiro (2018) registraram valores apenas aos 45 dias, variando entre 3,36 MPa e 4,35 MPa, coerentes com o comportamento obtido na compressão.

De modo geral, os resultados para o teor de 10% de sílica ativa mostram desempenho consistente, com variações diretamente associadas ao tipo de cimento empregado e à relação água/aglomerante adotada, confirmando a sensibilidade do concreto autoadensável às condições de dosagem.

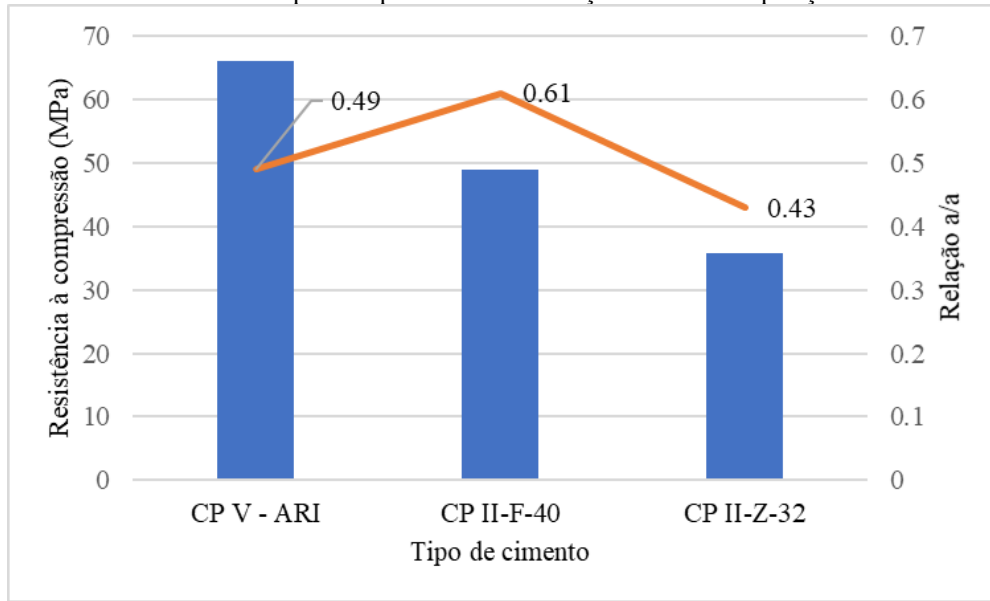
4.4 Análises dos resultados de resistência à compressão dos CAA produzidos com adições de metacaulim, cinzas da casca de arroz e sílica ativa

Nesta seção serão apresentados resultados referentes à resistência à compressão axial, organizados de acordo com o tipo de cimento e a relação água/aglomerante utilizados nos estudos que empregaram metacaulim, cinza de casca de arroz e sílica ativa. A adição de metacaulim indicou os percentuais de 10% e 20% mais usuais e melhor desempenho para a produção dos CAA. Desta forma, selecionou-se os três autores com melhores resistências à compressão e diferentes tipos de cimento. Quanto a adição CCA, os percentuais indicados são 5% e 15%, incluindo todos os autores disponíveis. No caso da sílica ativa, os estudos mostraram um padrão usual de 10% de substituição do cimento Portland pela adição.

4.4.1 Resistências à compressão de CAA produzidos com adições de metacaulim 10% e 20% de substituição parcial ao cimento Portland

Neste tópico são apresentados os gráficos de 10% e 20% de substituição do cimento portland por metacaulim. Esses gráficos reúnem, em um único conjunto visual, o tipo de cimento adotado por cada autor, os valores de relação a/a aplicados e as resistências à compressão obtidas, possibilitando uma análise comparativa mais abrangente e consistente entre os diferentes materiais utilizados.

Figura 4.1 - Resistências à compressão para diferentes relações a/a em composições com 10% de MK.



Fonte: Elaboração própria (2025).

Para a construção dos gráficos, foram selecionados os três autores que apresentaram diferentes tipos de cimento, sendo eles: Vicentini; Assunção; Akasaki (2016), Santos (2016) e Miranda (2018). Optou-se por não incluir o estudo de Paulino e Gomes (2015), pois esses autores também utilizaram CP V-ARI, e o mesmo já está representado no conjunto por Santos (2016).

O comportamento apresentado na Figura 4.1 evidencia uma relação inversa predominante entre a relação água/aglomerante (a/a) e a resistência à compressão, mas também revela que o tipo de cimento interfere significativamente no desempenho, podendo superar o efeito da relação a/a. Assim, percebe-se que a resistência não depende apenas da proporção água/aglomerante, mas também da reatividade do cimento, caracterizando uma relação não linear entre as variáveis.

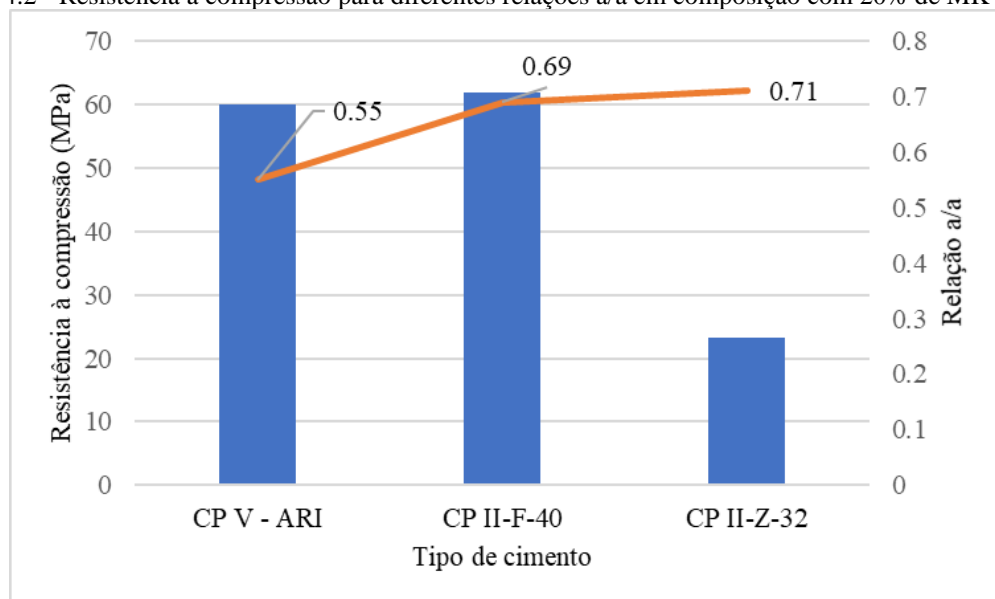
Observa-se inicialmente que o concreto produzido com cimento CP V-ARI, mesmo apresentando uma relação a/a intermediária (0,49), obteve a maior resistência à compressão, entre os três grupos analisados. Castro (2021, p. 16) “[...] O CP V ARI [...], não apresenta adições, porém apresenta uma dosagem diferente na produção do clínquer. A vantagem deste produto é a velocidade em que a resistência máxima à compressão é alcançada” isso explica que, apesar da tendência teórica de redução da resistência com o aumento da água, o alto teor de clínquer e a elevada reatividade do CP V-ARI favorecem o ganho de resistência, compensando a influência da relação a/a.

