



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO DA CINZA DA CASCA
DE ARROZ VISANDO O MELHORAMENTO DA
RESISTÊNCIA MECÂNICA NO CONCRETO
AUTOADENSÁVEL.**

CLEUMAR ALVES DA SILVA PEREIRA

TERESINA

2025

CLEUMAR ALVES DA SILVA PEREIRA

**CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO DA CINZA DA CASCA
DE ARROZ VISANDO O MELHORAMENTO DA
RESISTÊNCIA MECÂNICA NO CONCRETO
AUTOADENSÁVEL.**

Dissertação de Mestrado realizada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal do Piauí, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Caracterização e Processamento de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Hudson Chagas dos Santos

TERESINA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Pereira, Cleumar Alves da Silva

P437c Caracterização e aplicação da cinza da casca de arroz visando o
melhoramento da resistência mecânica no concreto autoadensável / Cleumar
Alves da Silva Pereira. - 2025.
80 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Central, 2025.

Orientador : Prof Dr. Hudson Chagas dos Santos.

1. Concretos autoadensável. 2. Cinza da casca de arroz. 3. Aplicação.
I. Título.

CDD - 620.1

Elaborado por Tanize Maria Sales CRB 3/1024

CLEUMAR ALVES DA SILVA PEREIRA

**CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO DA CINZA DA CASCA DE ARROZ VISANDO O
MELHORAMENTO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA NO CONCRETO
AUTOADENSÁVEL.**

Dissertação de Mestrado realizada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal do Piauí, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Aprovada em: 10/06/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Hudson Chagas dos Santos (Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. Helder Pontes Gomes (Avaliador Interno)
Instituto Federal do Piauí-IFPI

Prof. Dr. Wallison Angelim Medeiros (Avaliador Externo)
Instituto Federal do Piauí-IFPI

*Dedico esta dissertação aos meus pais Tomásia Alves e Manoel
Gomes Pereira. Dedico ao Prof. Dr. Hudson Chagas dos Santos
Dedico ao meu esposo Luiz Ferreira da Silva Júnior.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo e por tanto, por me sustentar e conceder a sua graça, amor, força, sabedoria, coragem e entendimento em todos os momentos. Quero também agradecer a Nossa Senhora de Fátima e São Francisco por intercederem sempre por mim.

A todos do Instituto Federal do Piauí, campus Teresina Central e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais por oferecer subsídios técnico-científicos para concretizar meu sonho e aperfeiçoamento profissional.

A meu orientador Prof. Dr. Hudson Chagas dos Santos minha gratidão por toda paciência, dedicação e ensinamentos tanto para a formação pessoal quanto para a formação acadêmica e profissional.

Ao grupo do laboratório do IFPI pela parceria e execução da metodologia da pesquisa. Em especial aos meus amigos Antônio, André, Ivonete, Liduína, Naiara, Teresa e aos meus colegas de turma pelo apoio necessário ao longo do curso.

A todos os professores e colaboradores do programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais – PPGEM por todos os saberes que envolvem o processo de desenvolvimento de ensino e aprendizagem.

Ao meu esposo Júnior que sempre me apoiou em todas as jornadas e por ser minha fonte de força, determinação e muito amor, bem como a minha família. Por fim, a todos que contribuíram de forma direta e indiretamente para a concretização da minha pesquisa.

A empresa que me auxiliou no preparo das massas do concreto, e corpo de prova e nos ensaios do Laboratório de Materiais (Labmat).

RESUMO

O CAA destaca-se por suas características essenciais: capacidade de preenchimento de fôrmas, habilidade passante e resistência à segregação, permitindo assim o aumento da qualidade de peças estruturais de concreto, assim como a otimização de sua execução. A cinza da casca de arroz (CCA) é um resíduo agrícola, cuja utilização como adição mineral na produção de concreto vem sendo bastante estudada. O objetivo principal desta pesquisa é realizar um estudo sobre a caracterização e aplicação da CCA visando o melhoramento da resistência mecânica no CAA. Para caracterizar o material resultante foram empregadas as seguintes técnicas: fluorescência de raios-x (FRX) e difração de raios-x (DRX). Os resultados obtidos mostraram que a cinza da casca de arroz apresentou características pozolânicas, o que permite sua utilização na confecção do CAA. Para avaliar essa utilização, o presente estudo propôs uma série de ensaios que foram executados em corpos de prova (CPs) cilíndricos (10x20cm) com teores de substituição do cimento pela CCA de 5%, 10% e 15% em massa, além de um traço referência sem substituição. Os ensaios buscaram avaliar o comportamento do concreto em seu estado fresco e em seu estado endurecido, com a substituição parcial do cimento pela CCA. Os resultados mostraram que a caracterização do CAA no estado fresco, conduzida de acordo com as prescrições da ABNT NBR 15823:2017, revelou a influência positiva da CCA nas misturas, as quais atenderam aos critérios estabelecidos pelo documento normativo. Comparativamente ao concreto de referência, os CAA com a incorporação da pozolana permaneceram com adequada capacidade de preenchimento e habilidade passante. Quanto ao comportamento mecânico, também averiguado por normas brasileiras, a presença da sílica novamente provocou alterações frente ao CAA de controle. Dessa forma, os dados mostraram a viabilidade técnica da substituição do cimento pela CCA, especialmente no teor de 5% e 10%. O CAA produzido nesse estudo pode ser utilizado em estruturas com alta taxa de armadura, em peças de difícil acesso e recuperação e reparo de estruturas.

Palavras-chave: concretos autoadensáveis; cinza da casca de arroz; aplicação.

ABSTRACT

CAA concrete stands out for its essential characteristics: form-filling capacity, passing ability and resistance to segregation, thus allowing for an increase in the quality of structural concrete pieces, as well as optimizing their execution. Rice husk ash (RHA) is an agricultural waste whose use as a mineral addition in concrete production has been widely studied. Characterization and application of rice husk ash aimed at improving mechanical strength in self-compensating concrete. The following techniques were used to characterize the resulting material: X-ray fluorescence (XRF) and X-ray diffraction (XRD). The results obtained showed that rice husk ash has pozzolanic characteristics, which allows it to be used in the manufacture of SCC. In order to evaluate this use, this study proposed a series of tests which were carried out on cylindrical specimens (10x20cm) with 5%, 10% and 15% cement substitution by mass, as well as a reference specimen with no substitution. The tests sought to evaluate the behavior of the concrete in its fresh state and in its hardened state, with the partial replacement of cement by CCA. The results showed that the characterization of the fresh-state FAC, conducted in accordance with the requirements of ABNT NBR 15823:2017, revealed the positive influence of CCA on the mixtures, which met the criteria established by the normative document. Compared to the reference concrete, the SCCs with the incorporation of pozzolan remained with adequate filling capacity and passing ability. As for the mechanical behavior, which was also verified by Brazilian standards, the presence of silica again caused changes compared to the control SCC. Thus, the data showed the technical feasibility of replacing cement with CCA, especially at 5% and 10%. The CAA produced in this study can be used in structures with a high reinforcement ratio, in parts that are difficult to access and, in the recovery, and repair of structures.

Keywords: self-compacting concrete; rice husk ash; application.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Casca de Arroz.....	18
Figura 2 - Depósito de CCA a céu aberto.....	20
Figura 3 - Aplicação do concreto autoadensável.....	25
Figura 4 - Lançamento de concreto autoadensáveis.....	27
Figura 5 - Tanque de armazenamento de metano liquefeito no Japão.....	29
Figura 6 - Estação de metrô do Amsterdã Arena.....	30
Figura 7 - Fundação do edifício Infinity Coast.....	30
Figura 8 - Porto Ametista.....	31
Figura 9 - Molde destinado ao ensaio do mini-slump e suas dimensões.....	32
Figura 10 - Equipamento utilizado no ensaio do slump-flow.....	34
Figura 11 - Equipamento empregado projeção lateral, com dimensões em milímetros e representação das alturas H1 E H2.....	37
Figura 12 - Anel J com dimensões.....	39
Figura 13 - Vista em planta e vista lateral (dimensões).....	40
Figura 14 - Comparativo de dosagem entre CAA e o concreto convencional.....	42
Figura 15 - Etapas da pesquisa.....	44
Figura 16 - Casca do arroz e a cinza	44
Figura 17 - Superplastificante SUPER RX 2300.....	47
Figura 18 - Forno no preparo da cinza.....	49
Figura 19 - Aparelho de Difração de raios-X.....	50
Figura 20 - Agitador mecânico.....	52
Figura 21 - Algumas etapas do ensaio: molde sendo preenchidos com a pasta.....	
Momentos de levantamento do minicone e aferição do diâmetro formado.....	53
Figura 22 - Aspectos visual de um CAA produzido.....	55
Figura 23 - Corpos-de-prova moldados	56
Figura 24 - Corpos-de-prova moldados com plástico filme.....	56
Figura 25 - Corpos-de-prova em hidratação.....	57
Figura 26 - Corpo de prova na retifica e prensa.....	57
Figura 27 - Difratograma de raios X da CCA.....	58
Figura 28 - Realização dos ensaios: preparação para o ensaio; momento do levantamento do cone e verificação do espalhamento.....	60

Figura 29 - Aspecto do CAA referência; detalhe das bordas.....	62
Figura 30 - Aspecto do CAA CCA5%; detalhe das bordas.....	62
Figura 31 - Aspecto do CAA CCA10%; detalhes das bordas.....	62
Figura 32 - Aspecto do CAA CCA15%; detalhes das bordas.....	62
Figura 33 - Escoamento e nivelamento total do concreto.....	65

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 – Composição química de CCA conforme alguns autores.....	20
Tabela 2 – Tipo de cimento e respectivas adições.....	22
Tabela 3 – Classificação das pozolanas estabelecida pela NBR 12653/2015.....	24
Tabela 4 – Características físico-mecânica.....	45
Tabela 5 – Caracterização do agregado miúdo	46
Tabela 6 – Composição granulométrica da areia.....	46
Tabela 7 – Caracterização do agregado graúdo.....	47
Tabela 8 – Composição granulométrica da brita.....	47
Tabela 9 – Dados técnicos do aditivo superplastificante.....	48
Quadro 1 - Limites superiores e inferiores de espalhamento encontrado na literatura.....	35
Quadro 2 -Limites superiores e inferiores para o tempo de escoamento.....	36
Quadro 3 -Resultados e dimensões de aparato para o ensaio de caixa-L.....	38
Quadro 4 - Valores de referência para o ensaio do anel J.....	39
Quadro 5 - Valores de referências para o ensaio V-funil.....	41
Quadro 6 - Traço das pastas mini-slump.....	51
Quadro 7 - Traços selecionados para o estudo.....	53
Quadro 8 - Traço dos CAA's (em kg/m ³ de concreto)	55
Quadro 9 - Composição química da CCA por FRX.....	59
Quadro 10 - Resultados do slump flow.....	60
Quadro 11 - Resultados do t500 (s).....	63
Quadro 12 - Resultados da caixa L.....	64
Quadro 13 - Resultados do anel J.....	65
Quadro 14 - Resultados da resistência à compressão axial em 7 dias.....	66
Quadro 15- Resultados da resistência à compressão axial em 28 dias.....	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAA	Concreto autoadensável
CCA	Cinza da casca do Arroz
IFPI	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí
NBR	Norma Brasileira
PPGEM	Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais
SCA	Sílica da casca do arroz
VMA	Aditivo Modificador de Viscosidade

LISTA DE SÍMBOLOS

% Porcentagem

g grama

kg quilograma

Min minutos

°C Grau Celsius

mm milímetros

MPa Mega Pascal

λ Comprimento de onda

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS.....	16
1.1.1	Geral.....	16
1.1.2	Específicos.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	CINZA DE CASCA DE ARROZ (CCA)	17
2.2	CCA COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND PELA CCA	21
2.3	CIMENTO	21
2.3.1	Tipos de Cimento.....	22
2.3.2	Materiais Pozolânicos	23
2.3.3	Concreto Autoadensável (CAA)	24
2.3.4	Vantagens e Desvantagens do CAA	27
2.3.5	Trabalhabilidade do CAA	28
2.4	APLICAÇÃO DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL	29
2.4.1	Exemplos de Obras com CAA	29
2.5	INTERAÇÃO CIMENTO-ADITIVO	31
2.6	MÉTODOS DE ENSAIO – NBR 15823:2017	33
2.6.1	Localização e caracterização da área de estudo	34
2.6.2	Visita ao Aterro Sanitário Municipal de Teresina-PI	35
2.6.3	Caixa L	36
2.6.4	Anel J	38
2.6.5	Funil V	40
2.7	DOSAGEM DO CAA.....	41
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
3.1	MATERIAIS	44
3.1.1	Cinza da Casca de Arroz	44
3.1.2	Cimento	45
3.1.3	Agregado Miúdo	45
3.1.4	Agregado Graúdo	46
3.1.5	Aditivo Superplastificante.....	47
3.1.6	Água	48
3.2	MÉTODOS.....	49
3.2.1	Beneficialmente da Casca de Arroz	49
3.2.2	Caracterização Química	49
3.2.3	Caracterização Mineralógica	49
3.3	PROGRAMA EXPERIMENTAL DO CAA.....	51
3.3.1	Ensaio em Pastas	51
3.3.2	Mini-Slump	52
3.4	DESENVOLVIMENTO DAS DOSAGENS DO CAA.....	52
3.5	ENSAIOS DO CAA NO ESTADO FRESCO – NBR 15823:2017	53
3.5.1	Produção dos Corpos de Prova	56
3.6	ESENSAIOS DO CAA NO ESTADO FRESCO – NBR 15823:2017	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
4.1	CINZA DA CASCA DE ARROZ	58
4.2	CONCRETO AUTOADENSÁVEL	59
4.2.1	Estado Fresco	59

4.2.2	Slump Flow – NBR 15823-2: 2017	59
4.2.3	Viscosidade Plástica (T500).....	63
4.2.4	Caixa L – NBR 15823- 4:2017	64
4.2.5	Anel J – NBR 15823 – 4: 2017	65
4.3	ESTADO ENDURECIDO	66
4.3.1	Resistência à Compressão Axial.....	66
5	CONCLUSÕES	69
	<u>REFERÊNCIAS</u>	72

1 INTRODUÇÃO

Essa pesquisa sobre concreto autoadensável é parte da linha de pesquisa do professor Dr. Hudson, que tem como foco principal estudar dosagem de concreto para aplicação de reforço estrutural. Pretende-se explorar a situação onde seja necessário o reforço estrutural aonde por limite da forma não se consegue aplicar adensamento (manual ou mecânico). Neste cenário, busca-se por um concreto autoadensável com alta resistência que não segregue.

De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), foram produzidos no Brasil aproximadamente 65,9 milhões de toneladas de cimento em 2022, estimando-se que, para cada tonelada produzida, 564 kg de CO₂ são emitidos (MORAES, 2019).

Nesse cenário, destaca-se o uso das cinzas da casca de arroz, que também são chamados de rejeitos de produção, e se caracterizam por serem materiais a princípio inutilizáveis, mas esses produtos de rejeito têm potencial e eficácia para substituir o material natural como agregado leve na produção de concreto, que por sua vez são finitos, tendo, assim, um apelo ecológico e sustentável.

A utilização de materiais alternativos se apresenta como forte aliada para contribuir com os esforços na redução das emissões de dióxido de carbono, pois são opções que podem estar presentes no esquema de fabricação do cimento na forma de queima, adições ou substituições ao clínquer produto intermediário do cimento e na forma de substitutos parciais em matrizes cimentícias (SILVA, 2021).

Com um consumo global e anual da ordem de 19 bilhões de toneladas, o concreto de cimento Portland é o material de construção mais empregado no mundo. Um dos motivos para o grande volume utilizado reside na sua ótima resistência à ação da água, justificando seu uso em barragens, canais, pavimentos, fundações, muros externos e tubos, além da durabilidade à exposição a águas agressivas encontradas em ambientes industriais e naturais. Outras duas razões principais para a disseminação do material estão relacionadas à sua capacidade de conformação no estado fresco, possibilitando a construção de elementos estruturais de diversos tamanhos e formas, e ao seu relativo baixo custo (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Segundo Dal Molin (2011), o concreto, tanto em estado fresco quanto endurecido, sofre mudanças com a incorporação de adições, alterando positivamente muitas de suas propriedades, seja pelo efeito físico relacionado ao

tamanho reduzido das partículas, seja pelo efeito químico/pozolânico ou até mesmo pela ação conjunta dos dois efeitos.

O concreto é definido como um material composto, constituído por cimento, água, agregados e ar. Na composição pode conter também adições de outros materiais como cinza, sílica e aditivos químicos que atuam com a finalidade de melhorar ou modificar o desempenho do compósito.

Segundo lacks (2019), muitos resíduos agroindústria não têm uma destinação correta, um exemplo bastante comum é a CCA. Esse resíduo tem como destino aterros ou até mesmo o descarte incorreto na natureza, ocasionando assim alguns problemas ambientais, como a poluição do solo, de mananciais e até mesmo do ar.

Ainda nessa perspectiva de materiais alternativos, a substituição por resíduos agrícolas como cinza da casca de arroz que é um rejeito agrícola proveniente da combustão da casca de arroz. Segundo Mehta (1992), uma tonelada de arroz produz cerca de 200 kg de casca e, após queima, gera 40 kg de cinza.

Mundialmente, a produção de arroz chega a, aproximadamente, 678 milhões de toneladas no ano. Dessas, 20% se transformam em rejeito, o que equivale a 132,4 milhões de toneladas anuais. Apesar desses números consideráveis, a maioria da casca de arroz não tem uma finalidade nobre, mas sim é usada como adubo ou descartado na beira dos rios.

Apoiado no conhecimento da sílica da casca de arroz se tratar de um material pozolânico com elevada área superficial específica e estrutura amorfa e, como tal, possível de ser utilizada em CAA, esta dissertação estudou caracterização e aplicação da CCA visando o melhoramento da resistência mecânica no concreto autoadensável.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

O objetivo principal deste trabalho é realizar a caracterização e aplicação da CCA visando o melhoramento da resistência mecânica no CAA obtida através da queima controlada como adição mineral de concreto autoadensável, analisando o melhor teor de utilização do material.

1.1.2 Específicos

- Apresentar o método de produção da CCA. Trata-se de um método de tratamento térmico, com controle de temperatura;
- Caracterizar a CCA utilizando fluorescência de raios-X (FRX), difração de raios-X (DRX);
- Dosar traços de CAA com diferentes teores de substituição de cimento por CCA com os diferentes teores de substituição do cimento pela adição mineral (5%, 10% e 15% da massa do cimento);
- Analisar o comportamento do estado fresco do CAA dosado com cada teor da CCA, comparando-os com o concreto de referência;
- Analisar a influência da CCA no estado endurecido após realização de ensaios de resistência mecânica (compressão axial) do CAA, relacionando-os com o CAA sem a pozolana.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CINZA DE CASCA DE ARROZ

O Brasil deve produzir 10,395 mil toneladas de arroz na safra 2024/2025, segundo o nono levantamento da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab). O volume é 3,6% maior que o colhido na safra 22/23, quando a produção alcançou 10,031 milhões de toneladas.

Dentre os materiais pozolânicos, a cinza de casca de arroz (CCA) vem sendo cada vez mais estudada nos últimos anos. Sua utilização como finos na produção de concreto de elevado desempenho tem sido o objeto de pesquisas com resultados promissores, como confirmam os trabalhos de Alcantara e Santos (2012), Silva (2004) e Silva (2009). A CCA é obtida por meio do processo de queima e moagem da casca de arroz.

Segundo Perez (2019), feito a queima completa da casca de arroz, aproximadamente 20% dessa casca se converte em cinza, o que sucede um vasto volume de resíduo sem destinação correta, podendo assim ocasionar problemas ambientais.

Diante desse panorama, os países produtores de arroz são constantemente desafiados a enfrentar o problema e a dar um destino correto ao subproduto, em favor do progresso econômico (APRIANTI, 2015).

Ao ser queimada a baixas temperaturas, a casca de arroz gera uma cinza com certo teor de carbono e, por isso, apresenta coloração escura. No entanto, quando o processo de combustão é realizado de forma completa, o material resulta numa cinza de cor acinzentada, branca ou púrpura.

Em conformidade com a literatura variáveis como temperatura de queima, tempo de residência e taxa de aquecimento influenciam diretamente nas propriedades físico-químicas quanto nas estruturas morfológicas da CCA (TASHIMA; FIORITI; AKASAKI, 2012).

A casca do arroz é um resíduo agroindustrial obtido do revestimento externo dos grãos do arroz, após o processo de moagem (Figura 1).

Figura 1 – Casca de Arroz.



Fonte: FERNANDES (2016).

Quando esse processo de queima da casca de arroz é feito de forma não controlada, a quantidade de carbono presente na cinza faz com que o efeito seja adverso e seu uso, restrito. Porém quando a queima é feita de forma controlada, entre 500 °C e 700 °C, o produto é uma cinza com grande quantidade de sílica em seu estado amorfo e com alta reatividade (GANESAN; RAJAGOPAL; THANGAVEL, 2008).

Vale ressaltar que a temperatura atingida durante a combustão da casca de arroz é um fator de influência determinante para o aparecimento da sílica em estado amorfo ou cristalino. Sendo indispensável obtenção de estudos quanto à temperatura de queima da casca de arroz (TASHIMA; SILVA; AKASAKI, 2007).

Desta forma, diante de estudos realizados buscando aumentar as possibilidades de reutilização da CCA, a construção civil tem se destacado com uma das principais áreas de utilização da CCA como material alternativo, principalmente na preparação de concretos, argamassas a base de cimento Portland além de tijolos ecológicos (TASHIMA; FIORITI; AKASAKI, 2012).

Embora a sílica ativa seja mais fina que a cinza de casca de arroz, a CCA apresenta uma maior área específica devido a sua porosidade interna. É justamente por causa dessa porosidade interna e maior área específica que, segundo os autores, a CCA tende a se comportar diferente da sílica ativa, melhorando o processo de hidratação e o desenvolvimento da microestrutura do concreto utilizando menores relações água/cimento, em uma faixa de 0,10 a 0,25 (TUAN, 2011).

Com uma estrutura de mesoporos, a CCA possui maior capacidade de absorção de água do que a sílica ativa e consegue absorver uma quantidade significativa de água livre no processo de hidratação na mistura de concreto de cimento Portland, aumentando a resistência mecânica do produto final. Além disso, a CCA desempenha um importante papel no combate à retração do concreto em seu

processo de endurecimento, funcionando como um agente de cura interna (VAN, 2014).

Tiboni (2007) relata que praticamente todas as pesquisas realizadas concordam que a temperatura de calcinação deve estar entre 500°C e 700°C para a produção de uma sílica amorfa. Rêgo (2004) observa que todos os autores pesquisados confirmam o aparecimento de fases cristalinas em cinzas submetidas a elevadas temperaturas, especialmente maiores que 700°C. Silva (2010) aponta que é possível obter resultados satisfatórios com temperaturas entre 700° e 800°C, porém por meio de uma queima rápida.

Cinza da casca de arroz tem um elevado teor de sílica (90 a 95%) em sua composição, podendo ser aplicada com grande ênfase na área da construção civil como, pozolana agregada em cimentos do concreto e argamassas ou na adição da fabricação de tijolos prensados e estabilização de solos (POUEY, 2006).

A sílica são combinações de silício e oxigênio na forma de SiO_2 , e pode representar cerca de 15% do peso da cinza da casca de arroz. Contudo através de uma queima controlada da casca de arroz pode-se aumentar a intensidade de sílica chegando a 95% de sílica pura, com partículas entre 20µm com uma área superficial específica de 10m²/g, (FOLETTTO; HOFFMANN; HOFFMANN, 2005).

É notório que tanto a casca de arroz quanto as cinzas provenientes de sua queima, colaboram diretamente ou indiretamente para impactar no meio ambiente, como na saúde da sociedade, caso tenham um gerenciamento incorreto, uma vez que, segundo Pouey (2006) a quantidade de cinza de casca de arroz gerada com a queima corresponde a 20% do volume da casca de arroz. Desse modo, usar cinza da casca de arroz como sendo um aditivo no concreto (composição) é uma maneira de garantir boa destinação.

Conforme Muthadhi e Kothanderaman (2010), as condições ideais de queima são a uma temperatura de 500 °C por 120 minutos, para uma produção de cinzas com pozolanicidade máxima e com maior índice de sílica amorfa, densidade máxima e alto grau de finura. Para que a cinza obtenha a coloração escura, que segundo Pouey (2006), é rica em carbonos fixos e sílica amorfa.

A Tabela 1 apresenta as composições da CCA encontradas por diversos autores. Observa-se que não houve mudanças expressivas nos teores de sílica, ficando em torno de 90%. O mesmo acontece com os outros compostos químicos da CCA, podendo haver pequenas variações em razão das localizações, variedades,

clima, solo e fertilizantes utilizados durante o crescimento do arroz (ZOU; YANG, 2019).

Tabela 1 – Composição química de CCA conforme alguns autores.

Composto	Mehta (2005)	Bui et al. (2005)	Gastaldini et al. (2010)	Mahmund et al. (2016)	Fernandes et al. (2016)	Adesina e Olutoge (2019)	Viera et al. (2020)
SiO ₂	87,2	86,2	90	85,76	96,71	93,8	89,85
Al ₂ O ₃	0,15	0,84	0,28	0,25	0,09	0,74	4,79
Fe ₂ O ₃	0,16	0,73	0,14	1,15	0,01	0,3	0,86
CaO	0,55	1,4	0,45	0,74	—	0,89	0,79
MgO	0,35	0,57	0,28	0,81	—	0,32	—
Na ₂ O	0,24	—	0,02	0,31	—	0,28	—
K ₂ O	1,12	0,11	0,08	—	0,69	0,12	1,38
SO ₃	3,68	2,46	1,55	—	—	—	1,34
LoI*	8,55	5,14	5	4,05	2,96	3,37	0,53
Local	Brasil	Vietnã	Brasil	Malásia	Brasil	Índia	Brasil

Fonte: ZOU; YANG, 2019.

Estudos feitos por entidades americanas desde 2008 para a normalização, padronização e especificações para o CAA, vem fazendo com que sua aplicação seja cada vez maior. Estima-se que já chegue à 5.000 m³ de CAA o volume utilizado por dia, em estruturas protendidas na América do Norte (ARAÚJO, 2008).

Como resultado são geradas milhares de toneladas de CCA, o que prejudica o seu gerenciamento, pois demanda muito espaço para o devido ao acúmulo e descarte, Calheiro (2016). O descarte incorreto do resíduo industrial de CCA (Figura 2).

Figura 2 - Depósito de CCA a céu aberto.



Fonte: Pouey (2006).

2.2 CAA COM A SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND PELA CCA

A depender de certas condições de dosagem, o reaproveitamento da cinza e da sílica da casca de arroz como pozolana vem demonstrando resultados satisfatórios em concretos autoadensáveis, atendendo questões técnicas e ambientais de fazê-lo. De forma a exemplificar sua atuação em CAA serão analisados alguns trabalhos com a CCA amorfa produzida em fornos laboratoriais ou em outros tipos de queima, como substitutos parciais do cimento Portland, distinguindo seus efeitos nos estados fresco e endurecido.

2.3 CIMENTO

O cimento é definido como o produto final obtido a partir da extração de matéria-prima em pedreiras, beneficiamento e transformação química (clinkerização), seguida de moagem. Esse processo se inicia com a obtenção de material cálcico, como calcário, para trituração, preparo e homogeneização antes da calcinação. Elevando-se à temperatura de aproximadamente 1400° C, se produz o clínquer (componente intermediário na produção do cimento). Após sua obtenção, o material é resfriado até a temperatura de 100° C para que seja misturado com cal e moído até a formação do cimento Portland (NEVILLE; BROOKS, 2010).

O cimento possui em sua composição química elementos como alumínio (Al), cálcio (Ca), ferro (Fe), oxigênio (O) e silício (Si) de forma significativa, além de outros. Tais elementos são apresentados na forma de compostos cálcicos e, convenientemente, representados por abreviações na literatura. Os estudos acerca de sua composição são representados em função dos óxidos presentes na composição de modo que os percentuais dos compostos cálcicos são determinados pelo conjunto de Equações de Bogue (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A Efnarc (2006) recomenda um consumo de cimento entre 350 a 450 kg/m³, podendo ainda chegar a um limite máximo de 500 kg/m³. Mais de 500 kg/m³ pode ser perigoso e aumentar a retração e o uso de menos de 350 kg/m³ pode fazer com que a mistura tenha poucos finos e acabe tendo uma baixa resistência à segregação. Um consumo de cimento inferior a 350 kg/m³ poderia ser adequado,

caso se utilize um outro material cimentício, que passa a compor a mistura, em substituição parcial do cimento.

2.3.1 Tipos de cimento

Como dito, o cimento é um composto de clínquer e adições, sendo que essas adições são as responsáveis por dar as características de cada tipo de cimento. Através da tabela abaixo, pode-se observar o tipo de cimento, a adição e a respectiva norma técnica (Tabela 2).

Tabela 2 – Tipo de cimento e respectivas adições.

TIPO DE CIMENTO	ADIÇÕES	SIGLA	NORMAS
Cimento Portland Comum	Escório, pozolona ou filer (até 5%)	CP I -S 32 CP I-S 40	5732
Cimento Portland Composto	Escória (6-34%)	CP II-E 32 CP II-E 40	11578
	Pozolana (6-14%)	CP II- 32	
	Filer (6-10%)	CP II-F32 CP II-F40	
Cimento Portland de alto-forno	Escória (35-70%)	CP III- 32 CP III- 40	5735
Cimento Portland Pozolânico	Polozana (15%-50%)	CP IV- 32	5736
Cimento Portland de Alta Resistência Inicial	Materiais carbonáticos (até 5%)	CP V-ARI	5733
Cimento Portland Resistente a Sulfatos	Estes comentos são designados pela sigla RS.Ex.: CP II-40 RS, CP V- ARI RS		5737

Fonte: ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland.

Baseado nesse contexto, pesquisas apontam que a adição de materiais finos, por exemplo, favorece as propriedades de durabilidade, pois ao aumentar a quantidade de partículas finas, melhora a homogeneidade da pasta. Além disso, dificulta a penetração de agentes externos agressivos, cenário que afeta diretamente a durabilidade do concreto.

Os finos atuam como pontos de nucleação, fazendo com que o cimento reaja com a água mais rapidamente, obtendo-se um ganho de resistência importante nas primeiras idades (TUTIKIAN; DAL MOLIM, 2008).

Ademais, a possibilidade de adicionar grandes quantidades de resíduos industriais no CAA, como a cinza de casca de arroz, contribuiria com a redução do custo deste concreto, além de aumentar seu mérito ambiental.

2.3.2 Materiais Pozolânicos

Pozolana se refere à materiais silicosos ou silico-aluminosos que reagem com o hidróxido de cálcio, promovendo o endurecimento da pasta quando misturadas com cal ou com cimento Portland em meio aquoso, além de conferir outras propriedades, sendo classificadas como naturais ou artificiais. O grupo dos naturais compreende os materiais que são obtidos na natureza e passam por moagem para obtenção da granulometria adequada, enquanto o grupo das artificiais passam por tratamento químico, modificações estruturais e moagem quando necessárias (HEWLETT; LISKA, 2019).

O termo utilizado para designar esse grupo de materiais está diretamente ligado com a reação química que desempenham quando presentes em uma matriz cimentícia, a chamada reação pozolânica. Essa reação ocorre quando o hidróxido de cálcio gerado durante a hidratação do cimento reage com os óxidos presentes na composição das pozolanas e que faz com que a quantidade de compostos cálcicos hidratados formados seja maior, melhorando as propriedades mecânicas da matriz, bem como sua durabilidade (KOLAWOLE, 2021).

As melhorias produzidas nas matrizes cimentícias na presença de pozolanas se devem ao efeito microfiller e ao efeito de nucleação. O primeiro se relaciona com a granulometria e a quantidade de material utilizado na mistura, promovendo a diminuição da porosidade e conferindo maior coesão ao produto gerado. A nucleação também possui estrita relação com a granulometria e teor do material utilizado, mas possui influência na intensidade das reações durante a hidratação, permitindo maior formação de compostos na hidratação, pois aumenta a superfície de contato disponível (MORAES, 2019).

Outro fator a ser considerado ao estudar a atividade pozolânica dos materiais se encontra na amorficidade, especialmente da sílica, pois é a responsável por dar origem aos compostos que mais influenciam nas propriedades mecânicas das matrizes cimentícias. É comum encontrar em pesquisas a análise da amorficidade dos materiais, pois, a depender dessa característica, o material pode ter maior reatividade pozolânica e produzir efeitos mais significativos quando comparado com material mais cristalino. Cabe salientar que a granulometria também desempenha esse papel por meio do efeito filler, porém de forma secundária (KOLAWOLE, 2021).

A ABNT NBR 12653 (2015) descreve a pozolana como um material silicoso ou sílico-aluminoso que, sozinho, possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante, entretanto quando dividido finamente e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades ligantes. É importante que este material esteja finamente moído para que a sílica possa combinar com o hidróxido de cálcio na presença de água para formar silicatos estáveis.

A ABNT NBR 12653 (2015) classifica as pozolanas em classes, de acordo com sua origem (Tabela 3).

Tabela 3 – Classificação das pozolanas estabelecida pela NBR 12653/2015.

Classificação	Materiais que obedecem aos requisitos
Classe N	Pozolanas naturais, materiais vulcânicos, terras diatomáceas, argilas calcinadas
Classe C	Cinza volante proveniente da queima de carvão mineral em usinas termoelétricas
Classe E	Quaisquer pozolanas que diferem das classes anteriores

Fonte: NBR 12653/2015.

De acordo com a norma ASTM C 989, se classifica à cinza de casca de arroz, produzida em condições especiais, como pozolana de alta reatividade. Mehta e Monteiro (2014), ainda afirmam que, quanto à atividade pozolânica, a cinza de casca de arroz reativa é semelhante à sílica ativa.