No caso do cimento CP II-F-40, nota-se que a relação a/a mais elevada (0,61) resultou em uma resistência intermediária, demonstrando a relação inversa tradicional, na qual maiores teores de água tendem a reduzir a resistência mecânica em função do aumento da porosidade capilar.

Por fim, o cimento CP II-Z-32, mesmo utilizando a menor relação a/a entre as misturas analisadas, apresentou a menor resistência à compressão. Esse resultado rompe com a tendência usual de que relações a/a mais baixas tendem a proporcionar resistências maiores, indicando que o fator determinante, neste caso, não foi apenas a quantidade de água de amassamento. Uma possível explicação para esse comportamento está no menor desempenho mecânico intrínseco desse tipo de cimento, associado à presença de material pozzolânico e ao menor teor de clínquer em sua composição. Conforme destacam Oliveira e Oliveira (2021, p.2), “o CP II-Z, cimento Portland composto com material pozzolânico, tem adição de pozzolana e uma melhor impermeabilidade [...]”, característica que favorece durabilidade, mas que pode resultar em resistências iniciais mais baixas quando comparado a cimentos com maior teor de clínquer.

Logo, a Figura 4.2 apresenta os resultados dos autores com substituição de 20% de metacaulim, evidenciando como a variação da relação a/a e o tipo de cimento influenciaram diretamente os valores finais de resistência à compressão.

Figura 4.2 - Resistência a compressão para diferentes relações a/a em composição com 20% de MK



Fonte: Elaboração própria (2025).

O comportamento apresentado na Figura 4.2 evidencia novamente uma relação inversa predominante entre a relação água/aglomerante (a/a) e a resistência à compressão, ao mesmo tempo em que confirma que o tipo de cimento exerce forte influência sobre o desempenho mecânico, podendo inclusive sobrepor-se ao efeito direto da relação a/a. Assim como observado na análise anterior realizada para misturas contendo 10% de Mk, verifica-se que, nas composições com 20% de Mk, a resistência não depende apenas da proporção água/aglomerante, mas também da reatividade inerente aos diferentes tipos de cimento, reforçando que a relação entre essas variáveis é não linear.

Nesse cenário, observa-se que o concreto produzido com cimento CP II-F-40 apresentou a maior resistência à compressão, mesmo utilizando uma relação a/a relativamente elevada (0,69). Esse resultado reforça que, em alguns casos, o efeito do tipo de cimento pode superar a influência direta da água de amassamento. O desempenho superior do CP II-F-40 pode estar associado ao equilíbrio entre teor de clínquer, finura e presença de fíler calcário. O efeito fíler ocorre porque partículas muito finas melhoram o empacotamento da mistura e servem como pontos de nucleação para os produtos de hidratação, ajudando a preencher os poros e tornando a matriz do cimento mais densa e, conseqüentemente, melhora o desempenho mecânico e durabilidade do material (Dal Molin, 2011, p.264 *apud* Feltrin; Isaia, 2018, p.60).

O CP V-ARI, por sua vez, que na análise anterior havia apresentado o maior desempenho com 10% de metacaulim, agora obteve resistência menor se comparado ao cimento CP II-F-40 quando submetido à composição com 20% de metacaulim e relação a/a de 0,55. Embora o CP V-ARI seja reconhecido pela alta reatividade e elevado teor de clínquer, característica ressaltada por Castro (2021, p. 16), ao afirmar que “a vantagem deste produto é a velocidade em que a resistência máxima à compressão é alcançada”, o aumento para 20% de metacaulim pode ter intensificado a demanda de água e modificado a dinâmica reológica da mistura, reduzindo parcialmente seu desempenho em comparação ao CP II-F-40.

Por fim, o CP II-Z-32 apresentou a menor resistência, comportamento semelhante ao verificado anteriormente na análise com 10% de metacaulim. Embora esse tipo de cimento contenha pozolanas que contribuem para melhorar a impermeabilidade e a durabilidade, conforme destacado por Oliveira e Oliveira (2021, p. 2), ao afirmarem que “o CP II-Z [...] tem adição de pozolana e uma melhor impermeabilidade”, seu desenvolvimento resistente tende a ser mais lento. Isso ocorre porque a reação pozolânica, diferentemente da hidratação do clínquer, depende da disponibilidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para que ocorra de maneira efetiva, resultando em um ganho de resistência mais gradual nas idades iniciais. Essa característica é reforçada por

Oliveira (2020), ao enfatizar que “a reação pozolânica é lenta e, por isso, outra importante vantagem associada ao uso dessas adições é o baixo calor de hidratação [...]”.