2.3.3 Concreto Autoadensável

A ABNT NBR 15823-1:2017 define o concreto autoadensável como o concreto capaz de fluir, auto adensar pelo seu peso próprio, preencher a fôrma e passar por embutidos (armaduras, dutos e insertos), enquanto mantém sua homogeneidade (ausência de segregação) nas etapas de mistura, transporte, lançamento e acabamento (Figura 3).

Figura 3 – Aplicação do concreto autoadensável.



Fonte: Repette, 2015.

O concreto surgiu com o desejo de se criar uma pedra artificial resistente, econômica e durável como a pedra natural, e que apresentasse como vantagem a possibilidade de ser moldada nas dimensões e nas formas desejadas” (PINHEIRO; GIONGO, 1986).

Os autores Tutikian e Dal Molin (2008) citam que, em 1988, no Japão, foi desenvolvido o concreto autoadensável (CAA), capaz de se moldar nas fôrmas por conta própria sem necessidade de nenhuma vibração ou compactação externa de qualquer natureza.

O concreto autoadensável, se diferencia do concreto convencional pela presença de dois novos materiais em sua composição, os quais são materiais finos e aditivos. Sendo ambos essenciais para sua formação, já que os finos dão a mistura, coesão e resistência à segregação, ocupando espaços que ficariam vagos, já os aditivos, modificam quimicamente, diminuindo a quantidade de água necessária à pasta e posteriormente, dando durabilidade e resistência ao concreto (OKAMURA, 2003).

O concreto autoadensável (CAA) é um caso particular de concretos de nova geração, o qual procura tirar partido dos fatores tecnológicos, como por exemplo, a ausência de vibração durante as fases de lançamento e de adensamento nas formas. Surgiu no início dos anos 80, devido às pesquisas pioneiras realizadas no Japão, Itália e Alemanha (ISAIA, 2005).

Conforme Mehta (2014), os mesmos tipos de agregados graúdos utilizados na produção de concretos convencionais são adequados para o emprego em CAA. A

forma e a textura superficial das partículas do agregado têm maior influência nas propriedades do concreto no estado fresco. Deste modo, visando facilitar a fluidez do CAA, é comum na produção deste tipo de concreto, a utilização de agregados graúdos com forma regular, baixa superfície específica e textura pouco áspera.

Comparadas às partículas lisas e arredondadas, as partículas de textura áspera, angulosas lamelares ou ainda achatadas, necessitam de uma quantidade maior de pasta de cimento para a produção de concretos com grande deformabilidade, fazendo com que o custo destas misturas tenha um aumento significativo. É habitual que a quantidade de agregados graúdos seja limitada pela presença de grãos mais finos na mistura (DE LARRARD, 1999).

Assim, o CAA pode ser definido como um concreto fluido que pode ser lançado em um molde de suporte sem o uso de vibradores, formando um produto livre, ou seja, nenhum espaço deixa de ser preenchido dentro da fôrma, evitando vazios de ar aprisionado (MEHTA, 2014).

Estas citações compravam ainda mais social e economicamente que a opção por utilizar concreto autoadensável reduz o risco de acidentes e de ruídos provocado pelo uso de vibradores na execução de uma concretagem, diminuindo a incidência de periculosidade à saúde do trabalhador. Reduz a possibilidade do surgimento de manifestações patológicas decorridas da deficiência de qualidade da mão de obra e execução das estruturas de concretos, gerando ganhos significativos com a durabilidade das obras.

O surgimento do CAA só foi possível devido a pesquisas aplicadas e a incorporação de adições minerais, adições de fillers e aditivos químicos ao concreto tradicional. Um concreto só será considerado autoadensável, se três propriedades forem alcançadas: a fluidez, a coesão necessária para que a mistura escoe intacta entre as barras de aço e a resistência a segregação (EFNARC, 2005).

Segundo Tutikian (2004) a utilização do CAA é ampla, o qual pode ser moldado no local como na indústria de pré-moldados, dosado no canteiro de obras ou em centrais de concreto, e posteriormente transportado por caminhão betoneira para as obras. O CAA pode ser lançado com guas, bombas de concreto, ou simplesmente espalhado (Figura 4).

Figura 4 – Lançamento de concreto autoadensável.



Fonte: ABESC, 2011.

O concreto autoadensável (CAA) é apresentado como uma grande revolução ocorrida na tecnologia do concreto para a construção nos últimos anos, o qual possibilita inúmeros ganhos em relação ao concreto tradicional, entre os quais (EFNARC, 2005).

- Diminui o tempo da construção;
- Redução de mão-de-obra;
- Melhora o acabamento final da superfície;
- Por ser mais fácil de adensar e pode aumentar a durabilidade;
- Permite a concretagem em peças de seções menores;
- Por não necessitar ser vibrado, elimina o barulho da vibração;
- Melhores condições de segurança;
- Pode reduzir o custo final do concreto e/ou da estrutura.

Conforme a Associação Brasileira das Empresas de Concretagem (2011), o CAA é um concreto muito plástico, pois proporciona grande fluidez e alta trabalhabilidade. A formulação desses concretos é fruto de pesquisas aplicadas ao uso de aditivos super plastificantes e modificadores de viscosidade, combinados com elevado teor de finos, sejam eles cimento Portland, fillers, adições minerais, entre outros.

2.3.4 Vantagens e desvantagens do CAA

Concreto autoadensável elimina a necessidade de vibração pode levar a um concreto de melhor qualidade, eficiência econômica (maior velocidade de concretagem redução no trabalho, energia e custo de equipamento), melhoria rumo à

automação de produtos pré-moldados e das condições de trabalho e redução dos riscos de saúde (MANUEL, 2005).

De acordo com Lisboa (2004), o uso do CAA também possibilita a melhora nas condições de segurança na obra; eliminação do ruído provocado pelo vibrador e da necessidade de espalhamento e de vibração do concreto. Além disso, o produto final obtido do CAA apresenta menos defeitos e bom acabamento e utiliza menor quantidade de mão de obra.

Como principais desvantagens do CAA encontram-se a necessidade de mão de obra especializada para sua confecção e controle tecnológico. Ele possui maior necessidade de controle, durante sua aplicação, quando comparado ao concreto convencional, de cuidados especiais com o transporte, para evitar a segregação, além de apresentar menor tempo disponível para aplicação, em relação ao concreto convencional (LISBÔA, 2004).

2.3.5 Trabalhabilidade do CAA

De acordo com Takada (2004) e Manuel (2005), existem algumas propriedades do CAA no estado fresco que precisam ser avaliadas por métodos de ensaios particulares. Os três requisitos a seguir são considerados os mais importantes critérios para caracterizar o concreto auto-adensável:

- **Fluidez ou habilidade de fluir:** a habilidade de preencher completamente todas as áreas e cantos da forma em que for lançado apenas sob a ação do seu peso próprio, sem que nenhuma vibração externa seja exercida, mesmo em situações em que o espaçamento entre as barras de aço das armaduras seja muito estreito;
- **Resistência à segregação:** habilidade de reter o agregado graúdo da mistura em suspensão, mantendo a mistura sempre como um material homogêneo;
- **Propriedade de não bloquear ou habilidade passante:** refere-se à habilidade do concreto em passar através de áreas congestionadas com armaduras, sem separação dos seus constituintes e sem bloqueio (passar livremente pelas barras de aço).

2.4 APLICAÇÃO DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL

Tomando como base a pesquisa bibliográfica desenvolvida nos Capítulos anteriores, na qual foram coletadas informações sobre o concreto autoadensável, por conseguinte veremos a aplicação do concreto auto adensável nos setores da construção civil, sendo elencados alguns exemplos do uso em obras reais.

2.4.1 Exemplos de obras com aplicação de concreto autoadensável

De acordo com Tutikian e Dal Molin (2008), o CAA pode ser confeccionado nos canteiros de obras, na indústria de pré-moldados ou em centrais fornecedoras de concreto que executam sua mistura, transporte e lançamento.

Segundo Nunes (2001), no tanque exterior protendido de um depósito destinado ao armazenamento de metano liquefeito com uma capacidade de 180.000kg, o que faz dele o maior tanque não enterrado do mundo para a época. A estrutura de concreto, correspondente a um volume de com 12.000m³, apresenta 84.2m de diâmetro, 38.4m de altura e 0.8m de espessura, foi construída com CAA para atingir a impermeabilidade e durabilidade exigidas, assim como, reduzir o período de construção e os custos (Figura 5).

Figura 5 – Tanque de armazenamento de metano liquefeito no Japão.



Fonte: Nunes, 2001.

Segundo Tutikian (2004), a estação de metrô do Amsterdã Arena, estádio de futebol do Ajax utilizou CAA devido ao grande número de repetição da forma. Com

essa opção aumentou-se a durabilidade das formas e diminuiu-se o custo total da construção. A estação possui quatro pistas de 135 metros de comprimento, totalizando 1,4 quilômetros. Como cada painel possui um comprimento de 23,30 metros, foram executadas 60 unidades, todas com resistência à compressão de 55 MPa (Figura 6).

Figura 6 – Estação de metrô do Amsterdã Arena.



Fonte: Walraven, 2005.

O Edifício Infinity Coast considerado um dos maiores edifício residencial na América do Sul, localizado no Balneário Camboriú em Santa Catarina, possui bloco de fundação (Figura 7) com volume de 5.300 m³ e utilizou concretos com resistência de 30 MPa e 45 MPa. Foi utilizado CAA para que o processo de secagem iniciasse junto, devido a rapidez de execução, tornando a execução menos onerosa pois decisão dispensou o uso de vibradores, facilitando a logística (TÉCHNE, 2017).

Figura 7 – Fundação do Edifício Infinity Coast.



Fonte: TECHNE PINI (2017).

A estrutura do Porto Ametista (Figura 8) possui 13,20 metros de altura e foi executada com parede de concreto moldada in loco. Ao todo, a construtora utilizou 54 m^3 de concreto usinado autoadensável por parede e 12 m^3 por concretagem de platibanda, totalizando 282 m^3 de concreto por torre. A construção contou também com peças pré-moldadas, sendo cerca de 700 peças de alumínio para paredes e 200 peças para a platibanda (TÉCHNE, 2017).

Figura 8 – Porto Ametista.



Fonte: TECHNE PINI (2017).

2.5 INTERAÇÃO CIMENTO-ADITIVO

Um dos principais fatores responsáveis pela incompatibilidade é a composição química do cimento, com destaque para as quantidades de álcalis, C3A e sulfatos solúveis. É frequente esse tipo de problema em função da ausência de sulfatos solúveis para balancear a reatividade dos aluminatos, aspecto influenciado pela finura do cimento, pelo tipo e teor de aditivo e pelo emprego de adições minerais. Somada a isso, a falta de sulfatos faz com que a combinação das moléculas dos aditivos com os aluminatos seja potencializada, resultando em instabilidade no sistema.

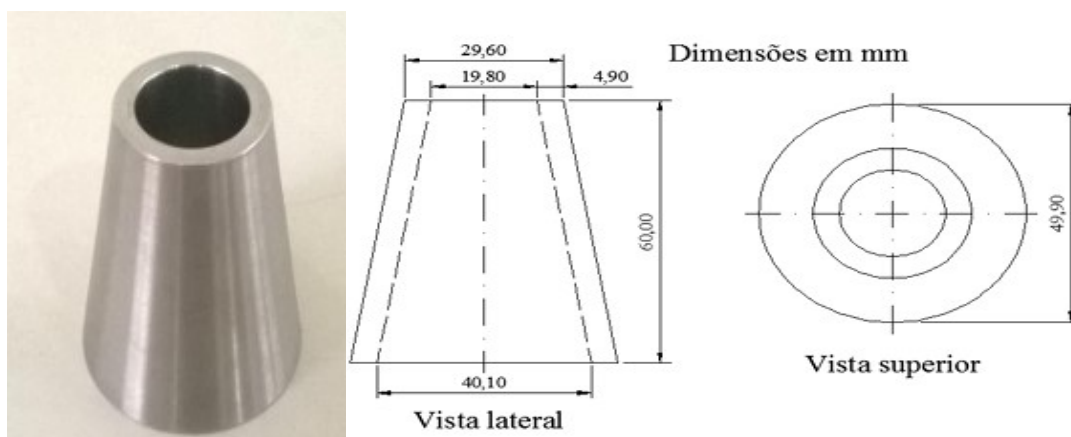
Os álcalis também podem atuar em tal equilíbrio ao modificar a taxa de solubilidade dos sulfatos e a reação de hidratação do C3A. Como consequência, os sinais mais comuns da incompatibilidade no concreto são: rápida perda de abatimento, reduzida fluidez, pega instantânea ou falsa pega e danos à resistência à

compressão Hartmann (2011). Por sua vez, a dosagem excessiva de aditivos causa exsudação, segregação e aumenta custos Roncero, 2000). Isso justifica a importância de verificar a interação entre os materiais por meio de métodos simples, antes de sua utilização no CAA.

Um dos testes mais comuns para tal finalidade é o ensaio do mini-slump. Proposto inicialmente por Kantro, em 1980, consiste em realizar o abatimento de um pequeno volume de pasta, preenchendo o molde tronco-cônico apresentado na Figura 9. O procedimento habitual compreende as seguintes etapas (AÏTCIN, 2000):

- ✓ Pesar o aglomerante (cimento e adição) a ser ensaiado;
- ✓ Pesar a quantidade necessária de água;
- ✓ Pesar o teor de superplastificante e diluí-lo na água separada no item anterior;
- ✓ Misturar manualmente o aglomerante e a água durante 1 minuto;
- ✓ Misturar a pasta em misturador mecânico durante 2 minutos;
- ✓ Posicionar uma placa de vidro sobre a bancada e nivelá-la;
- ✓ Posicionar o minicone no centro da placa e verter a pasta no seu interior, após misturá-la por mais 15 segundos;
- ✓ Dar 10 batidas no topo do mini cone e, em seguida, levantá-lo de modo que a pasta se conforme sobre a placa de vidro;
- ✓ Medir o diâmetro formado em dois pontos ortogonais e extrair a média aritmética.

Figura 9 – Molde destinado ao ensaio do mini-slump e suas dimensões.



Fonte: Elaboração da autora (2025).

Em combinações incompatíveis entre o aglomerante e o aditivo químico acontece a redução acentuada do espalhamento em função do tempo Aïtcin (2000). Ademais, o ensaio também se destina a encontrar o ponto de saturação do aditivo, dosagem a partir da qual um acréscimo no seu teor não causa mais alteração na reologia da pasta, sendo representado pelo grau máximo de dispersão das partículas de cimento Roncero (2000). Neste trabalho, o método será utilizado para determinar a interação entre o cimento, a sílica da casca de arroz e o aditivo de modo a validar as porcentagens de CCA a serem empregados nos concretos autoadensáveis.

2.6 MÉTODOS DE ENSAIO CONFORME A ABNT NBR 15823:2017

Publicada inicialmente em 2010 e revisada em 2017, a ABNT NBR 15823 estabelece os requisitos fundamentais para o concreto autoadensável, sendo composta por um conjunto de documentos que se equiparam as principais normas internacionais do gênero. A parte 1 determina a classificação, recebimento e controle, e as partes 2 a 6 propõem os ensaios para a verificação do CAA no estado fresco. A seguir são apresentados os métodos de ensaio preconizados pela norma e empregados neste trabalho, ressaltando suas principais características e procedimentos.

Segundo Gomes e Barros (2009), a alta deformabilidade e a moderada viscosidade são parâmetros que refletem o comportamento reológico do CAA e garantem as principais propriedades que devem ser atendidas. Para avaliação destas propriedades muitos ensaios já foram desenvolvidos, como por exemplo: Slump flow, Anel J, Funil V, Caixa L, coluna de segregação, U-box test, Fill-box test e Orimet test.

Desses ensaios cinco são descritos pelas NBR 15823 Concreto autoadensável, que são: Slump flow test, Slump flow T500 test, Anel J, Funil V, Caixa L, coluna de segregação e serão descritos abaixo.

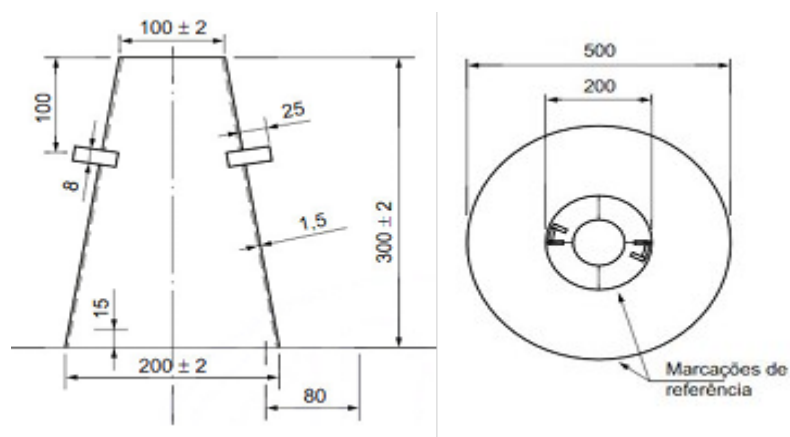
2.6.1 Determinação do espalhamento (slump-flow)

De acordo com Takada (2004), o espalhamento é um dos métodos de ensaio mais populares para avaliação das propriedades do CAA, por causa dos procedimentos e equipamentos comparativamente simples. Segundo Tutikian (2004), o ensaio de espalhamento foi desenvolvido primeiramente no Japão, para ser usado em concretos submersos.