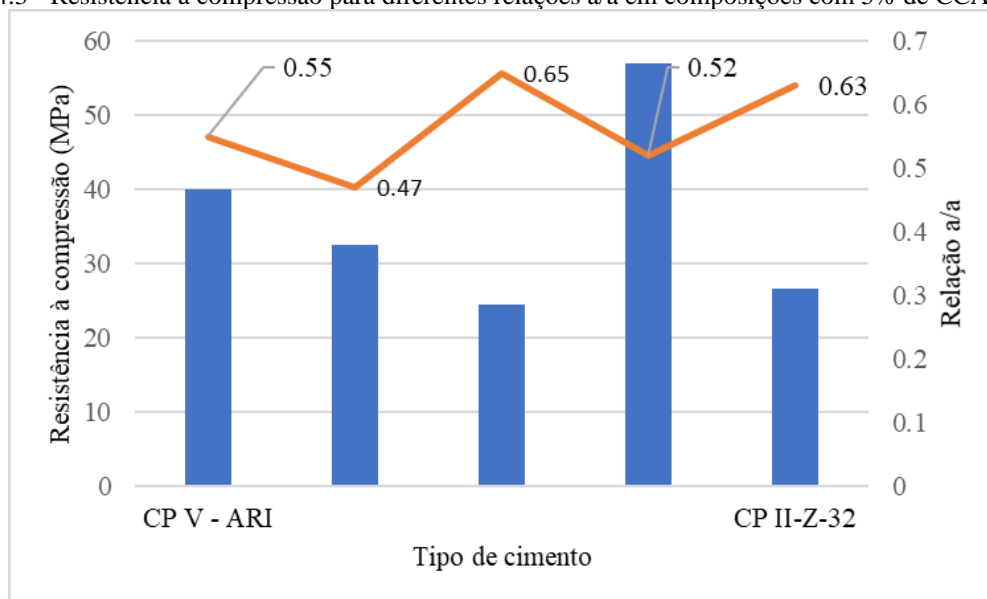
Assim, ao comparar os resultados para 10% e 20% de metacaulim, evidencia-se que o comportamento das misturas continua sendo influenciado simultaneamente pela relação a/a, pelo teor de clínquer e pela reatividade dos cimentos. Contudo, para o teor de 20%, o CP II-F-40 se destaca como o cimento de melhor desempenho, mostrando que a interação entre adições minerais e características do cimento pode alterar significativamente a ordem de desempenho entre os tipos analisados.

4.4.2 Resistências à compressão de CAA produzidos com adições de cinza de arroz 5% e 15% de substituição parcial ao cimento Portland

Neste tópico são apresentados os resultados obtidos pelos autores, por meio de gráficos que indicam a resistência à compressão axial, correlacionada com o tipo de cimento e a relação a/a. Para o teor de 5% de substituição de CCA, foram selecionados os três autores contemplados na Tabela 4.11: Ferreira e Ribeiro (2018), Ferro (2019) e Cadorin (2016).

A Figura 4.3 apresenta os resultados obtidos pelos autores, sua organização permite visualizar, de maneira sistemática, as variações de dosagem, tipo de cimento, relação a/a e propriedades mecânicas avaliadas, servindo como base para as análises e discussões desenvolvidas nesta seção.

Figura 4.3 - Resistência à compressão para diferentes relações a/a em composições com 5% de CCA.



Fonte: Elaboração própria (2025).

A análise da Figura evidencia que a resistência à compressão dos concretos produzidos com 5% de substituição do cimento por CCA é fortemente influenciada pela relação a/a, apresentando predominantemente uma relação inversa entre as variáveis. Contudo, essa relação não ocorre de maneira linear, pois a presença da CCA e a composição dos cimentos introduzem efeitos adicionais que se refletem no desempenho mecânico.

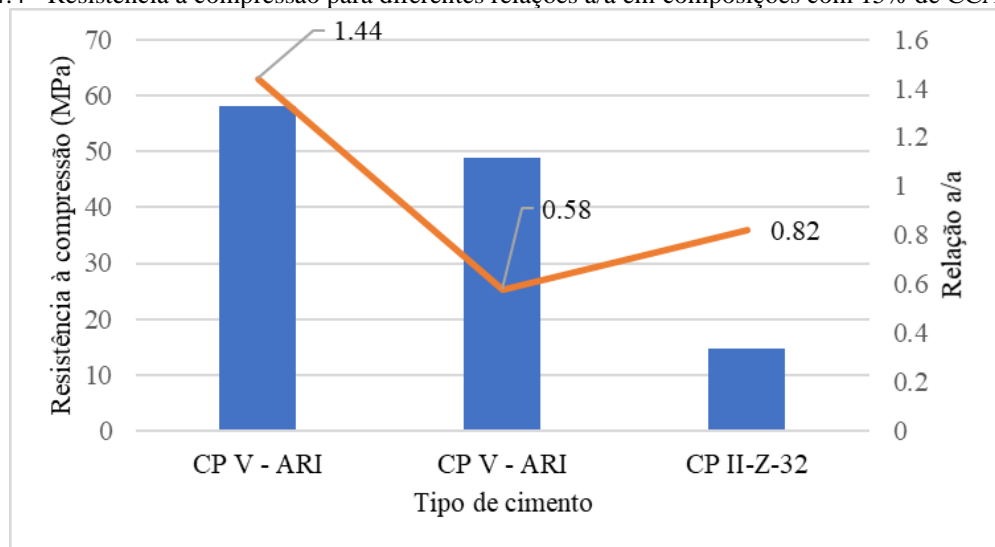
No caso do CP V-ARI, observa-se que as resistências variam significativamente entre as quatro relações a/a avaliadas (0,55, 0,47, 0,65 e 0,52). De modo geral, as menores relações a/a tendem a resultar em maiores resistências, em conformidade com o comportamento clássico de que reduções no teor de água diminuem a porosidade da pasta. Contudo, mesmo nos pontos em que a relação a/a é mais elevada, o CP V-ARI mantém resistências relativamente altas, o que está associado à elevada reatividade desse tipo de cimento. Esse comportamento é coerente com o fato de que cimentos mais finos apresentam hidratação mais rápida e eficiente, uma vez que “a finura do cimento afeta diretamente a sua reatividade com a água; grãos mais finos tendem a reagir mais rapidamente desenvolvendo resistência em menor tempo” (Mehta e Monteiro, 2006 *apud* Simoneto, 2020, p. 35). Assim, a combinação entre alta finura e maior teor de clínquer favorece a hidratação inicial e contribui para compensar, ao menos parcialmente, os efeitos negativos do aumento da relação água/aglomerante.