O Método do Cone de Abrams, segundo NBR 15823-2:2017, tem o objetivo de avaliar visualmente (qualitativamente) a segregação do CAA, resultando no espalhamento da massa de concreto, obtido pela média aritmética de duas medidas perpendiculares do diâmetro realizadas em milímetros. Simultaneamente é realizada a verificação do tempo de escoamento (t_{500}), que 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 cobrir totalmente a marca circular de diâmetro 500 mm (dF) da placa de base.

Para a execução do ensaio foi utilizado o Cone de Abrams e uma placa base quadrada com 1000 mm de lado dotada de marcações de referência para a execução conjunta do ensaio T500. É mostrado um desenho, em perspectiva, dos equipamentos (Figura 10).

Figura 10 – Equipamento utilizado no ensaio do slump-flow.



Fonte: ABNT NBR 15823-2:2017.

De acordo com Tutikian (2004), espalhamentos abaixo do limite inferior, indicam que o concreto está pouco fluido, ou seja, é necessário fluidificar o material

através de água ou aditivos superplastificantes, e se a medida estiver acima do limite superior, deve-se tornar o concreto mais coeso, para que não ocorra segregação (Quadro 1).

Quadro 1 – Limites superiores e inferiores de espalhamento encontrados na literatura.

Referências	Espalhamento (mm)	
	Mínimo	Máximo
Petersson (1999)	600	800
Tviksta (2000)	550	700
Coppola (2000)	650	725
Palma (2001)	600	---
Gomes (2002)	600	700
Araújo et al. (2002)	650	800
Gomes et al. (2003)	600	750
EFNARC (2005)	550	850
Melo (2005) *	600	700
Alencar (2008) *	650	780
Ferraz (2009) *	600	670
Almeida Filho <i>et al.</i> (2010) *	570	740

Fonte: Tutikian, 2004.

De acordo com De Schutter (2008), quanto maior for o espalhamento (SF), maior será a habilidade de preenchimento (ou fluidez) do concreto fresco. A maioria dos CAAs requerem um espalhamento maior que 600mm para atingir uma habilidade de preenchimento adequada.

2.6.2 Determinação viscosidade plástica aparente sob fluxo livre (t500)

Realizado simultaneamente ao slump-flow, este ensaio mede o intervalo de tempo entre o início e o final do escoamento do concreto, a partir do diâmetro do molde até a marca circular de diâmetro 500 mm da placa-base. De posse do resultado, o concreto pode ser classificado em dois grupos para este ensaio.

Os concretos referentes a classe VS1 são adequados para elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos e para concretagens realizadas a partir do ponto mais alto com deslocamento livre. Os concretos de classe VS2 são adequados para a maioria das aplicações correntes, apresentam efeito tixotrópico que acarreta menor pressão sobre as formas e melhor resistência à segregação NBR 15823-2:2017.

De acordo com a Efnarc (2005) e a NBR 15823-1:2017 os concretos de classe VS1 exigem maior controle da exsudação e da segregação. Já os concretos de classe VS2, podem apresentar efeitos negativos, com relação à superfície de acabamento (ar aprisionado), no preenchimento de cantos e suscetibilidade a interrupções ou demora entre sucessivas camadas.

Segundo Tutikian (2004), diversos autores estabelecem limites para este ensaio. Se o tempo for abaixo do limite inferior, indica que o concreto está muito fluido e, se for acima do superior, indica que o concreto está muito coeso, devendo em ambos os casos, ser corrigido como mostra na (Quadro 2).

Quadro 2 – Limites superiores e inferiores para o tempo de escoamento.

Referências	Tempo (s)	
	mínimo	máximo
Petersson (1999)	5	12
Coppola (2000)	5	12
Palma (2001)	3	5
Gomes (2002)	4	10
Gomes et al. (2003)	3	7
Araújo et al. (2003)	2	5
Rigueira Victor et al. (2003)	3	6
EFNARC (2005) *	≤2	>2
Alencar (2008) *	1,5	3,6
Almeida Filho <i>et al.</i> (2010) *	1	1,5

Fonte: Tutikian, 2004.

2.6.3 Determinação da habilidade passante (caixa L)

O ensaio da caixa-L mede a fluidez do concreto simultaneamente com a habilidade deste de passar por obstáculos, permanecendo coeso (TUTIKIAN, 2004).

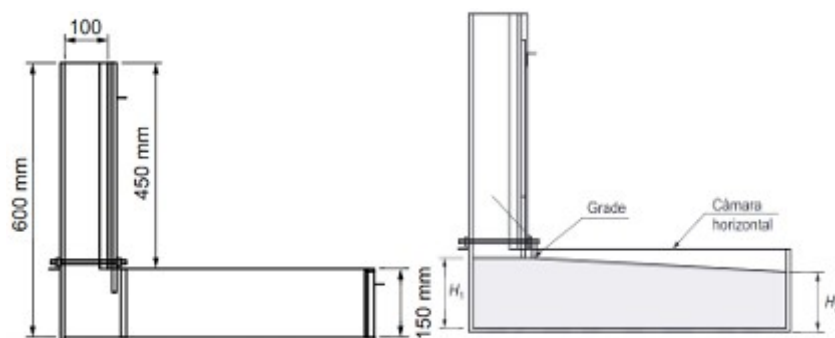
Definido pela ABNT NBR 15823-4:2017, o ensaio consiste em verificar se o concreto sob a força de seu peso próprio consegue passar por obstáculos como, por exemplo, armaduras sem que ocorra bloqueio. Esse ensaio também determina a habilidade passante do CAA, porém, sob fluxo confinado. O ensaio também permitiu determinar visualmente a capacidade de preenchimento do concreto.

O aparato, composto de material não reativo e não absorvente aos constituintes do CAA, é formado pelos compartimentos horizontal e vertical e uma

grade construída com duas ou três barras de aço de 12,5 mm equidistantes entre si. A caixa empregada neste trabalho e sua projeção lateral, sendo que o equipamento possui 200 mm de largura e comprimento total de 700 mm. Para a execução do ensaio, aproximadamente são vertidos na câmara vertical sem adensamento, devendo-se aguardar 60s após o término do preenchimento. Em seguida, a comporta é aberta de modo a possibilitar o escoamento uniforme do material pelo compartimento horizontal. Então, concluído o escoamento, determinam-se as alturas inicial (H_1) e final (H_2) em milímetros, e efetua-se a relação H_2/H_1 , resultado que indica a habilidade passante do CAA NBR 15823-4:2017.

Outro indicativo do teste é quanto à concentração de agregado graúdo ao redor das barras de aço, destacando a falta de coesão e a baixa resistência ao bloqueio do concreto como demonstra a Figura 11. Isso significa que o CAA apresenta viscosidade inadequada, teor inferior de argamassa e agregados com dimensões superiores ao recomendável. Além disso, se a brita não acompanhar a movimentação da argamassa do CAA e indício da ocorrência de segregação do concreto (REPETTE, 2011).

Figura 11 – Equipamento empregado projeção lateral, com dimensões em milímetros e representação das alturas H_1 e H_2 .



Fontes: NBR 15823-4:2017.

Tutikian (2004) expõe, em seu trabalho, uma tabela contendo diversos resultados experimentais encontrados na literatura com as respectivas dimensões do aparato. Como pode ser observado, estão listados os resultados obtidos por diversos autores com as respectivas relações H_2/H_1 e dimensões. Pode-se observar, embora as dimensões sejam diferentes, todos apresentam resultados aproximados iguais ou próximos de 0,80 para a relação H_2/H_1 (Quadro 3).

Quadro 3 – Resultados e dimensões de aparato para o ensaio de caixa-L.

Referência	H2/H1	Dimensões (mm)				
		A	B	C	D	E
Petersson (1998 e 1999)	0,80	100	200	600	700	150
Tviksta (2000)	0,85	100	200	600		150
Coppola (2000)	0,90	120	300	600	780	150
Gomes (2002)	0,80	100	200	600	700	150
Gomes <i>et al.</i> (2003)	0,80	100	200	600	700	150
EFNARC (2005) *	0,80	100	200	600	700	150
Melo (2005) *	0,80	100	200	600	800	150

Fonte: Tutikian, 2004.

2.6.4 Determinação da habilidade J-rinj test

Utilizar apenas os resultados obtidos no ensaio de espalhamento não é suficiente para avaliar a habilidade de o CAA passar entre as armaduras, por isso foi desenvolvido o ensaio do Anel J (J-ring test), que é um complemento dos ensaios de espalhamento. Ele consiste em verificar se o concreto sob força provocada pelo seu peso próprio é capaz de passar por obstáculos (barras de aço, passagens para tubulações) até atingir uma determinada dimensão. Sua principal função é medir a capacidade de fluidez do CAA e sua habilidade de passar por obstáculos. Também é possível visualizar a segregação da mistura pois, uma vez que, ao passar pelo anel, não deve acontecer segregação (TUTIKIAN, 2004).

De acordo com a NBR 15823-3:2017, além dos equipamentos utilizados no ensaio Slump flow test (Molde, placa da base, régua metálica, recipiente, complemento tronco-cônico e colher de pedreiro) também deve ser utilizado o seguinte equipamento:

Anel J metálico, com 300 mm de diâmetro e 120 mm de altura, constituído verticalmente por barras de aço de 100 mm de diâmetro a cada (58 ± 2) mm.

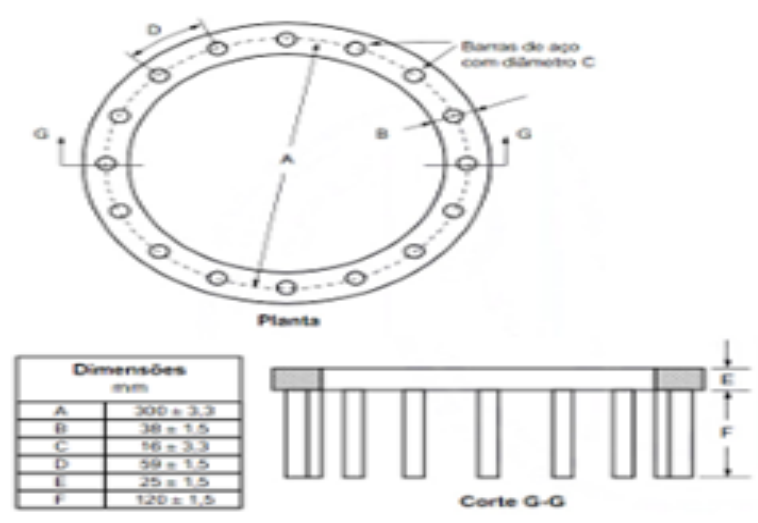
A NBR 15823-3:2017, descreve os seguintes procedimentos para calcular o resultado do ensaio:

- O diâmetro final (df), atingido pela massa de concreto, por meio da média aritmética de duas medidas (em milímetros) realizadas em direções perpendiculares;
- Obstrução observada à passagem do concreto pelas barras do anel J;

- A diferença entre o diâmetro médio da massa de concreto obtido no ensaio de espalhamento (sem o anel J) e neste ensaio (com o anel J) é o parâmetro utilizado.

Ao realizar a desmoldagem, tomam-se duas medidas ortogonais entre si do espalhamento formado e calcula-se a média aritmética. A diferença, em milímetros, entre o espalhamento médio obtido no ensaio do slump-flow e o verificado pelo anel J é o resultado medido por este método NBR 15823-3:2017. A Figura 12 apresenta, a dimensão utilizada neste trabalho.

Figura 12 – Anel J com dimensões.



Fonte: NBR 15823-3:2017.

Diniz (2010), descreve os valores, máximos e mínimos, de diversos pesquisadores para o ensaio do anel J (Quadro 4) da diferença de altura entre o concreto imediatamente interior e imediatamente exterior ao anel após o ensaio.

Quadro 4 - Valores de referência para o ensaio do anel J.

Teste do anel J			
Referência	Valor mínimo (mm)	Valor máximo (mm)	Propriedades avaliadas
EFNARC (2002)	0	10	Capacidade de escoamento (habilidade de passagem). Resistência à segregação (coesão).
Gomes (2002)	0	10	
Araújo (2003)	0	10	
Gomes et al. (2003)	0	10	
Tutikian (2007)	0	10	
Gomes e Barros (2009)	0	10	

Fonte: Diniz, 2010.

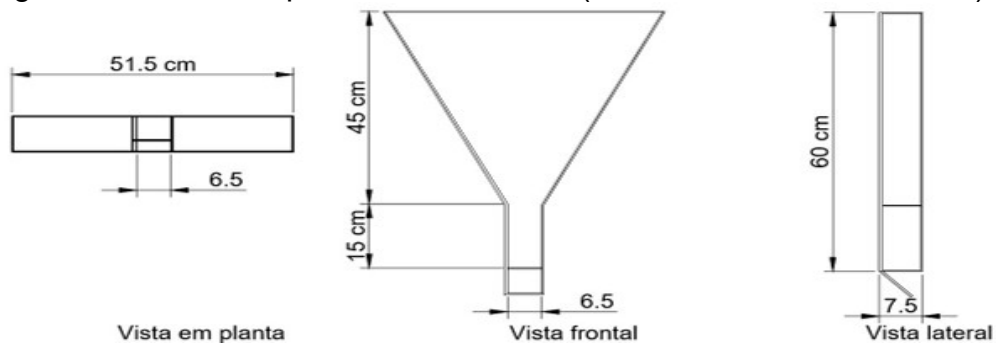
2.6.5 Determinação a viscosidade plástica aparente funil V

Preconizado pela NBR 15823-5:2017, o ensaio do funil V determina a viscosidade plástica aparente do CAA, propriedade também mensurada, como visto, pelo tempo de escoamento t_{500} durante o espalhamento. No caso do método do funil.

O equipamento em forma de funil pode ser construído em chapa metálica ou em chapa acrílica de maneira a não reagir e absorver os constituintes do CAA e deve apresentar extremidades retangulares. A Figura 15 ilustra o equipamento utilizado e mostra as dimensões do funil. Para a execução do ensaio, o concreto é lançado uniformemente no aparato, com a comporta situada na base fechada, sem sofrer adensamento, devendo-se fazê-lo em até 5 minutos decorridos de sua coleta. Após o limite de 10 segundos do preenchimento completo do funil, realiza-se a abertura da comporta e aciona-se o cronômetro, permitindo o escoamento do CAA em um recipiente colocado sob a base. A contagem do tempo é interrompida quando o operador consegue visualizar, pela primeira vez, o recipiente através do funil. O resultado é registrado em segundos NBR 15823-5:2017.

Outra observação da norma está relacionada a obstruções no momento do fluxo do concreto. Se após a repetição do ensaio a mistura ainda manifestar sinais de bloqueio conclui-se que as evidências da habilidade passante e da viscosidade são insuficientes para caracterizar o concreto como autoadensável (Figura 13).

Figura 13 – vista em planta e vista lateral (dimensões em centímetros).



Fonte: NBR 15823-5:2017.

Diniz (2010), descreve os valores, máximos e mínimos, de diversos pesquisadores (Quadro 5).

Quadro 5 – Valores de referência para o ensaio V-funil.

Teste do Funil V			
Referência	Valor mínimo (segundo)	Valor máximo (segundo)	Propriedade avaliadas
EFNARC (2002)	6	12	Capacidade de preenchimento (fluidez). Capacidade de escoamento (habilidade de passagem). Viscosidade.
Gomes (2002)	10	15	
Araújo (2003)	6	12	
Gomes e Barros (2009)	7	13	
	7	13	
Lisboa (2004)	6	12	
Tutikian (2007)	6	15	

Fonte: Diniz,2010.

2.7 DOSAGEM DO CAA

A dosagem do concreto é um procedimento cuja finalidade é a de obter, ao menor custo possível, misturas capazes de atender aos requisitos mínimos de consistência, resistência e durabilidade (NEVILLE, 1997).

No caso do CAA, esse processo assume maior importância tendo em vista a necessidade de respeitar diversas condições simultaneamente. Os principais aspectos estão relacionados ao estado fresco, como a exigência de garantir alta fluidez e estabilidade, embora o comportamento endurecido deva receber atenção adequada. O controle de qualidade e a dificuldade de manter as características dos materiais constituintes também são fatores responsáveis pela complexidade do proporcionamento do concreto autoadensável (GOMES, 2009).

Para alcançar as principais exigências no estado fresco, a dosagem do concreto autoadensável deve seguir alguns preceitos. A alta deformabilidade, por exemplo, está atrelada àquela da pasta do concreto, comportamento potencializado pelo uso de superplastificantes (KHAYAT, 1999).

Esses aditivos proporcionam a elevada fluidez que somente seria obtida por meio da adição excessiva da água de amassamento, o que traria efeitos negativos à estabilidade, à resistência mecânica e à durabilidade do CAA (REPETTE, 2011).

A relação água/aglomerante (ou água/finos) também influencia, em maior ou menor grau, a deformabilidade do concreto. Se estiver situado abaixo do aceitável

para o CAA, esse fator restringe a capacidade da pasta de cimento de sofrer alterações em sua forma; em proporções elevadas, a mistura pode indicar perda de coesão e segregação dos agregados miúdo e graúdo. É necessário, portanto, adotar a relação mais equilibrada possível para assegurar a deformabilidade com o mínimo de prejuízo à estabilidade do concreto (KHAYAT, 1999).

Outra causa da redução da capacidade de preenchimento do CAA é o atrito entre as partículas dos sólidos existentes na mistura, especialmente entre os agregados. Tal fricção restringe a deformabilidade do concreto pelo acréscimo da resistência interna ao escoamento, cuja extensão aumenta quando o CAA flui entre obstáculos. Por esse motivo, o volume de pasta deve ser elevado o suficiente para ocupar os vazios e cobrir e lubrificar os agregados. Reduzir o consumo de areia e de brita e incorporar adições minerais finas com distribuição granulométrica contínua também são medidas úteis no sentido de limitar o contato intenso entre os grãos (EFNARC, 2005).

A resistência à segregação ou estabilidade do concreto autoadensável deve ser adequada para manter seus sólidos uniformemente distribuídos, com coesão satisfatória. Com esse propósito, a correta dosagem do CAA passa pelo emprego de menor quantidade de brita, pela redução da dimensão máxima característica do agregado e pela maior quantidade de materiais finos (adições), além de, em alguns casos, pela inclusão de VMA no sentido de aumentar sua viscosidade (KHAYAT, 1999).

A partir dos princípios descritos, o CAA apresenta, comparativamente ao concreto convencional vibrado, as seguintes proporções volumétricas dos materiais (Figura 14) e características (GOMES, 2009).

Figura 14 – Comparativo de dosagem entre o CAA e o concreto convencional.

Concreto Autoadensável			Aditivo: Superplastificante	
Ar	Água	Aglomerante	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo
Ar	Água	Aglomerante	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo
Concreto Convencional				

Fonte: Adaptada de Okamura; Ouchi, (2003).

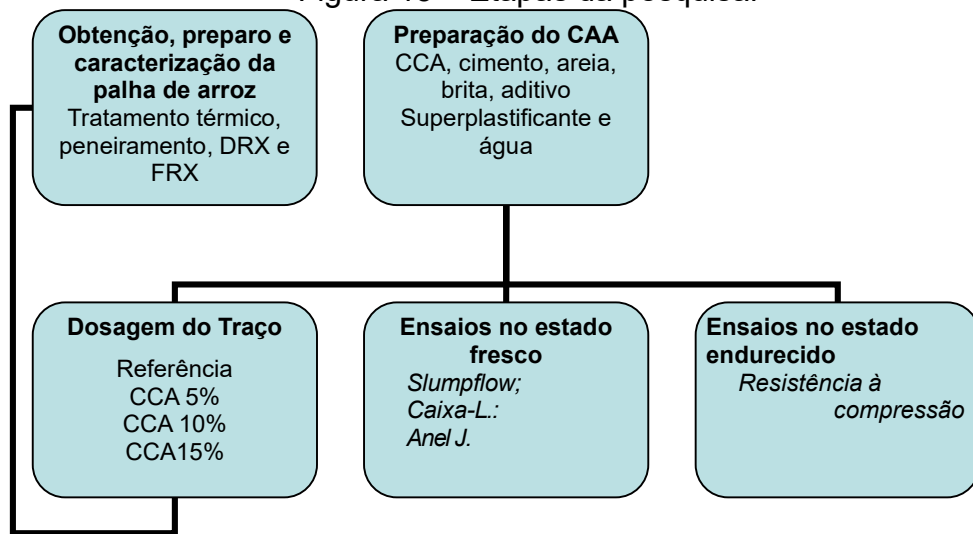
- ✓ Menor volume de agregados;
- ✓ Menor relação água/aglomerante ou água/finos;
- ✓ Maior volume de pasta;
- ✓ Emprego de aditivo superplastificante e
- ✓ Em alguns casos, emprego de aditivo modificador de viscosidade.

Apesar de não haver limitações quanto aos teores dos materiais empregados no CAA, existem recomendações de uso. Normalmente, a faixa de consumo de cimento está situada entre 200 e 450 kg/m³; acima de 500 kg/m³, ressalta-se, podem surgir fissurações em decorrência da retração. Nesse caso, o emprego de adições minerais em substituição ao cimento exerce papel importante no controle do alto calor de hidratação gerado. Já a quantidade dos agregados miúdo e graúdo está entre 710 a 900 kg/m³ e 750 a 920 kg/m³, respectivamente (GOMES; BARROS, 2009).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e o procedimento experimental que avaliou os efeitos da substituição parcial do cimento Portland pela CCA em concretos autoadensáveis. Para tanto, o trabalho consistiu em caracterização dos materiais CCA, preparação do CAA e ensaios, conforme o fluxograma apresentado (Figura 15).

Figura 15 – Etapas da pesquisa.



Fonte: Elaboração da autora (2025).

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Cinza da casca de arroz

A matéria-prima utilizada neste estudo foi a casca de arroz adquirida na empresa Indústria Real de alimentos (Figura 16).

Figura 16 – Casca do arroz e a cinza .



Fonte: Elaboração da autora (2023).

3.1.2 Cimento

O cimento utilizado nessa pesquisa foi o CP V ARI, cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos, que possui as seguintes características: resistência final e inicial mais elevada em relação aos demais tipo de cimento, menor relação água/cimento, melhor desempenho, menor permeabilidade. A apresenta suas características físico-mecânicas (Tabela 4).

Tabela 4 – Características físico-mecânicas.

Propriedade	Resultado obtido		
Área especial	477 m ² /kg		
Massa específica	3,06 g/cm ³		
Tempo de pega	Início 209 min		
	Fim 261 min		
Resistência à compressão	1 dia	30,3	MPa
	3 dias	42,9	MPa
	7 dias	48,6	MPa
	28 dias	54,5	MPa

Fonte: Elaboração da autora (2025).

A escolha pelo cimento de alta resistência inicial se deveu à sua maior área superficial específica comparativamente aos demais tipos existentes no mercado, pois favorece o proporcionamento de concretos autoadensáveis com estabilidade e viscosidade adequadas. Além disso, possui teor mínimo de adições minerais em sua composição até 10% de material carbonático, de acordo com a NBR 16697:2018, o que potencializa a reação pozolânica da sílica da casca de arroz e, consequentemente, a formação de produtos resistentes.

3.1.3 Agregado miúdo

Para a produção dos CAA utilizou-se areia, procedente do município de Teresina/PI. Os procedimentos normativos aplicados para sua caracterização foram: composição granulométrica NBR NM 248:2003, massa específica e massa específica aparente NBR NM 52:2009 e absorção de água NBR NM 30:2001. Como mostra na (Tabela 5).

Tabela 5 – Caracterização do agregado miúdo.

Propriedade	Resultado obtido
Massa específica	2,65 g/cm ³
Massa específica aparente	2,63 g/cm ³
Absorção de água	0,20%

Fonte: Elaboração da autora (2025).

A conforme NBR 7211:2009 apresenta a composição granulométrica do agregado miúdo e sua classificação (Tabela 6).

Tabela 6 – Composição granulométrica da areia.

Abertura da peneira (mm)	Areia natural	
	% retida	% acumulada
4,8	0	0
2,4	1	1
1,2	3	4
0,6	13	18
0,3	44	61
0,15	31	92
Resíduo	8	100
D_{máx.} Característica	1.2 mm	
Módulo de finura	1,76	

Fonte: Elaboração da autora (2025).

3.1.4 Agregado graúdo

O agregado graúdo empregado, proveniente da região de Teresina/PI. Para sua caracterização foi adotada os procedimentos de ensaio conforme as seguintes normas: composição granulométrica ABNT NBR NM 248:2003 e massa específica, massa específica aparente e absorção de água ABNT NBR NM 53:2009. Além da disponibilidade local, a escolha do agregado baseou-se no fato de sua dimensão máxima característica (D_{máx}) reduzir a tendência de bloqueio do concreto quando este escoar entre armaduras e/ou obstáculos (Tabela 8).

Tabela 7 – Caracterização do agregado graúdo.

Propriedade	Resultado obtido
Massa específica	3,01 g/cm ³
Massa específica aparente	2,89 g/cm ³
Absorção de água	1,40%

Fonte: Elaboração da autora (2025).

A Tabela 8 mostra a composição granulométrica do agregado graúdo.

Tabela 8 – Composição granulométrica da brita.

Abertura da peneira (mm)	Brita 0 (zona 4,75/12,5)	
	% retida	% acumulada
12,5	0	0
9,5	1	1
6,3	25	26
4,8	39	65
2,4	26	91
1,2	4	94
0,6	1	96
0,3	4	100
0,15	0	100
Resíduo	0	100

Dmáx. Característica	9,5 mm
Módulo de finura	5,47

Fonte: Elaboração da autora (2025).

3.1.5 Aditivo superplastificante

Foi utilizado um aditivo superplastificante modelo SUPER RX 2300, da marca ADITIBRAS, excelente efeito dispersante e boa trabalhabilidade. Possibilita obtenção de elevadas resistências iniciais e finais (Figura 17).

Figura 17 – Superplastificante SUPER RX 2300.



Fonte: Elaboração da autora (2025).

A inclusão desse tipo de aditivo promove maior fluidez aliado à coesão e à resistência à segregação (Tabela 9).

Tabela 9 – Dados técnicos do aditivo superplastificante.

Propriedade	Resultado obtido
Densidade	1,07 g/cm ³
pH	4,5 +/- 1,0
cor	Castanho
Aspecto	Líquido

Fonte: Elaboração da autora (2025).

3.1.6 Água

A água utilizada tanto para a realização da moldagem quanto a cura dos corpos de prova é proveniente do abastecimento público da empresa Águas de Teresina.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Beneficiamento da casca de arroz

A Cinza da Casca de Arroz (CCA) obtida por queima controlada em forno elétrico da marca Jung de Número 7713, Ano 2023, Modelo LF 10014 no Campus Teresina central no laboratório – PPGEM. A queima foi a 600 °C por duas horas, retirando do forno depois de 24 horas. Em seguida foi passada em peneira ABNT nº 200, abertura da malha 0,074mm. Para remover a porção do material com maior granulometria e a porção do material que não queimou suficientemente (Figura 18).

Figura 18 – Forno no preparo da cinza.



Fonte: Elaboração da autora (2023).

3.2.2 Caracterização química

Para determinar os compostos presentes na CCA, como também estabelecer a concentração em que cada um se encontra na amostra, A técnica de fluorescência de raios-x (FRX) foi utilizada para determinar a composição química.

3.2.3 Caracterização mineralógica

Ao realizar a difração de raios-x, dispersões contendo CCA foram espalhadas em lâminas de vidro para análise. A amostra foi então colocada em um difratômetro que emite um feixe de raios-X que atinge a amostra em vários ângulos. O feixe difratado é registrado em um detector que mede a intensidade dos raios difratados

em função do ângulo de incidência. Esses dados são então processados para obter o padrão de difração.

A CCA foi caracterizada por difração de raios-X que é uma técnica analítica comumente usada para caracterizar a estrutura cristalina de materiais. Essa técnica permite obter informações sobre arranjo dos átomos dentro das nanopartículas e determinar seu tamanho médio, forma e orientação cristalográfica (Figura 19).

Figura 19 – Aparelho de Difração de Raios-x.



Fonte: Elaboração da autora (2023).

A difração de raio X tem por base a Lei de Bragg, pois a partir do ângulo difratado 2θ e comprimento de onda da radiação incidida é possível calcular a distância entre os átomos. A técnica foi realizada com amostra em pó utilizando o modelo XRD Empyrean Series 2- nº 9430 060 03002 no Campus Teresina central no laboratório - PPGEM. O Empyrean é configurado para uma série de experimentos de difração na geometria theta-theta, e opera com uma fonte de raios-x cobalto, com intervalo de varredura (2θ) na faixa de operação de $10-90^\circ$, divergência programável e fendas anti-dispersão, estágio rotador de transmissão de reflexão, estágio capilar, espelho focal de feixe paralelo e trocador de amostras.

3.3 PROGRAMA EXPERIMENTAL CAA

3.3.1 Ensaios em pastas

Tendo em vista a facilidade de execução em laboratório e a menor demanda de material e tempo, os ensaios em pastas fornecem uma resposta rápida da combinação entre os seus constituintes. Para a análise da interação entre o cimento, a CCA e os aditivos foram feitos os ensaios do tempo de pega e mini-slump nas seguintes composições (Quadro 6).

Quadro 6 – Traço das pastas Mini-slump.

Dosagens dos Traços	a/agl.	CCA (g)	Cimento (g)	Aditivo SP %
TR	0,35	0	500	1,10
T1 - 5%	0,35	25	475	1,10
T2 - 10%	0,35	50	450	1,10
T3 - 15%	0,35	75	425	1,10

Fonte: Elaboração da autora (2025).

O consumo de cada material obedeceu a algumas recomendações. A proporção do cimento Portland foi adotada em função da capacidade de homogeneização do misturador mecânico. Por sua vez, as porcentagens de CCA (5%, 10% e 15%) foram baseadas nos estudos em concretos realizados por Gomes e Bertoldo (2016), Mendes (2014) e Sandhu e Siddique (2017), acerca da substituição parcial do cimento (em massa) pela CCA. Já os teores dos aditivos superplastificante, incluídos sobre a massa do aglomerante, foram praticados dentro do intervalo sugerido pelo fabricante. Por fim, a relação água/aglomerante seguiu a orientação de (AİTCIN, 2000).

A preparação das amostras respeitou o método proposto por Aİtcin (2000), destinado ao ensaio do mini-slump. Inicialmente, todos os componentes eram pesados, e os aditivos adicionados e diluídos em água em recipientes diferentes quando empregado o super plastificante. Em seguida, havendo a incorporação de ambos os aglomerantes no traço, ocorria a homogeneização do cimento com a CCA. Então, os materiais eram misturados manualmente por meio de uma espátula durante 1 minuto, sendo que, após esse período, o preparo tinha o auxílio de um

misturador mecânico por mais 2 minutos, tempo suficiente para a obtenção de uma pasta homogênea (Figura 20).

Figura 20 – Agitador mecânico.



Fonte: Elaboração da autora (2025).

3.3.2 Mini-slump

O ensaio do mini-slump foi utilizado com o objetivo de determinar a interação entre o cimento, a sílica da casca de arroz e os aditivos superplastificante, de forma a validar os teores ideais de substituição do cimento pela CCA e a porcentagem de super plastificante para a produção dos concretos autoadensáveis.

Baseado no procedimento de Aïtcin (2000), o ensaio ocorria imediatamente após o término do preparo da pasta. Inicialmente, o molde era posicionado sobre o centro de uma placa de vidro nivelada, plana e lisa, com papel milimetrado. Em seguida, realizava-se a homogeneização manual da mistura com um bastão de vidro durante 15 segundos e, então, a pasta era vertida no minicone. No topo do molde davam-se cerca de 10 batidas antes de levantá-lo rápida e verticalmente. Após a pasta alcançar o estado de repouso, tomavam-se duas medidas ortogonais ao espalhamento formado com o auxílio de um paquímetro e calculava-se a média aritmética em milímetros. Finalmente, a placa era limpa e preparada para a próxima determinação (Figura 21).

Figura 21 – Etapas do ensaio: molde sendo preenchido com a pasta; momento do levantamento do minicone e aferição do diâmetro formado.



Fonte: Elaboração da autora (2025).

3.4 DESENVOLVIMENTO DAS DOSAGENS E PRODUÇÃO DOS CAA

Na etapa anterior foram definidas as porcentagens de sílica da casca de arroz e o teor de superplastificante para o desenvolvimento parcial das composições dos CAA. De forma a prosseguir com a elaboração das dosagens e iniciar, mas uma etapa da pesquisa, analisaram-se quatro trabalhos em âmbito de pesquisa científica, os quais empregaram a CCA como adições pozolânicas. Nesses estudos, foi verificado que os autores adotaram como referência os traços de concreto autoadensável de acordo com a Quadro 7.

Quadro 7 – Traços selecionados para o estudo.

Materiais (kg/m³)	Chopra, Siddique e Kunal (2015)	Dalci (2016)	Kannan e Ganesan (2014)	Rahma (2014)
Cimento	500	351,44	400	540
Cinza volante	-	62,02	-	-
Agregado miúdo	910	1059,52	880	860
Agregado graúdo	590	706,35	800	690
Água	226	180,27	220	205
A/agl	0,41	0,45	0,55	0,38
Aditivo SP	5,50	8,27	8,00	9,72
AditivoVMA (litro)	-	0,254	-	-
Teor argamassa (%)	71,22	67,59	61,54	66,99
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	36,70	34,17	40,70	48,50

Fonte: Autores citados.

A avaliação de tais composições permitiu a definição do intervalo do teor de argamassa (61,54% a 71,22%) dentro do qual as dosagens do CAA deste trabalho deveriam se enquadrar. Como critério de escolha estabeleceu-se que a resistência à compressão aos 28 dias seria igual ou superior a 30 MPa, a relação

água/aglomerante restrita em até 0,55 e o consumo de cimento não inferior a 320 kg/m³ de concreto.