Quanto ao ponto referente ao CP II-Z-32, que aparece no gráfico com relação a/a de 0,63, verifica-se que sua resistência é inferior às obtidas para o CP V-ARI, mesmo quando comparado com relações a/a mais altas. Esse comportamento indica que, embora a relação

água/aglomerante seja importante, o tipo de cimento e a reatividade do sistema exercem influência significativa. O desempenho mais baixo do CP II-Z-32 é compatível pois o mesmo contém pozolanas, cujas reações tendem a ser mais lentas e a contribuir mais significativamente para o ganho de resistência em idades avançadas. Assim, em idades iniciais, como é o caso deste conjunto de ensaios, o menor teor de clínquer e a velocidade reduzida das reações explicam a menor resistência, mesmo com uma relação a/a próxima das utilizadas para o CP V-ARI.

Dando continuidade à análise dos diferentes teores de substituição da CCA pelo cimento Portland, apresenta-se a Figura 4.4 mostrando o comportamento dos autores que aplicaram 15% de CCA em seus traços. Assim como no caso de 5%, os resultados são avaliados a partir da resistência à compressão axial, considerando simultaneamente o tipo de cimento e a relação água/aglomerante utilizada, permitindo comparar como o aumento do teor de CCA influencia o desempenho mecânico do CAA.

Figura 4.4 - Resistência à compressão para diferentes relações a/a em composições com 15% de CCA



Fonte: Elaboração própria (2025).

Para o teor de 15% de CCA, o CP V-ARI apresenta um comportamento não linear entre a relação a/a e a resistência, diferentemente da tendência inversa tradicional. Os valores variam de forma irregular porque, nesse nível de substituição, a CCA absorve parte da água adicionada, reduzindo a água livre efetiva da mistura. Assim, mesmo relações a/a numericamente maiores não resultam necessariamente em maior porosidade. Além disso, a alta reatividade e o maior teor de clínquer do CP V-ARI tornam o cimento menos sensível a variações no teor de água,

fazendo com que o desempenho resultante dependa da combinação entre as características do cimento e o efeito físico de absorção da CCA, e não apenas da proporção água/aglomerante.

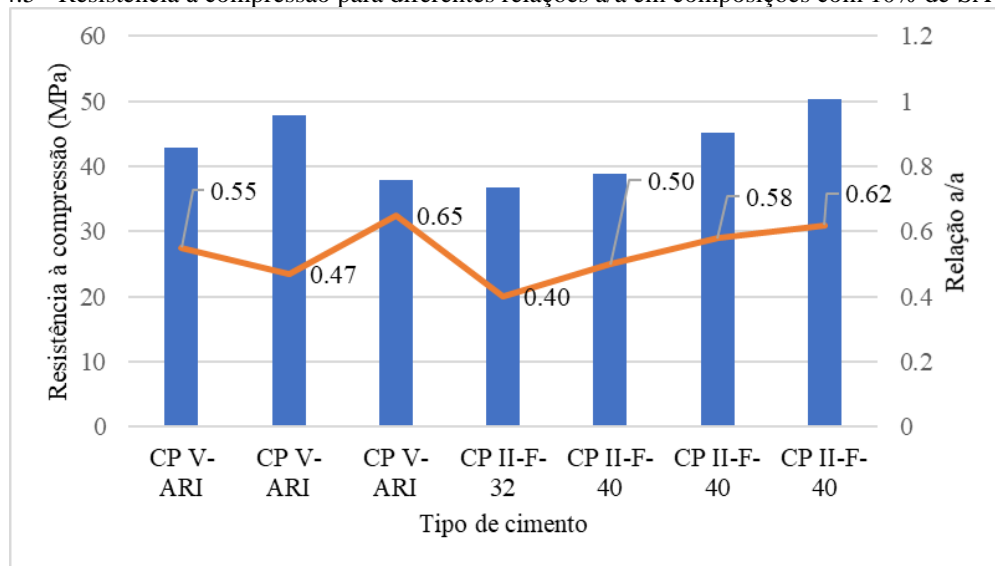
No CP V-ARI com a/a de 0,58 o autor utilizou a combinação de dois aditivos, um deles sendo o aditivo VMA, a resistência inferior pode ser explicada pela combinação entre a presença de CCA e o uso do aditivo VMA. Como o VMA aumenta a viscosidade e a retenção de água na mistura, parte da água disponível tende a ficar “presa” na matriz, somando-se à elevada absorção da CCA. Isso reduz a água efetivamente livre para hidratação, o que pode limitar o desenvolvimento da resistência. Assim, embora a relação a/a seja baixa, o efeito conjunto do aditivo e da CCA reduz o ganho esperado de resistência. Já no ponto com a/a de 1,44 onde não houve uso de VMA a ausência desse mecanismo de retenção permite maior disponibilidade de água livre, o que contribui para que esse traço apresente resistência superior mesmo com uma relação a/a elevada, resultando em um comportamento que não segue a tendência inversa clássica.

Já no caso do CP II-Z-32, a correlação se mantém claramente inversa: quanto maior a relação a/a (0,82), menor a resistência obtida. Isso ocorre porque as pozolanas presentes no CP II-Z-32 possuem reação mais lenta e não são capazes de equilibrar a porosidade adicional gerada pelo aumento de água. Dessa forma, o cimento não compensa o efeito negativo da maior a/a, resultando em resistências mais baixas em comparação ao CP V-ARI na mesma condição.

4.4.3 Resistências à compressão de CAA produzidos com adições de sílica ativa 10% de substituição parcial ao cimento Portland

Para dar continuidade à avaliação do comportamento mecânico dos concretos autoadensáveis modificados com adições pozolânicas, apresenta-se a seguir a análise da Figura 4.5 referente ao teor de 10% de sílica ativa, considerando os principais estudos da literatura que utilizaram diferentes tipos de cimento, relações água/aglomerante e características de agregados. Assim como na discussão anterior, o objetivo é comparar o desempenho das misturas e identificar como a variação dos materiais e dos parâmetros de dosagem influencia a resistência à compressão, permitindo compreender de forma mais ampla o efeito desse teor de sílica ativa no CAA.