Baseando-se em tais condições, definiu-se a quantidade dos materiais constituintes do concreto partindo do traço unitário em massa 1:2,0:1,8 (cimento:areia:brita), de forma a atender ao teor de argamassa expresso no parágrafo anterior. A proporção de cimento foi encontrada aplicando a Equação 1 abaixo, valendo-se da massa específica de cada componente utilizado.

Por sua vez, a taxa de areia e brita, fixa em todas as composições, cumpriu a recomendação da Efnarc (2005), o miúdo esteve compreendido entre 48% e 55% do peso total dos agregados (chegando a 52,63%) e o gráudo situado na faixa de 750 a 1000 kg/m³.

Os teores de 5%, 10% e 15% de CCA em substituição ao cimento em massa e o consumo de superplastificante (1,30% sobre a massa do aglomerante total, ou seja, cimento +pozolana) foram empregados em função dos resultados obtidos no ensaio do mini slump, detalhados no item 3.3.1. A relação a/agl de 0,49, adotada por tentativas até alcançar o espalhamento do CAA permitido pela norma, e o teor de SP permaneceram iguais nas quatro dosagens para a análise dos efeitos da variação da CCA.

$$C = \frac{1000}{\frac{1}{\gamma_{cp}} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{b}{\gamma_b} + \frac{a/c}{\gamma_{ag}}} \quad (1)$$

Onde:

C = consumo de cimento por m³ de concreto (em kg);

a = consumo de areia (em kg);

b = consumo de brita (em kg);

a/c = relação água/cimento;

γ_{cp} = massa específica do cimento (em kg/dm³);

γ_a = massa específica da areia (em kg/dm³);

γ_b = massa específica da brita (em kg/dm³) e

γ_{ag} = massa específica da água (em kg/dm³).

Obedecendo as premissas descritas, apresenta os traços elaborados (Quadro 8).

Quadro 8 – Traço dos CAA (em kg/m³ de concreto).

Materiais (kg/m³)	Referência (100% CP)	CCA 5 (5% subst.)	CCA 10 (10% subst.)	CCA 15 (15% subst.)
Cimento	461	437,95	414,90	391,85
CCA	-	23,05	46,10	69,15
Agregado miúdo	922	922	922	922
Agregado graúdo	829,80	829,80	829,80	829,80
Água	225,9	225,9	225,9	225,9
Aditivo SP	5,99	5,99	5,99	5,99
Teor argamassa (%)		62,50		

Fonte: Elaboração da autora (2025).

Realizado em um canteiro de obras de uma empresa em Teresina/PI, o procedimento de mistura ocorreu em uma betoneira de eixo inclinado previamente umedecida. A duração total do preparo foi de cerca de 15 minutos, sendo a sequência de introdução dos materiais distribuídos na seguinte ordem:

- agregado graúdo e 70% da água;
- cimento, sílica da casca de arroz (conforme o traço) e 20% da água;
- agregado miúdo;
- Aditivo superplastificante e o volume de água restante.

Após o término da homogeneização, com o CAA coeso, iniciaram-se os ensaios no estado fresco (Figura 22).

Figura 22 – Aspecto visual de um CAA produzido.



Fonte: Elaboração da autora (2025).

3.5 ENSAIOS DO CAA NO ESTADO FRESCO SEGUNDO A ABNT NBR 15823:2017

A NBR 15823:2017 determina um conjunto de ensaios para a averiguação da capacidade de preenchimento (fluidez), viscosidade plástica, habilidade passante e resistência à segregação do CAA. Os métodos empregados para a aceitação do

concreto autoadensável no estado fresco foram: espalhamento, tempo de escoamento t_{500} , anel J, caixa L.

3.5.1 Produção dos corpos de prova

As produções dos corpos de prova foram realizadas de acordo com a NBR15823:2017, específica de concreto autoadensável fresco, onde foi confeccionado quatro corpos de prova para cada traço, para serem rompidos dois em cada idade com o objetivo de representar estatisticamente os resultados a serem alcançados dentro das seguintes idades, 7 e 28 dias (Figura 23).

Figura 23 – Corpos-de-prova moldados.



Fonte: Elaboração da autora (2025).

Para a moldagem dos CP's foram utilizados os cilíndricos de dimensões 10 cm x 20 cm segundo a ABNT NBR 5738/2015, que prescreve o procedimento para moldagem e cura de corpos de prova de concreto utilizados nos ensaios de compressão, neste caso, a moldagem sem vibração ou compactação interna apenas fluindo e após as curas determinadas haverá o rompimento do CAA curado nas idades requeridas. Para diminuir a perda de água da pasta, o topo e a base dos corpos foram cobertos com plástico filme que é um material não reativo e não absorvente (Figura 24).

Figura 24 – Corpos de prova com plástico filme.



Fonte: Elaboração da autora (2025).

Os corpos de-prova foram desmoldados 24 horas após o seu preenchimento. Após a desmoldagem, para minimizar a perda excessiva de água e promover condição mais adequada durante hidratação do cimento, os corpos-de-prova foram colocados em recipiente com água. Com isso, os corpos permaneceram em cura úmida ao longo do armazenamento até as datas dos ensaios de caracterização nas idades de 7 e 28 dias (Figura 25).

Figura 25 – Corpos-de-prova em hidratação.



Fonte: Elaboração da autora (2025).

3.6 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Após a moldagem dos traços determinados e a composição dos corpos de prova nas idades determinadas, passou os CPs na retífica para que fique com uma superfície lisa e sem imperfeições e romper na prensa mecânica de modelo Fortest 01 N/S 4864 no Laboratório de Materiais (Labmat) localizado na rua Prof. Benjamin Carvalho Pedra Mole, Teresina - PI. O ensaio de resistência mecânica à compressão foi realizado conforme as determinações da NBR 5739:2018 (Figura 26).

Figura 26 – Corpos-de-prova na retífica e prensa.



Fonte: Elaboração da autora (2025).

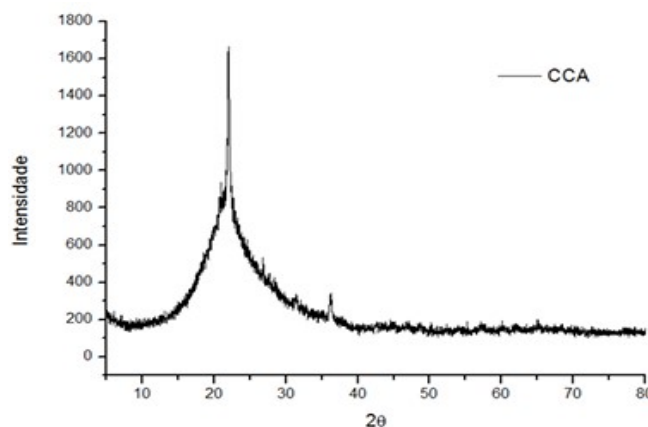
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CINZA DA CASCA DE ARROZ

O espectro de difração de Raios X da CCA, não apresenta, em sua grande maioria, picos muito bem definidos, característica de um material com estrutura mineral interna amorfa. O resultado desse ensaio já era esperado pelo autor, uma vez que a estrutura interna não cristalina da adição mineral é um dos fatores que sugerem a alta reatividade do material.

O pico que está bem definido no espectro, entre os ângulos de 20° e 25° , é referente à ocorrência de sílica sob a forma de α -cristobalita (CORDEIRO, 2006). Em estudos anteriores, Cordeiro (2006) e Collatto et al. (2011) obtiveram resultados semelhantes, ao estudarem a mesma adição mineral (Figura 27).

Figura 27 – Difratoograma de Raios X da CCA.



Fonte: Elaboração da autora (2023).

A composição química da CCA, obtida pela análise semiquantitativa de FRX, destaca a presença predominante de dióxido de silício (cerca de 86%). Resultados semelhantes foram encontrados por Collatto (2011) que analisaram CCA com a composição química parecida com a utilizada nesse estudo.

Essa análise sugere que os teores de Al_2O_3 , Fe_2O_3 e SiO_2 , quando somados, estão acima de 70%, limite inferior da classificação de materiais pozolânicos da norma NBR 12653:2015. De acordo com a (Quadro 9).

Quadro 9 – Composição química da CCA por FRX.

Composição Química	Teor em massa (%)
SiO ₂	Cerca de 86%
Al ₂ O ₃	1% -10%
K ₂ O	1% -10%
CaO	Menor que 1%
P ₂ O ₅	Menor que 1%
MnO	Menor que 1%
Fe ₂ O ₃	Menor que 1%
ZnO	Menor que 1%

Fonte: Elaboração da autora (2023).

4.2 CONCRETO AUTOADENSÁVEL

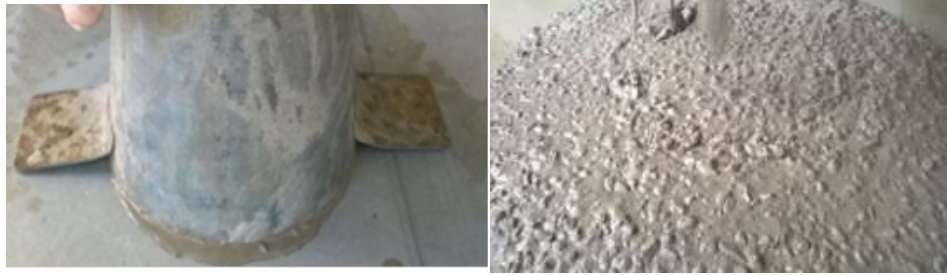
4.2.1 Estado fresco

Sob a condição fresca, os concretos autoadensáveis produzidos passaram pela avaliação das seguintes propriedades: fluidez e índice de estabilidade visual, aferidos por meio do espalhamento NBR 15823-2:2017 habilidade passante, conjuntamente medida pelos métodos do anel J NBR 15823-3:2017 e caixa L NBR 15823-4:2017; e viscosidade plástica aparente, examinada pelos ensaios do tempo de escoamento t₅₀₀ NBR 15823-2:2017 foi realizado em um canteiro de obras em Teresina PI.

4.2.2 Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual (Slump Flow) NBR 15823-2:2017

Normatizado pela NBR 15823-2:2017, este ensaio consiste na avaliação da fluidez do concreto autoadensável, em fluxo livre, sob ação de seu próprio peso e fornece indicações da fluidez do CAA e de sua habilidade de preenchimento em fluxo livre. A mesma norma estabelece o tempo de escoamento t₅₀₀ em segundos, realizado durante o slump-flow e destinado à aferição da viscosidade plástica do CAA mediante a contagem de tempo entre o momento do levantamento do cone de Abrams até o concreto ocupar totalmente a marcação de 500 mm inscrita na placa de base (Figura 28).

Figura 28 – Realização dos ensaios: preparação para o ensaio; momento do levantamento do cone e verificação do espalhamento.



Fonte: Elaboração da autora (2025).

O resultado do ensaio foi obtido pela média aritmética de duas medidas perpendiculares do diâmetro. e o CAA foi classificado conforme a (Quadro 10).

Neste ensaio, primeiramente deve-se umedecer o cone de Abrams e apoiá-lo sobre uma chapa metálica nivelada também umedecida. Então, preenche-se o cone de Abrams com concreto até o topo sem compactação, em seguida, ergue-se o cone verticalmente deixando o concreto fluir livremente sobre a superfície da chapa metálica.

Quadro 10– Resultados do Slump Flow.

Ensaio	Slump Flow
Referência	745 (SF2)
CCA 5%	780 (SF3)
CCA 10%	666 (SF2)
CCA 15%	615 (SF1)
Aceitação NBR 15823:2017	550 a 850

Fonte: Elaboração da autora (2025).

A partir dos resultados apresentados na Quadro 10, observa-se que todos os traços de concreto, apresentaram resultados de espalhamento maiores que 600 mm e menores que 800 mm, por isso se enquadram nas faixas de intervalos apresentados na literatura por diversos autores, portanto todos podem ser considerados concretos autoadensáveis.

Relativamente ao ensaio do slump-flow, para cada traço desenvolvido, é apresentado na Quadro 10, observou-se uma melhoria na fluidez das amostras frente ao CAA sem a pozolana com a incorporação de 5% de CCA. O diâmetro

médio do espalhamento oscilou de 615 mm a 780 mm, intervalo que permitiu classificar os concretos conforme a NBR 15823-1:2017: A CCA15% recebeu a categorização SF1, recomendada para aplicação em lajes e estacas; os CAA's Referência e CCA10% adequaram-se a SF2, apropriada para diversos usos corriqueiros, como vigas, pilares e paredes, e a mistura CCA5% classificou-se em SF3, indicada para pilares e pilares-parede.

Na dissertação de Dalcin (2016), CAA produzidos com 5% a 25% de SCA e adição de 15% de cinza volante sobre a massa do aglomerante apresentaram espalhamentos variando de 645 mm a 680 mm, valores sempre inversos ao teor da pozolana da casca do arroz. Em amostras elaboradas com 30% de SCA e adições como metacaulim e filer calcário, como substitutos ao cimento, mas com consumo diferente dos demais materiais constituintes considerando cada traço, Fonseca (2016) obteve concretos que exigiriam maior teor de superplastificante para atingir um slump-flow semelhante ao CAA referência (780 ± 50 mm).

Na pesquisa de Kannan e Ganesan (2014), concretos autoadensáveis demonstraram redução do espalhamento de 740 mm para 700 mm quando analisado o parâmetro da mistura sem a pozolana comparativamente àquela com 5% de CCA amorfa. Sandhu e Siddique (2017) também verificaram, em inúmeros estudos, a diminuição proporcional do slump-flow do concreto quando do aumento na porcentagem de cinza da casca do arroz amorfa, mesmo utilizada em pequenas quantidades. Neste trabalho, porém, a introdução de 5% de sílica da casca de arroz incrementou a fluidez em aproximadamente 5% (ou 35 mm) em relação ao CAA Referência, modificando a classificação do concreto segundo a norma, como discutido.

Com essas características e mantendo os parâmetros estudados, elevar o consumo de CCA em um teor acima de 15% provocaria um decréscimo da autoadensabilidade do CAA de tal forma que o valor do espalhamento poderia não atender ao limite mínimo de 550 mm proposto pela parte NBR 15823:2017. Diante disso, o incremento de aditivo superplastificante e/ou de água seria uma alternativa para ajustar a fluidez, porém eventualmente traria efeitos negativos à estabilidade e/ou à resistência mecânica das misturas.

A partir da inspeção do espalhamento do CAA foi possível identificar a distribuição da brita e a dispersão da argamassa ao longo do perímetro do círculo

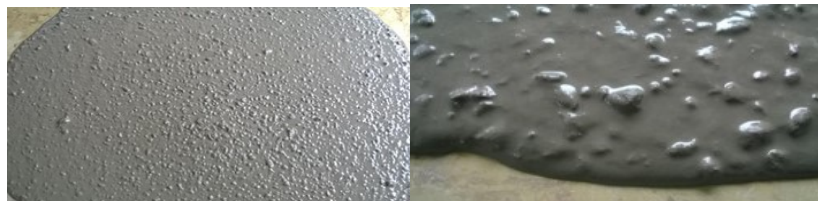
formado, obtendo, desse modo, o índice de estabilidade visual de cada amostra produzida. Tais características são apresentadas nas (Figuras 29 a 32).

Figura 29 – Aspecto do CAA Referência; detalhe das bordas.



Fonte: Elaboração da autora (2025).

Figura 30 – Aspecto do CAA CCA5%; detalhe das bordas.



Fonte: Elaboração da autora (2025).

Figura 31 – Aspecto do CAA CCA10%; detalhe das bordas.



Fonte: Elaboração da autora (2025).

Figura 32 – Aspecto do CAA CCA15%; detalhe das bordas.



Fonte: Elaboração da autora (2025).

Os índices revelaram que, mesmo com diferentes valores de slump-flow, a incorporação de 5%, 10% e 15% de sílica da casca de arroz modificou a estabilidade dos concretos. Sob os critérios qualitativos da ABNT NBR 15823-1 (2017), o CAA Referência (Figura 29).

Safiuddin, West e Soudki (2012) empregaram 5% a 30% de cinza da casca de arroz amorfa em substituição ao cimento (em massa) para a avaliação do aspecto fresco de concretos autoadensáveis. Os traços com a presença da pozolana classificados como estáveis, os quais ficaram livres de exsudação e empilhamento de agregado graúdo, foram aqueles elaborados com relação água/aglomerante de 0,35 e 0,40, nos teores de cinza de 5%, 10%, 15% e 20%. Dessa forma, exceto no caso desta última porcentagem, não adotada no presente trabalho, houve semelhança entre as pesquisas segundo os critérios segregação visual.

4.2.3 Viscosidade plástica aparente sob fluxo livre (t500)

Normalizado pela NBR 15823-2:2017 classe de viscosidade plástica aparente VS 2, todos acima de dois segundos por minutos estando assim dentro do recomendado pela norma. e pode ser utilizado para a maioria das aplicações correntes. Observou-se também que o CAA não apresentou nenhum sinal de segregação (Quadro 11).

Quadro 11 – Resultados do t500 (s).

Ensaio	t500 (s)
Referência	2,0 (VS1)
CCA 5%	2,5(VS2)
CCA 10%	2,8(VS2)
CCA 15%	3,0(VS2)
Aceitação NBR 15823:2017	$VS1 \leq 2 < VS2$

Fonte: Elaboração da autora (2025).

Como mostrado, houve pouca diferença entre o tempo de escoamento dos quatro traços elaborados. A incorporação de sílica da casca de arroz ocasionou um pequeno aumento da viscosidade, constatado pela maior duração do CAA para atingir a marca de 500 mm: as misturas CCA5, CCA10 e CCA15 demoraram, respectivamente, 2,5 s, 2,8 s e 3,0 s, resultados próximos entre si e se comparados ao CAA Referência (2,0 s). De acordo com as diretrizes da NBR 15823-1:2017,

somente o CAA sem a pozolana obteve classificação VS1; as demais composições alcançaram a classe VS2.

O tempo de escoamento t_{500} , determinado durante o ensaio do espalhamento e representado pela contagem decorrida entre o levantamento do cone de Abrams até o CAA ocupar a marcação circular de 500 mm sobre a placa-base, variou de 2,0 a 3,0 segundos. Recomenda-se que tal valor situe entre 2,0 e 5,0 segundos Repette, (2011), pois tempos curtos ou elevados indicam viscosidade inadequada a ponto de afetar a estabilidade ou a fluidez do concreto.

4.2.4 Determinação da habilidade passante (Caixa L) NBR 15823-4:2017

A relação H_2/H_1 , calculada pela determinação das alturas do concreto nas extremidades do compartimento horizontal da caixa, se situou entre 0,80 e 0,87, intervalo que atendeu às exigências da NBR 15823-1:2017. Salienta-se também que não houve concentração de brita ao redor das barras de aço do equipamento, ressaltando o teor adequado de argamassa (62,5%) bem como a coesão dos CAA. À luz dos parâmetros normativos, as quatro composições estudadas classificaram-se como PL2, em função das três barras existentes na caixa utilizada (Quadro 12).

Quadro 12 – Resultados da Caixa L.

Ensaio	Caixa L
Referência	0,85(PL2)
CCA 5%	0,87(PL2)
CCA 10%	0,82(PL2)
CCA 15%	0,80(PL2)
Aceitação NBR 15823:2017	$\geq 0,80$

Fonte: Elaboração da autora (2025).

Segundo Gomes (2006), o concreto só pode ser considerado como autoadensável se $H_2/H_1 = 0,80$ a $0,85$. Já para a Efnarc (2009), $H_2/H_1 = 0,80$ a $1,00$. Analisando-se as Tabelas, observa-se que todos os traços de concreto apresentaram parâmetros de H_2/H_1 maiores que $0,80$; todos podem ser considerados concretos autoadensáveis (Figura 33).

Figura 33 – Escoamento e nivelamento total do concreto.



Fonte: Elaboração da autora (2025).

4.2.5 Determinação da habilidade passante (Anel J) NBR 15823-4:2017

Quanto à avaliação da habilidade passante sob fluxo livre, aferida pelo método do anel J, se obtiveram pela diferença entre a média aritmética do espalhamento sem e com o anel, as quatro dosagens desenvolvidas não exibiram obstrução ou acúmulo de agregado graúdo quando o concreto fluiu ao redor e através das barras de aço do aparato. O valor da característica analisada variou de 15 mm a 49 mm, faixa considerada satisfatória segundo as orientações da NBR 15823-1:2017, mesmo com a alteração na classificação dos CAA conforme o traço (Quadro 13).

Quadro 13 – Resultados do Anel J

Ensaio		Anel J
Referência		49(PJ2)
CCA 5%		31(PJ2)
CCA 10%		28(PJ2)
CCA 15%		15(PJ1)
Aceitação NBR 15823:2017		0 a 50

Fonte: Elaboração da autora (2025).

A sílica da casca de arroz influenciou tal aspecto de acordo com o teor empregado. À medida que houve o incremento da fluidez ao incorporar 5% de CCA frente ao concreto composto somente por cimento, constatado pelo ensaio do slump-flow, ocorreu a redução do resultado observado pelo método do anel J (de 49 mm para 31 mm), ou seja, o CAA com tal porcentagem da pozolana teve a habilidade passante melhorada.

Ademais, essa tendência também se confirmou com a utilização de 10% e 15% da sílica da casca de arroz, apresentando uma distância de espalhamento sem e com o dispositivo de 28 mm e 15 mm, respectivamente, apesar de a fluidez ter decrescido em ambos.

Nestes últimos casos, a menor diferença de abertura pode ser resultante do aumento da viscosidade e da coesão das misturas, permitindo o escoamento mais uniforme do concreto entre as barras de aço. Segundo os critérios da NBR 15823:2017, as dosagens CAA Referência, CCA5% e CA10% pertenceram à classe PJ2, e a mistura CA15% recebeu a categorização PJ1.

4.3 ESTADO ENDURECIDO

4.3.1 Resistência à compressão axial

Neste item são apresentados e discutidos os resultados do estado endurecido dos concretos autoadensáveis, compreendendo as seguintes propriedades: resistência à compressão axial NBR 5739:2018. Para realizar os ensaios a resistência à compressão os corpos de prova foram rompidos aos 7 e 28 dias. Os resultados da resistência à compressão axial média aos 7 dias, considerando as quatro misturas produzidas (Quadro 14).

Quadro 14 – Resultados da resistência à compressão axial em 7 dias.

Traço	Idade (Dias)	Resistência (MPa)
Referência	7	44,60
CCA 5%	7	43,59
CCA 10%	7	40,79
CCA 15%	7	36,50

Fonte: Elaboração da autora (2025).

Relativamente aos dados constatados aos 07 dias, observou-se maior resistência no CAA Referência entre os demais concretos produzidos. De fato, tal aspecto é decorrente de uma propriedade particular do CPV-ARI utilizado: alta finura. Essa característica, superior nesse cimento em relação aos outros tipos disponíveis no mercado, acelera a reação dos grãos do aglomerante com a água e, por esse motivo, confere elevadas resistências mesmo nas primeiras idades de ensaio.

Dessa forma, em razão do provável efeito pozolânico da casca de arroz reagir com o hidróxido de cálcio (CH) gerado pela hidratação do aglomerante e formar silicato de cálcio hidratado (C-S-H), o incremento no teor da pozolana e, portanto, o menor consumo de cimento, causou a redução gradual do parâmetro avaliado. Consequentemente, embora o CAA com 5% de CCA tenha apresentado, nessa idade, média similar ao nível de significância de quando confrontado à mistura sem a sílica, as dosagens com 10% e 15% resultaram em valores abaixo da mistura sem a CCA devido ao efeito pozolânico que acontece a longo prazo.

Os resultados da resistência à compressão axial média aos 28 dias, considerando as quatro misturas produzidas (Quadro 15).

Quadro 15– Resultados da resistência à compressão axial em 28 dias.

Traço	Idade (Dias)	Resistência (MPa)
Referência	28	50,2
CCA 5%	28	54,6
CCA 10%	28	51,7
CCA 15%	28	47,8

Fonte: Elaboração da autora (2025).

O aumento no período de cura para 28 dias, por outro lado, acarretou mudanças no comportamento de tal propriedade dos concretos, de modo que os quatro elaborados superaram o limite mínimo de 30 MPa proposto para este trabalho. Ao contrário da condição observada aos 07 dias, a maior resistência alcançada ocorreu no CAA com 5% de CCA (54,6 MPa), valor próximo ao verificado na mistura CCA10% (51,7 MPa), cuja comparação destes diante do CAA Referência (50,2 MPa) traduziu em melhorias mecânicas. No entanto, apesar do crescimento do parâmetro analisado com a incorporação de 15% de CCA (47,8 MPa), está novamente exibiu a menor resistência à compressão o esperado é que aos 28 dias, as composições com a CCA fossem crescentes por conta do efeito pozolânico a longo prazo, pode ter acontecido essa modificação durante a manipulação desse traço.

Ainda que o tipo e o consumo dos materiais e as metodologias definidas terem se diferenciado, esse comportamento da resistência também se deu na pesquisa realizada por Raisi, Amiri e Davoodi (2018). Os autores conduziram

extenso programa experimental para avaliar o desempenho mecânico de CAA combinando diferentes consumos de cinza da casca de arroz produzida em forno laboratorial e empregada em substituição em massa ao cimento Portland e idades de ensaio. A resistência à compressão média do concreto sem a pozolana e daqueles com os teores de cinza de 5%, 10% e 15% atingiram, aos 28 dias, 53,4 MPa, 57,7 MPa, 54,8 MPa e 50,3 MPa, respectivamente.

5. CONCLUSÃO

A incorporação de adições minerais representa uma medida eficaz para assegurar as propriedades do concreto autoadensável no estado fresco, especialmente aquelas relativas aos critérios de viscosidade, coesão. Do mesmo modo, o emprego de tais materiais, conforme o tipo e o teor adotado, aperfeiçoa a fase endurecida do CAA. Sob essas premissas, este trabalho demonstrou a aplicabilidade da sílica da casca de arroz, resultante da queima controlada da casca do cereal, como substituto parcial do cimento Portland.

Adicionalmente, a elaboração das dosagens dos concretos tanto por meio da definição dos teores ideais da CCA e do aditivo superplastificante pelo ensaio do mini-slump quanto pelo estudo das composições extraídas da literatura se comprovou satisfatória.

Em relação ao estado fresco, a sílica da casca de arroz influenciou as características dos CAA conforme o teor utilizado, sem, contudo, violar as prescrições da ABNT NBR 15823:2017. No ensaio do espalhamento (slump-flow), o consumo de 5% da pozolana conduziu a um aumento da fluidez da mistura perante o do concreto de referência (780 mm x 745 mm), fato resultante, provavelmente, do acúmulo das moléculas do superplastificante sobre uma menor quantidade de cimento.

Em contrapartida, os concretos dosados com 10% e 15% da CCA atingiram, respectivamente, 666 mm e 615 mm, superando tais efeitos descritos, sendo mais uma vez causados pela alta área superficial específica da sílica. Com base nesses resultados, o documento normativo citado recomenda a aplicação das misturas em pilares e pilares-parede (CAA com 5% da sílica), vigas, pilares e paredes (concreto com 10% da pozolana) e lajes e estacas (CAA com 15% de CCA).

Igualmente, a habilidade passante pelo método do anel J modificou-se de modo positivo. Essa mesma propriedade, examinada pela caixa L, também obedeceu aos limites normativos e seguiu o comportamento do espalhamento. A habilidade de passagem da mistura com 5% de CCA demonstrou-se superior comparativamente ao concreto sem a pozolana, perdendo tal melhoria quando adotados os teores de 10% e 15%. Finalmente, a viscosidade plástica, nos ensaios realizados (tempo de escoamento t_{500}), aumentou conforme o acréscimo do consumo da CCA, situando-se dentro das exigências da NBR 15823:2017.

De maneira geral, o concreto formulado com 100% de cimento apresentou os melhores resultados no estado endurecido aos 07 dias, devido às características próprias do aglomerante utilizado (CPV-ARI) e ao tempo insuficiente para a sílica da casca de arroz reagir.

Aos 28 dias, a maior resistência alcançada ocorreu no CAA com 5% de CCA (54,6 MPa), valor próximo ao verificado na mistura CCA10% (51,7 MPa), cuja comparação destes diante do CAA Referência (50,2 MPa) traduziu em melhorias mecânicas. No entanto, apesar do crescimento do parâmetro analisado com a incorporação de 15% de CCA (47,8 MPa), está novamente exibiu a menor resistência à compressão. O esperado era que as composições com a CCA fossem crescentes por conta do efeito pozolânico a longo prazo, pode ter acontecido essa modificação durante a manipulação desse traço.

Diante do exposto, conclui-se ser viável o uso da sílica da casca de arroz na produção de concreto autoadensável, especialmente nos consumos de 5% e 10%, que foram compatíveis com os aditivos empregados e proporcionaram melhor desempenho aos CAA tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

O CAA produzido nesse estudo pode ser utilizado em estruturas com alta taxa de armadura, a fluidez do CAA permite que ele preencha os espaços entre as barras de aço, garantindo uma boa aderência.

Em peças de difícil acesso o CAA pode ser bombeado em fundações de tubulões, estacas ou em paredes de concreto com geometrias complexas.

Além de recuperação e reparo de estruturas danificadas o CAA, pode ser usado como uma ponte de aderência entre o concreto antigo e o novo.

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos neste trabalho foram muito interessantes, porém não foram conclusos em alguns pontos. Por este motivo se recomenda seguir a pesquisa da utilidade da CCA como substituição parcial CAA. Os itens mais importantes são:

Para demonstrar que o estudo desenvolvido é contínuo e possui potencial para futuras pesquisas, sugere-se explorar alguns pontos adicionais.

- Realizar misturas com substituições de CCA superiores a 20%;
- Realizar ensaios mecânicos com idades superiores aos 28 dias para observar a evolução das resistências depois desta idade;
- Avaliar a durabilidade dos concretos estudados em condições de meios agressivos, entre eles ataques por sulfatos e íons cloretos;
- Realizar ensaios dos índices físicos, tais como: absorção capilar, absorção total e porosidade.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 15823-1: **Concreto autoadensável - Parte 1: classificação, controle e recebimento no estado fresco**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/726102478/ABNT-NBR-15823-1-2017>. Acesso em: 22 jul. 2024.
- ABNT NBR 15823-2: **Concreto autoadensável - Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual - Método do cone de Abrams**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/726102478/ABNT-NBR-15823-1-2017>. Acesso em: 22 jul. 2024.
- ABNT NBR 15823-3: **Concreto autoadensável - Parte 3: Determinação da habilidade passante - Método do anel J**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/726102478/ABNT-NBR-15823-1-2017>. Acesso em: 22 jul. 2024.
- ABNT NBR 15823-4: **Concreto autoadensável - Parte 4: Determinação da habilidade passante - Métodos da caixa L e da caixa U**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/726102478/ABNT-NBR-15823-1-2017>. Acesso em: 22 jul. 2024.
- ABNT NBR 15823-5: **Concreto autoadensável - Parte 5: Determinação da viscosidade - Método do funil V**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/726102478/ABNT-NBR-15823-1-2017>. Acesso em: 22 jul. 2024.
- APRIANTI, E. et al. Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes – A review. **Construction and Building Materials**, v. 74, p. 176-187, 2015.
Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061814011507>. Acesso em: 23 jul. 2024
- ASTM C989/C989M**: Especificación Normalizada para Cemento de Escoria para Uso en Concreto y Morteros, 2014.
Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/726102478/ABNT-NBR-15823-1-2017>. Acesso em: 22 jul. 2024.
- AÏTCIN, P.C. **Concreto de alto desempenho**. Tradução: Geraldo G. Serra. São Paulo: Pini, 2000.
Disponível em: https://www.academia.edu/61068032/Materiais_de_Constru%C3%A7%C3%A3o_Civil_II_Concreto_de_Alto_Desempenho. Acesso em: 23 jul. 2024.
- ALCANTARA, M.A.M.; SANTOS, B. V. **O uso de resíduos como finos na fabricação do concreto autoadensável**. In: Simpósio Latino-Americano sobre Concreto Autoadensável, Maceió: IBRACON, 2012.

Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/3cab2e1b-db4c-4013-8c46-6736bfe89ab7/content>. Acesso em: 23 jul. 2024.

ARAÚJO, J. L. **Considerações sobre concreto autoadensável e uma aplicação com materiais locais**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade de Pernambuco, Pernambuco, 2008.

Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/726102478/ABNT-NBR-15823-1-2017>. Acesso em: 25 jul. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – **Quais os tipos de cimento Portland**.

Disponível em: <http://www.abcp.org.br/cms/perguntas-frequentes/quais-sao-os-tipos-de-cimentoportland/>. Acesso em: 19 set. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇO DE CONCRETAGEM (ABESC, 2011). **O concreto autoadensável apresenta grande fluidez e alta trabalhabilidade**.

Disponível em: <http://www.abesc.org.br/tecnologias/concreto-autoadensavel.html>. Acesso em: 20 set. 2024.

Calheiro, D., Fernandes, I. J., Kieling, A. G., Moraes, C. A. M., Kulakowski, M. P., & Brehm, F. A. (2016). **Influência da segregação granulométrica e do emprego de aditivos de moagem na adequação de cinzas de casca de arroz como coproduto**. *Matéria*, 21(2), 270-281.

Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/NL3tZmTDGRgtfctTkdRvY9Q/?lang=pt&format=>. Acesso em: 20 set. 2024.

CHOPRA, D.; SIDDIQUE, R.; KUNAL. Strength, permeability and microstructure of self-compacting concrete containing rice husk ash. **Biosystems Engineering**, v. 30, p. 72-80, 2015.

Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/270449239_Strength_permeability_and_microstructure_of_selfcompacting_concrete_containing_rice_husk_ash. Acesso em: 22 set. 2024.