Figura 4.5 - Resistência à compressão para diferentes relações a/a em composições com 10% de SA



Fonte: Elaboração própria (2025).

A Figura 4.5 mostra que, para 10% de SA, a relação entre a/a e a resistência não é totalmente linear, mas segue tendências influenciadas pelas características dos cimentos e pela alta reatividade da sílica ativa. De modo geral, a SA eleva a resistência por sua finura e pela reação pozolânica que gera C-S-H adicional e reduz a porosidade. Esse efeito é consistente com Siddique (2011 *apud* Fraga; Soares; Capuzzo, 2020), que destaca que a sílica ativa possui alto teor de sílica amorfa acima de 85% e elevada finura, fatores que intensificam sua capacidade de reação com os produtos hidratados do cimento.

Nos três traços com CP V-ARI ($a/a = 0,55; 0,47; 0,65$), observa-se que os valores de resistência se mantêm elevados e relativamente próximos, indicando que a presença de 10% de SA diminui a sensibilidade do cimento à variação da água de amassamento. O traço com menor a/a de 0,47, apresenta uma das maiores resistências, coerente com a tendência inversa tradicional. Entretanto, mesmo com a/a mais alta de 0,65, o desempenho permanece competitivo, sugerindo que a combinação CP V-ARI e SA resulta em uma hidratação acelerada e fortemente influenciada pela finura do aglomerante e pela atividade pozolânica, reduzindo o impacto negativo do aumento da água.

O traço com CP II-F-32 e $a/a = 0,40$ apresenta resistência menor que alguns traços com maior teor de água, indicando que o tipo de cimento exerce influência significativa no desempenho. Como já visto em discussões acima, esse cimento contém fíler calcário e menor teor de clínquer, sua capacidade de resposta à sílica ativa é mais limitada. Assim, mesmo com

baixa relação a/a, sua resistência permanece inferior à obtida com CP V-ARI reforçando que a resistência não depende apenas da quantidade de água, mas da reatividade do sistema ligante.

Para o CP II-F-40 (a/a = 0,50; 0,58; 0,62), a variação da resistência é moderada e não apresenta uma correlação direta clara com a relação a/a. Isso sugere que, com 10% de SA, o efeito de redução de porosidade promovido pela reação pozolânica compensa parcialmente o aumento da água de amassamento. Além disso, o fíler calcário presente no CP II-F-40 atua como superfície de nucleação, favorecendo a formação de C-S-H e contribuindo para resistência adicional, mesmo em misturas com maior teor de água.

De forma geral, o gráfico indica uma correlação inversa predominante entre a relação água/aglomerante e a resistência à compressão, mas essa relação é continuamente modulada pela ação da sílica ativa. Em cimentos mais reativos como o CP V-ARI, essa modulação é mais intensa, reduzindo a diferença entre misturas com diferentes teores de água. Já nos cimentos compostos (CP II-F e CP II-Z), os efeitos positivos da SA ocorrem, mas com menor intensidade, permitindo que a relação a/a influencie mais fortemente o desempenho final.

5 CONCLUSÃO

A análise das propriedades dos concretos autoadensáveis (CAA) produzidos com adições de metacaulim, cinza da casca de arroz e sílica ativa permitiu compreender a influência desses materiais tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. No estado fresco, verificou-se que o metacaulim, em teores de 10% e 20%, promoveu classes de espalhamento similares, garantindo boa fluidez e viscosidade adequada, enquanto a cinza da casca de arroz apresentou desempenho satisfatório apenas em teores moderados, de até 15%, já que percentuais mais elevados comprometeram a consistência das misturas. A sílica ativa, em 10%, destacou-se por proporcionar elevada fluidez, com classes de Slump-flow entre SF2 e SF3, mantendo viscosidade controlada e estabilidade, evidenciando seu potencial de atuação como adição reológica eficiente.

No estado endurecido, observou-se que o metacaulim contribuiu para o aumento da resistência à compressão e à tração por compressão diametral, especialmente no teor de 10%, enquanto a elevação para 20% nem sempre resultou em ganho de resistência, possivelmente devido à menor disponibilidade de clínquer hidratável e à dinâmica reológica alterada da mistura. A cinza da casca de arroz mostrou-se eficaz como adição pozolânica entre 5% e 15%, favorecendo a resistência mecânica e a coesão interna da matriz, porém teores superiores a 20% tendem a reduzir o desempenho global, refletindo efeitos negativos sobre a hidratação do cimento e a integridade da matriz. A sílica ativa, por sua vez, promoveu considerável aumento da resistência à compressão, redução da porosidade e geração de C-S-H adicional, diminuindo a sensibilidade do concreto à relação água/aglomerante, sendo especialmente eficiente quando combinada com cimentos mais reativos, como o CP V-ARI.

Além disso, os resultados evidenciam que o tipo de cimento e a relação água/aglomerante exercem influência determinante sobre o desempenho mecânico final. Cimentos com maior teor de clínquer e maior finura apresentam hidratação mais rápida e eficiente, podendo compensar parcialmente efeitos desfavoráveis de relações a/a mais elevadas, enquanto cimentos compostos e pozolânicos tendem a apresentar desenvolvimento resistente mais lento nas idades iniciais, devido à menor disponibilidade de Ca(OH)_2 para reações pozolânicas. Observa-se, portanto, que o desempenho do CAA não depende exclusivamente da relação água/aglomerante, mas também da combinação entre as características do cimento, a reatividade das adições e o ajuste adequado da dosagem.

Em síntese, os estudos analisados indicam que as adições pozolânicas, quando utilizadas de forma controlada, oferecem significativa melhoria no desempenho dos CAA, contribuindo

para a fluidez, estabilidade e resistência mecânica. A sílica ativa mostrou-se mais eficaz em promover resistência elevada e redução de porosidade, enquanto o metacaulim e a cinza da casca de arroz apresentam bom desempenho em teores moderados, sendo necessário cuidado na dosagem de água e na seleção do tipo de cimento. Dessa forma, o uso dessas adições não apenas permite o aproveitamento de resíduos industriais e materiais suplementares, promovendo maior sustentabilidade, como também potencializa a durabilidade e o desempenho estrutural dos concretos autoadensáveis.