COLLATTO, D. et al. **Utilização da cinza da casca de arroz na produção de concreto usinado em central**. 53º Congresso Brasileiro do Concreto, 2011. Florianópolis - SC. IBRACON.

Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/xBdfQfDCZTTtpBgSt9yMvdD/>. Acesso em: 22 jun. 2024.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**, Rio de Janeiro, 2006. 2006. Tese (Doutorado) COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Disponível em: <https://www.scielo.br/j/riem/a/65yqKfGWv3Xf97vDwNy96sx/?lang=en/>. Acesso em: 22 jul. 2024.

DE SCHUTTER, G. et al. **Self-compacting concrete**. Dunbeath: Whittles Publishing, 2008. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/686190029/001-003>. Acesso em: 22 set. 2024.

DE LARRARD, F. **Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach**, Modern Concrete Technology Series, vol. 9, E&FN SPON, London, p.421, 1999. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/riem/a/cxXTVJdLscs4cVXxXFGZ6Lz/abstract/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 20 jul. 2024.

DALCIN, J.B. **Avaliação do potencial do uso da sílica de casca de arroz obtida através da queima controlada como substituição parcial ao cimento Portland na produção de concretos autoadensáveis**. 2016. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2016. Disponível em: <https://repositorio.unipampa.edu.br/items/e0a642e3-8067-48b5-bf29-7c7272225f27>. Acesso em: 22 set. 2024.

DAL MOLIN, D.C., Adições Minerais. In: ISAIA, G. C. (Ed). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, p. 290, 2011. Disponível em: https://www.ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/riem/Vol13_n4/RIEM_13_4.pdf. Acesso em: 28 set. 2024.

EFNARC – European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems. **Guidelines for viscosity modifying admixtures for concrete**. In: EFNARC, 2006, 12 p. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/JMQkdbYkyq4r5hPwWshrsFC/>. Acesso em: 20 set. 2024.

EFNARC – European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems. **The European guidelines for self-compacting concrete: specification, production and use**. In: EFNARC, 2005, 68 p. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/YndspbkKfpD4szdg4qw5XSKM/>. Acesso em: 22 ago. 2024.

FOLETTTO, Edson Luiz; HOFFMANN, Ronaldo; HOFFMANN, Rejane Scopel. **APLICABILIDADE DAS CINZAS DA CASCA DE ARROZ**. Web, Santa Maria - RS, p.1-6, 10 abr. 2005. Disponível em: <https://siambiental.ucs.br/congresso/anais/trabalhostecnicos?ano=2018>. Acesso em: 22 set. 2024.

FONSECA, T.V. **Avaliação de concretos autoadensáveis com baixos consumos de cimento incorporando metacaulim, pozolana da casca do arroz, fíler calcário e adição de cal hidratada**. 2016. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/KpjnjsBSJYb4Cd3dh7hSGRq/?lang=pt>. Acesso em: 22 jun. 2024.

GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. **Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete.** *Construction and Building Materials*, v. 22, n. 234, p. 1675-1683, 2008.

Disponível em: <https://www.scielo.br/j/mr/a/WQwDPjnXRBdYqRdJymLgHHg/>. Acesso em: 11 set. 2024.

GOMES, C.E.M.; BERTOLDO, C. Variação da velocidade de propagação de ondas de ultrassom em concretos produzidos com SCA (Sílica da Casca do Arroz). In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 58., 2016, Belo Horizonte. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2016. 11 p.

Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/422419658/Agenda-58CBC2016-pdf>. Acesso em: 15 set. 2024.

GOMES, P.C.C.; BARROS, A.R. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável.** São Paulo: Pini, 2009.

Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/7RMcnxWvCTXZRTjYhg98KBx/>. Acesso em: 22 jul. 2024.

HARTMANN, C. et al. Aditivos químicos para concretos e cimentos. In: ISAIA, G.C. (Org.). **Concreto: ciência e tecnologia.** São Paulo: IBRACON, 2011. v. 1. p. 347-380.

Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/jhzJ6C6T7wX6mgdPj6qh5Nk/>. Acesso em: 28 set. 2024.

HEWLETT, P.; LISKA, M. **Lea's chemistry of cement and concrete.** Butterworth Heinemann, 2019.

Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/vkjHPWv6wQK9Q8FLjNWpPkS/>. Acesso em: 29 ago. 2024.

IACKS, Jonathan Aires. **Uso de cinza de casca de arroz para obtenção de blocos de concreto para pavimentação. 2019. Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil), UFP, Pelotas, Rio Grande do Sul, 2019.

Disponível em: <https://periodicos.ufpel.edu.br/index.php/RBES/article/view/14410>. Acesso em: 12 set. 2024.

ISAIA, Geraldo Cechella et al. (Ed.). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações.** São Paulo: Ibracon, 2005.

Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/QP8mmxDb6j86qQhkbFLL4N/?lang=pt>. Acesso em: 10 jul. 2024.

KANNAN, V.; GANESAN, K. Chloride and chemical resistance of self compacting concrete containing rice husk ash and metakaolin. **Construction and Building Materials**, v. 51, p. 225-234, 2014.

Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/journal/construction-and-building-materials/vol/51/suppl/C>. Acesso em: 22 ago. 2024.

KHAYAT, K.H. Workability, testing, and performance of self-consolidating concrete. **ACI Materials Journal**, v. 96, n. 3, p. 346-353, 1999.

Disponível em: <https://www.scielo.br/j/mr/a/7ydWdWqcYXxMsfTzFJyhhVt/>. Acesso em: 22 out. 2024.

KOLAWOLE, J. T. et al. Blended cement binders containing bamboo leaf ash and ground clay brick waste for sustainable concrete. **Materialia**, v. 15, p. 101045, março 2021.

Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790822001884>. Acesso em: 22 ago. 2024.

LISBÔA, E. M. **Obtenção do concreto autoadensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas.**

Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2004.

Disponível em: <https://www.scielo.br/j/riem/a/VFQvCV9KjLkCVrhQGDryBnH/?lang=pt>. Acesso em: 22 out. 2024.

MANUEL, P. J. M. **Estudo da influência do teor de argamassa no desempenho de concretos autoadensáveis.** 2005. 178p. Dissertação de

Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/8142/000568918.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2024.

MEHTA, P.K. Rice husk ash: **a unique supplementary cementing material.** In: **MALHOTRA, V.M. (Ed.). Advances in concrete technology** Ottawa: Canmet, 1992. p.403-431.

Disponível em: <https://www.scielo.br/j/eagri/a/d9KZ4fHbMkbnWBgCWSWgskp/>. Acesso em: 21 ago. 2024.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto:** microestrutura, propriedades e materiais. 2ª ed. São Paulo: Ibracon, 2014.

Disponível em: <https://pt.scribd.com/doc/316171956/Concreto-Microestrutura-Propriedades-e-Materias-Mehta-e-Paulo-Monteiro-2%C2%AA-Ed-2008-Editora-Ibracon-pdf>. Acesso em: 12 ago. 2024.

MENDES, et al. Durabilidade de concretos com adição de sílica da casca de arroz obtida em leiteo fluidizado à penetração de íons cloretos. In: **CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS**, 1., 2014, Guimarães, Portugal. Anais... Guimarães: Universidade do Minho, 2014. 11 p.

Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/518501453/Bac2015-Book>. Acesso em: 03 ago. 2024.

MORAES, M. J. B. et al. Production of bamboo leaf ash by auto-combustion for pozzolanic and sustainable use in cementitious matrices. **Construction and Building Materials**, v. 208, p. 369–380, maio 2019.

Disponível em: <https://www.phd.eng.br/biblioteca-phd/livros/concreto/>. Acesso em: 22 ago. 2024.

MUTHADHI, A.; KOTHANDARAMAN, S. **Optimum production conditions for reactive rice husk ash** – Material and Structures. V 43, p. 1303-1315, 2010.

Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061822020013>. Acesso em: 22 ago. 2024.

NBR NM 30: agregado miúdo - determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.
Disponível em: <https://pt.scribd.com/doc/232734992/NBR-NM-30-2001-Agregado-Miudo-Determinacao-Da-Absorcao-de-Agua>. Acesso em: 20 jul. 2024.

NBR NM 52: agregado miúdo - determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/688916317/ABNT-NBR-NM-52-2009-Agregado-miudo-Determinacao-da-massa-especifica-e-massa-especifica-aparente>. Acesso em: 22 ago. 2024.

NBR NM 53: agregado graúdo - determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.
Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/541139572/ABNT-NBR-NM-53>. Acesso em: 22 jul. 2024.

NBR NM 248: agregados - determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/213509979/NBR-NM-248>. Acesso em: 22 nov. 2024.

NBR 5738: Concreto. Ensaio de compressão em corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2015.
Disponível em: <https://pt.scribd.com/doc/314511480/NBR-5738-2015-Modelagem-e-Cura-de-Corpos-de-Prova-Cilindricos>. Acesso em: 15 out. 2024.

NBR 5739: concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/583415263/NBR-5739-de-05-2018-Concreto-Ensaio-de-compressao-de-corpos-de-prova-cilindricos-Conforme-a-5738-pdf>. Acesso em: 20 out. 2024.

NBR 7211: agregados para concreto – especificação. Rio de Janeiro, 2009.
Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/670998260/NBR-7211-2009-Agregados-para-concreto-Especificacao>. Acesso em: 22 jul. 2024.

NBR 12653 Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT 2015.
Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/723746720/NBR-12653-Materiais-pozolanicos-Requisitos>. Acesso em: 01 ago. 2024.

NBR 16697: cimento Portland - requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/485871830/NBR-16697-2018-Requisitos-cimento-portland>. Acesso em: 02 ago. 2024.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Concrete technology.** Harlow, England; New York: Prentice Hall, 2010. 448 p.
Disponível em: <https://pt.scribd.com/doc/94048526/Concrete-Technology-2nd-Edition-by-A-M-Neville-and-J-J-Brooks>. Acesso em: 25 out. 2024.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. Tradução: Salvador E. Giammusso. 2.ed. São Paulo: Pini, 1997.
Disponível em: <https://www.scielo.br/j/riem/a/GHZZ6fwJjKd8pR7ZyHDmm3N/>. Acesso em: 02 jul. 2024.

Nunes, S. C. B. **Betão Auto-Compactável: Tecnologia e Propriedades**. 2001. 198p. Pós-graduação em Estruturas de Engenharias Civil – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto.
Disponível em: <https://repositorioaberto.up.pt/bitstream/10216/11114/2/Texto%20integral.pdf>. Acesso em: 25 out. 2024.

PINHEIRO, L. M.; GIONGO, J. S. **Concreto armado: propriedades dos materiais**. São Carlos: EESC-USP, 1986.
Disponível em: <http://repositorio.eesc.usp.br/server/api/core/bitstreams/9ee4780d-37d1-441e-a561-45a1cc11a5a0/content>. Acesso em: 20 out. 2024.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-compacting concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 1, n.1, p. 5-15, 2003.
Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/n7T6N6PC5Cdt7yJ8kcvBVcr/?lang=en>. Acesso em: 26 out. 2024.

PEREZ, D.M. et al. **ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE GRAFENO ATRAVÉS DA CARBONIZAÇÃO DA CINZA DE CASCA DO ARROZ**. p. 1001-1007. In: Anais do XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica. São Paulo: Blucher, 2019.
Disponível em: <https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/anlise-da-producao-de-grafeno-atravs-da-carbonizacao-da-cinza-de-casca-do-arroz-30898>. Acesso em: 20 out. 2024.

POUEY, Maria Tereza Fernandes. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas a produção de cimento composto e/ ou pozolânico**. 2006. 345 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do S, Porto Alegre, 2006.
Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/7733/000554896.pdf?sequence=1>. Acesso em: 05 out. 2024.

RAISI, E.M.; AMIRI, J.V.; DAVOODI, M.R. Mechanical performance of self-compacting concrete incorporating rice husk ash. **Construction and Building Materials**, v. 177, p. 148 157, 2018.
Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/325297073_Mechanical_performance_of_self-compacting_concrete_incorporating_rice_husk_ash. Acesso em: 21 out. 2024.

RÊGO, J. H. S. **As cinzas de casca de arroz (CCAs) amorfa e cristalina como adição mineral ao cimento – Aspectos da microestrutura da pasta**. 2004. 274f. Tese (doutorado) - Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília, Brasília, 2004.
Disponível em: <https://www.confex.org.br/midias/uploads-imce/>. Acesso em: 20 out. 2024.

REPETTE, W. L. Concreto autoadensável. In: ISAIA, G.C. (Org.). **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. v. 2. p. 1769-1806. Disponível em: https://ibracon.org.br/Site_revista/ISMJ/pdf/vol10_n1.pdf. Acesso em: 10 out. 2024.

RONCERO, J. **Effect of superplasticizers on the behavior of concrete in the fresh and hardened states**: implications for high performance concretes. 2000. 208 f. Doctoral Thesis. Escola Técnica Superior Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2000. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/bitstream/tede/4608/2/>. Acesso em: 20 out. 2024.

SAFIUDDIN, Md.; WEST, J.S.; SOUDKI, K.A. Properties of freshly mixed self-consolidating concrete incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material. **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 833-842, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/257389054_Properties_of_freshly_mixed_selfconsolidating_concretes_incorporating_rice_husk_ash_as_a_supplementary_cementing_material. Acesso em: 01 out. 2024.

SANDHU, R.K.; SIDDIQUE, R. Influence of rice husk ash (RHA) on the properties of selfcompacting concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 153, p. 751-764, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S09500618220200>. Acesso em: 03 out. 2024.

SILVA, L. H. P. et al. Bamboo leaf ash for use as mineral addition with Portland cement. **Journal of Building Engineering**, v. 42, p. 102769, outubro 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/5FzScHJWhxsjXctKM4VzgMj/>. Acesso em: 03 out. 2024.

SILVA, C. A. R. **Estudo da influência da incorporação da cinza de casca de arroz no concreto**. Ilha Solteira, 2004. 96f. Dissertação de mestrado - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/4b51b0a1-2509-461c-911f-e707c0bbf769>. Acesso em: 20 ago. 2024.

SILVA, E.J. **Contribuição para utilização de cinzas de casca de arroz na construção civil**. Ilha Solteira, 2009, pp117, Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009. Disponível em: <https://anaisonline.uems.br/index.php/enic/article/download/2233/2132/2721>. Acesso em: 05 out. 2024.

SILVA, M. Gomes. Cimento Portland com adições minerais. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 791-823.

Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/401512093/Indice-pdf>. Acesso em: 08 out. 2024.

TAKADA, K. **Influence of admixtures and mixing efficiency on the properties of self-compacting concrete – The birth of SCC in the Netherlands**. 220p. Tese de Doutorado – Delft University of Technology, The Netherlands, 2004. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/328077864_Passing_Ability_Testing_for_Self-Compacting_Concrete. Acesso em: 06 out. 2024.

TASHIMA, M. M.; FIORITI, C. F.; AKASAKI, J. L.; BERNABEU, J. P.; SOUSA, L. C.; MELGES, J. L. P. **Cinza de casca de arroz (CCA) altamente reativa: método de produção e atividade pozzolânica**. Ambiente Construído, v. 12, n. 2, p. 151-163, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/262512443_High_reactive_rice_husk_ash_RHA_Production_method_and_pozzolanic_reactivity. Acesso em: 20 out. 2024.

TASHIMA, M. M.; SILVA, E. J.; AKASAKI, J. L. **Estudo de Reações Expansivas em Argamassa de Cimento Portland Com Cinza de Casca de Arroz (CCA)**. Holos Environment, v. 7, n.1, p.72-86, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/xBdfQfDCZTTtpBgSt9yMvdD/>. Acesso em: 20 jul. 2024.

TIBONI, Rafaelle. **A utilização da cinza da casca do arroz de termoelétrica como componente do aglomerante de compósitos à base de cimento Portland**. 2007. 196f. Dissertação (mestrado) – Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Disponível em: <https://www.confea.org.br/midias/uploads-imce/>. Acesso em: 10 out. 2024.

TUAN, N. V. et al. **The study of using rice husk ash to produce ultra high-performance concrete**. Construction and Building Materials, v. 25, n. 78, p. 2030- 2035, 2011. Disponível em: <http://www.ijsei.com/papers/ijsei-66517-11.pdf>. Acesso em: 05 out. 2024.

TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concretos autoadensáveis**. 2004. 148p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2004. Disponível em: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/d52.pdf>. Acesso em: 28 out. 2024.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto autoadensável**. São Paulo: Pini, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/ZS3NMqbY7zSG6HhH4nFZHTs/?lang=pt>. Acesso em: 23 out. 2024.

VAN, V.-T.-A. et al. **Rice husk ash as both pozzolanic admixture and internal curing agent in ultra-high performance concrete.** Cement and Concrete Composites, v. 53, n. 12, p. 270-278, 2014.

Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/JQr5ySQxgrQqzctgbDK7hky/?lang=en>. Acesso em: 26 out. 2024.

ZOU, YANPING, YANG, TIANKUI. **Rice Husk, Rice Husk Ash and Their Applications.** In book: Rice Bran and Rice Bran Oil, Cap. 9, p.207-246, 2019.

Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/605075258/Value-Added-Products-of-Rice-Husk-in-Various-Disciplines>. Acesso em: 20 ago. 2024.