REFERÊNCIAS

ALCANTARA, M. A. M.; MELLO, A. B. A.; ALBUQUERQUE, M. C. F. revista Matéria, v.23, n.3, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211**: Agregados para Concreto - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

_____. **ABNT NBR 9935**: Agregados - Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

_____. **ABNT NBR 11768-1**: Aditivos químicos para Concreto de Cimento Portland. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

_____. **ABNT NBR 12653**: Materiais Pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____. **ABNT NBR 13956-1**: Sílica Ativa para Uso com Cimento Portland em Concreto, Argamassa e Pasta. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. **ABNT NBR 15823-1**: Concreto Autoadensável. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. **ABNT NBR 15823-2**: Concreto Autoadensável. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. **ABNT NBR 15823-3**: Concreto Autoadensável. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. **ABNT NBR 15894-1**: Metacaulim para Uso com Cimento Portland em Concreto, Argamassa e Pasta. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

_____. **ABNT NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

AZEVEDO, Amanda Rampelotto. **Alternativas para a cinza de casca de arroz**: Uma revisão. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria Campus Cachoeira do Sul, 2021.

BACARJI, Edgar; CASCUDO, Oswaldo; TASSI, Andressa de A.; SILVA, Reginaldo V. da; VIRGENS, Jeovan P. das. Microconcreto Auto Adensável Com a Incorporação de Adições Minerais: Avaliações No Estado Fresco. In: CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS, 3., 2018, **Coimbra**. Conferencia. Coimbra: [S.N.], 2018. p. 1-11.

BARBOZA, L. da S.; STORCH, I. S.; ALMEIDA FILHO, F. M. de. Concreto autoadensável ecoeficiente com baixo consumo de cimento. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 2, p. 59-71, abr./jun. 2020. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente

Construído. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212020000200387>. Acesso em 10 out. 2025.

BATISTELA, Luana Isso. **A Influência das Condições de Alcalinidade nas Reações de Estabilização do Solo-Cimento Autodensável**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2023.

BERNARDO, Karen Suely Martins. **Concreto auto adensável com agregado miúdo reciclado de concreto**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético) - Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/12605>. Acesso em: 19 set. 2025.

CADORIN, Sander Marcon. **Adição de cinza de casca de arroz como material pozolânico em concreto autoadensável**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Centro de Ciências Tecnológicas, da Universidade do Estado de Santa Catarina, 2016. Disponível em: <https://repositorio.udesc.br/handle/UDESC/14044>. Acesso em: 22 set. 2025.

CALADO, Carlos Fernando de Araujo. **Concreto auto-adensável: alternativa ao concreto convencional em climas quentes**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade do Minho Escola de Engenharia, Portugal, 2015.

CALADO, Carlos Fernando de Araujo *et al.* **Concreto Auto-Adensável (CAA), mais do que alternativa ao concreto convencional (CC)**. Recife: EDUPE, 2015. 255 p.

CALESCO, Murillo Adalberto Figueiró. **Concreto autoadensável: Fundamentos, tecnologia, viabilidade técnica e econômica**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2022.

CARRÊA, Otávio de Oliveira *et al.* Propriedades físico-químicas de cinzas de casca de arroz obtidas sob queima controlada e não controlada seguidas de moagens. In: TUNES, Lilian Vanussa Madruga de; ROSSETTI, Cristina. **Desafios e avanços para produção de sementes em sistema de cultivo orgânico**. Nova Xavantina: Pantanal Editora, 2024. p. 4-78. Disponível em: <https://editorapantanal.com.br/ebooks/2024/desafios-e-avancos-para-producao-de-sementes-em-sistema-de-cultivo-organico/ebook.pdf#page=30>. Acesso em: 10 nov. 2025.

CARNEIRO, Roberto Carlos. **Análise das propriedades do concreto autoadensável com fibras de aço no estado plástico e endurecido com sílica ativa e com fíler calcário**. 2018. 169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2018.

CASTRO, V. G. Cimento Portland. In: **Compósitos madeira-cimento: um produto sustentável para o Futuro** [online]. Mossoró: EdUFERSA, 2021, pp. 13-21. ISBN: 978-65-87108-26-1. <https://doi.org/10.7476/9786587108612.0002>.

COSTA, A. C. S. de S.; CABRAL, A. E. B. Estudo comparativo entre o concreto autoadensável e o concreto convencional vibrado em obra vertical. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 4, p. 289-301, out./dez. 2019. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212019000400356>. Acesso em: 27 set. 2025

CUPEHINSKI, Kevin Augusto. **Deteção da exsudação do concreto autoadensável através do comportamento de ondas ultrassônicas**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2019.

DASSOLER, Lucas Felipe; LANGOSKI, Marinês; CASANOVA, Rafaela Fontana. Análise da influência do uso do metacaulim de alta reatividade (MAR) nas propriedades mecânicas de concretos autoadensáveis (CAA). In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DAS CONSTRUÇÕES XVII, 17., 2021, Fortaleza. **Anais [...]**. [S.L.]: [S.N.], 2021. p. 207-214.

DINIZ, Hugo Alessandro Almeida *et al.* CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM ADIÇÕES MINERAIS E BAIXO CONSUMO DE CIMENTO. **HOLOS**, [S. l.], v. 5, p. 51–64, 2018. DOI: 10.15628/holos.2018.7267. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/7267>. Acesso em: 13 nov. 2025.

DORNELES, Bruna Taciane Rodrigues; SOKOLOVICZ, Bóris Casanova. Avaliação da trabalhabilidade, propriedades mecânicas de concretos autoadensáveis com substituição parcial de cimento por cinza de casca de arroz e sílica ativa. **Jornadas de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Extensión, Vinculación y Muestra de la Producción – JIDeTEV**, Obera, v. 14 n. 7, 2017. Publicado em: 18 nov. 2024. Disponível em: <https://autoresjidetev.fio.unam.edu.ar/index.php/jidetev/article/view/653>. Acesso em: 20 out. 2025.

FARIAS, Evilane Cássia de. *et al.* Influência da adição de metacaulim no comportamento reológico de concretos autoadensáveis. In: CONGRESSO NORTE NORDESTE DE PESQUISA E INOVAÇÃO, 7., 2012, Tocantins. **Anais [...]**. Tocantins: [S.N.], 2012. p. 0-0.

FELIPE, A. J. V. **Estudo da Incorporação de Resíduos de Scheelite no Concreto Autoadensável**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Campina Grande, Pombal, 2022.

FELTRIN, C. S.; ISAIA, G. C. Propriedades do concreto com adição de fíler calcário dolomítico. *Revista de Ciência e Inovação*, v. 3, n. 1, p. 58-71, 19 set. 2018.

FERNANDES, Iara Janaina. **Avaliação de sílicas e materiais à base de silício obtidos a partir de cinzas de casca de arroz de diferentes processos de combustão**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2020.

FERREIRA, Ludimilla; RIBEIRO, Fábio. Estudo Comparativo do Concreto Auto Adensável com Cinza da Casca de Arroz sem Controle de Queima e Sílica Ativa. **Paranoá**, [S. l.], v. 11, n. 20, 2018. DOI: 10.18830/issn.1679-0944.n20.2018.03. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/paranoa/article/view/24044>. Acesso em: 25 set. 2025.

FERREIRA, L.; RIBEIRO, F. **Estudo comparativo do concreto auto adensável com adição da cinza da casca de arroz sem controle de queima e sílica ativa**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas, Tocantins, 2015. Disponível em: <http://ulbrato.br/bibliotecadigital/publico/home/documento/1842>. Acesso em: 07 jun. 2025.

FERRO, Ivan Passuelo. **Influência da sílica da casca de arroz nos estados fresco e endurecido de concretos autoadensáveis**. 2019. Dissertação (mestrado em construção) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, São Paulo, 2019.

FILHO, J. S. A.; SINHORELLI, K. S.; MEDEIROS, G. A., et al. revista Matéria, v.25, n.1, 2020.

FRAGA, Y. S. B.; SOARES, L. M. G.; CAPUZZO, V. M. S. Influência da densificação da sílica ativa nas propriedades de materiais cimentícios. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 21, n. 3, p. 229-242, jul./set. 2021. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000300548>

GUDINHO, D. S.; BUENO, K. N. G. S.. SILVA, R. V. **Estudo literário da dosagem de concreto autoadensável com adição de sílica ativa**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2022.

HERMANN, A.; LANGARO, E. A.; SILVA, S. H. Lopes da; KLEIN, N. S.. Particle packing of cement and silica fume in pastes using an analytical model. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, [S.L.], v. 9, n. 1, p. 48-65, fev. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952016000100004>.

Lima, Karla Ulisses. **Avaliação do efeito do fator água/aglomerante em concreto de alto desempenho**. Dissertação (mestrado em Construção Civil). Programa de Pós-Graduação em Construção Civil. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2019.

LING, Gang; SHUI, Zhonghe; SUN, Tao; GAO, Xu; WANG, Yunyao; SUN, Yu; WANG, Guiming; LI, Zhiwei. Rheological Behavior and Microstructure Characteristics of SCC Incorporating Metakaolin and Silica Fume. **Materials**, [S.L.], v. 11, n. 12, p. 2576, 18 dez. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma11122576>.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos da Metodologia Científica**. São Paulo: Atlas, 2017. 375 p.

MARTINS, M. L. F.; BARRETO, R.R., SOARES JUNIOR, P. R. R., PINHEIRO, I.P. e BEZERRA, A. C. S. **Rejeito da indústria de magnésio metálico para substituição parcial do cimento Portland**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. v. 13, n. 6, p. 1-9, 2020.

MATA, Wanessa Eugênio da. **Estudo do traço do concreto autoadensável**. 2018. 91 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Graduação (Bacharel em Engenharia Civil) - Campus Central - Sede: Anápolis - CET - Ciências Exatas e Tecnológicas Henrique Santillo, Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, GO, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ueg.br/jspui/handle/riueg/1687>. Acesso em: 10 set. 2025.

MEDEIROS, F.K.; ANJOS, M.A.S.; SÁ, M.V.V.A, et al. revista **Matéria**, v.27, n.1, 2022.

MEDEIROS, Fernanda Karolline de. **Estudo de concretos autoadensáveis com reduzidos teores de cimento e elevados teores de adições minerais**. 2016. 130f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

MELO, C.V.A.; GOMES, P.C.C.G., MORAES, K.A.M., revista **Matéria**, v.26, n.4, 2021.

MENDES, Cleiton. João. **Concreto autoadensável utilizando cinza da Casca de arroz: Estudo das Propriedades Mecânicas**. 2015. Dissertação (Mestrado em estruturas) - Faculdade de Engenharia- UNESP, Ilha Solteira, São Paulo, 2015.

MENDES, Danilo Cardoso. **Análise da influência da utilização do pó de granito nas Propriedades do Concreto Auto Adensável**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas, 2019.

MENEZES, Isadora Fokuda 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**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2024.

MIRANDA, Luiza Rodrigues Meira de. **Carbonatação em concretos autoadensáveis com substituições de cimento portland por adições minerais**. 2018. xv, 111 f., il. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2018. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/handle/10482/32610>. Acesso em: 20 out. 2025.

OLIVEIRA, Cecília Prado De. O uso da argila calcinada no concreto: Durabilidade e sustentabilidade. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. Ano 05, Ed. 10, Vol. 01, pp. 63-72. Outubro de 2020. ISSN: 2448-0959, Link de acesso: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/argila-calcinada>

OLIVEIRA, Flaviane Bernardino de; OLIVEIRA, Marília Pereira de. **Influência do tipo de cimento Portland na consistência de pastas cimentícias**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência E Tecnologia) - Universidade Federal Rural Do Semiárido - UFERSA, 2021.

OLIVEIRA, F.R. **Avaliação da sinergia entre aditivo cristalizante e adições ternárias na autocicatrização de concretos**. Dissertação (mestrado em Gerenciamento de Resíduos). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS. São Leopoldo. Rio Grande do Sul. 2023.

PADOIN, Daniela Galiotto. **Estudo das propriedades mecânicas e físicas de um traço comercial de concreto autoadensável com e sem substituição de cinza de casca de arroz**. 111 p. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete, Alegrete, 2017. Disponível em: <https://dspace.unipampa.edu.br/jspui/handle/riiu/1953>. Acesso em: 14 out. 2025.

PADOIN, D. G.; ZYDECK, R. C.; KOSTESKI, L. E.; MARANGON, E. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental.**, v. 11, n. 3, p. 195-214, set. 2022.

PAIVA FILHO, Julio Cesar de. Análise da resistência à compressão e consistência de concreto produzido com brita calcária e aditivo plastificante. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. Rio Grande do Norte. 2017.

PANATO, Victor Ducioni; NIEVES, Leidy Johana Jaramillo; GURKEWICZ, Rafael de Paula; PICCININI, Ângela Costa; PIVA, Jorge Henrique; ANTUNES, Elaine Gugliemi Pavei. Estudo de atividade pozolânica da cinza de casca de arroz residual moída em distintos tempos de moagem. **Cerâmica Industrial**, [S.L.], v. 28, n. 1, p. 1-11, set. 2023. Editora Cubo. <http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2023.021>.

PAULINO, Emerson Felix Donato; GOMES, Ramon Soares. **A comparação de três aditivos superplastificantes na dosagem de concreto autoadensável com 10% de metacaulim**. 2015. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

PEREIRA, A. M.; SILVA, C. A. R.; QUEIROZ, D. C. A.; MORAES, M. J. B.; MELGES, J. L. P.; TASHIMA, M. M.; AKASAKI, J. L. revista **Matéria**, v.20, n.1, pp. 227– 238, 2015.

Propriedades físico-químicas de cinzas de casca de arroz obtidas sob queima controlada e não controlada seguidas de moagens. *Em: Desafios e avanços para produção de sementes em sistema de cultivo orgânico*. E-book Completo[s.l.] : Pantanal Editora,2024. DOI: 10.46420/9786585756341cap4. Disponível em:

<https://editorapantanal.com.br/submissao/index.php/pe/catalog/book/24/chapter/23>. Acesso em: 13 nov. 2025.

REZENDE, Fabrício Gonzales de. **Influência dos materiais nas propriedades do concreto autoadensável**. 2016. x, 64 f., il. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

SANTOS, I. L. **Uso de Finos de Resíduos de Construção e Demolição em concreto autoadensável**. 2018. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura (PPGCI), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

SANTOS, Wesley Feu dos. **Influência da cura térmica nas propriedades mecânicas e na microestrutura do concreto autoadensável contendo adições de metacaulim e fíler calcário**. 2016. 116f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/server/api/core/bitstreams/7215c82a-bcc6-457c-bed4-949dc2e1e754/content>. Acesso em: 16 out. 2025.

SAPATE, O. V.; DANDADE, H. B.; WANDHARE, K. D. **Comparison of traditional concrete with self-Compacting concrete along with its properties**. [S. L.]: Anal, v. 08, abr. 2024.

SCHMIDT, Jéssica. **Estudo comparativo das resistências mecânicas do concreto de alta resistência inicial com substituição parcial do cimento Portland por metacaulim**. 2016. 14 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2016. Disponível em: <http://repositorio.unesc.net/handle/1/4984>. Acesso em: 20 out. 2025.

SELL JUNIOR, Félix Krolow; TEIXEIRA, Fernando Ritiéle; WALLY, Gustavo Bosel; CRAUSS, Camila; MAGALHÃES, Fábio Costa. Desempenho de concretos com substituição parcial do cimento por cinza de casca de arroz. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, [S. L.], v. 11, n. 4, p. 182-191, dez. 2019. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/14172/209209212819>. Acesso em: 14 out. 2025.

SILVA, Rinaldo Guilherme da. **Análise do potencial da sílica ativa como adição para concretos de alto desempenho submetidos a meios agressivos**. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2024.

SOUZA, Ana Luiza Rocha de. **Efeitos da Mistura de Sílica Ativa e Nanossílica na Durabilidade do Concreto**. 2021. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

SIMONETO, Gabriel Werner. **Avaliação da alteração da finura e composição do cimento portland brasileiro nas últimas décadas**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil de Infraestrutura) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2020.

TUTIKIAN, B.; DAL MOLIN, D. **Concreto Autoadensável**. 3. ed. São Paulo: Leud, 2021. 160 p.

VICENTINI, Alan Henrique; ASSUNÇÃO, Camila Cassola; AKASAKI, Jorge Luís. Estudo do metacaulim para obtenção e produção de concreto autoadensável (CAA). *Fórum Ambiental da Alta Paulista*, v. 12, n. 6, p. 127–136, nov./dez. 2016. Disponível em: https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/forum_ambiental/article/view/1462. Acesso em: 09 jun. 2025.

VICENTINI, Alan Henrique; BELLUZI, Marlon Boldrin; AKASAKI, Jorge Luís. Produção de concreto autoadensável (CAA) com substituição parcial de cimento por metacaulim. *Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista*, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 168-18, 1 jan. 2017. ANAP - Associação Amigos de Natureza de Alta Paulista. <http://dx.doi.org/10.17271/198008271312017>.

VERVLOET, A. L.; BARBOSA, L. DA. SILVA., SARTORTI, A.L. Concreto Autoadensável: Influência da argila expandida na resistência à compressão. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, Ponta Grossa, V. 11, Nº 3, p. 135-149, 2019.

VIVEK, S., SULEKHA, R.; SRI HARINI, G. (2018). **Experimental Study on Self Compacted Concrete Mix Using Admixtures and Accessing its Performance By Comparing with Conventional Concrete (M25)**. *Asian Journal of Engineering and Applied Technology*, 7(S1), 78–83. <https://doi.org/10.51983/ajeat-2018.7.1.856>