

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá

FELIPE ANHOLETI JORGE

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO DE ALTÍSSIMO
DESEMPENHO REFORÇADO COM FIBRAS COM ADIÇÃO DE CINZA DE
CASCA DE ARROZ**

Guaratinguetá

2024



FELIPE ANHOLETI JORGE

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO DE ALTÍSSIMO
DESEMPENHO REFORÇADO COM FIBRAS COM ADIÇÃO DE CINZA DE
CASCA DE ARROZ**

Trabalho de graduação apresentado à
Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Engenharia e Ciências de
Guaratinguetá, para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil

Orientador(a): Profa. Dra. Lisiane Pereira
Prado

Guaratinguetá

2024

J82e	Jorge, Felipe Anholeti Estudo das propriedades mecânicas do concreto de altíssimo desempenho reforçado com fibras com adição de cinza de casca de arroz / Felipe Anholeti Jorge - Guaratinguetá, 2024. 38 f : il. Bibliografia: f. 35-38 Trabalho de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2025. Orientadora: Prof^a. Dr^a. Lisiane Pereira Prado 1. Concreto de alta resistência. 2. Cinza de casca de arroz. 3. Concreto - Testes. I. Título. CDU 691.32
------	---

Luciana Máximo

Bibliotecária/CRB-8 3595

FELIPE ANHOLETI JORGE

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO DE ALTÍSSIMO
DESEMPENHO REFORÇADO COM FIBRAS COM ADIÇÃO DE CINZA DE
CASCA DE ARROZ**

Trabalho de graduação apresentado à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Data da defesa: 14 / 11 / 2024

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 LISIANE PEREIRA PRADO
Data: 02/01/2025 09:39:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dra. Lisiane Pereira Prado
UNESP – Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá

Documento assinado digitalmente
 EMERSON FELIPE FELIX
Data: 02/01/2025 09:52:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Emerson Felipe Félix
UNESP – Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá

Documento assinado digitalmente
 VICTOR ARRUDA FERRAZ DE CAMPOS
Data: 20/12/2024 14:45:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Victor Arruda Ferraz de Campos
UNESP – Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá

AGRADECIMENTOS

Aos meus familiares e amigos, pelo apoio e incentivo ao longo da minha jornada acadêmica e durante o desenvolvimento deste trabalho.

À orientadora desta pesquisa, Prof^a. Dra. Lisiane Pereira Prado, pelos ensinamentos, conselhos e instruções que tornaram possível o desenvolvimento do projeto.

Ao técnico Flávio, pelo apoio e instruções durante a realização dos ensaios em laboratório e a concretagem dos corpos de prova.

Esta pesquisa foi financiada pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (Processo nº 2023/04403-4) e Universidade Estadual Paulista (UNESP) PROPe.

O autor agradece também à ELKEM MATERIALS SOUTH AMERICA LTDA pela doação da microssílica, e à Ekosil pela doação da cinza de casca de arroz (Sílica Verde).

RESUMO

O desenvolvimento e a melhoria de aditivos e adições minerais na dosagem do concreto têm sido essenciais para a evolução deste material, proporcionando avanços notáveis em suas propriedades mecânicas e funcionais. Um exemplo significativo desse progresso é o Concreto de Altíssimo Desempenho com Fibras de Aço (*Ultra-high Performance Fiber Reinforced Concrete* - UHPC), composto, principalmente, por agregados finos, como a areia fina, sílica ativa e pó de quartzo. As propriedades do UHPC destacam-se em relação aos concretos tradicionais, necessitando de um maior teor de cimento e da adição de minerais para alcançar suas características aprimoradas. Nesse cenário, a cinza de casca de arroz (CCA) emerge como uma alternativa sustentável e eficaz, oferecendo uma fonte de adição mineral que contribui para a melhoria das propriedades do concreto. Assim, o presente estudo teve como objetivo avaliar os efeitos da substituição parcial da sílica ativa por cinza de casca de arroz nas propriedades mecânicas de tração, compressão e módulo de elasticidade do UHPC, analisando teores de substituição de 20% e 30%. Os resultados indicaram que a substituição de 20% da sílica ativa por cinza de casca de arroz levou a um aumento nos valores de resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade em comparação ao UHPC sem a adição de CCA.

Palavras-chave: Concreto de altíssimo desempenho; Cinza de casca de arroz; Fibras de aço; Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

The development and improvement of additives and mineral admixtures in concrete mix design have been essential for the evolution of this material, enabling remarkable advancements in its mechanical and functional properties. A significant example of this progress is Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPC), composed primarily of fine aggregates, such as fine sand, silica fume, and quartz powder. The properties of UHPC stand out compared to traditional concretes, requiring a higher cement content and the addition of minerals to achieve its enhanced characteristics. In this context, rice husk ash (RHA) emerges as a sustainable and effective alternative, offering a mineral admixture that contributes to improving the properties of concrete. Thus, the present study aimed to evaluate the effects of partially replacing silica fume with rice husk ash on the mechanical properties of UHPC, including tensile strength, compressive strength, and modulus of elasticity, analyzing replacement levels of 20% and 30%. The results indicated that replacing 20% of silica fume with rice husk ash led to increased compressive strength, tensile strength, and modulus of elasticity compared to UHPC without RHA addition.

Keywords: Ultra-high performance concrete; Rice husk ash; Steel fibers; Mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Metodologia do trabalho	15
Figura 2 – Materiais constituintes do UHPC	16
Figura 3 – Confeção do UHPC com CCA	17
Figura 4 – Ensaio de compressão axial	18
Figura 5 – Ensaio de tração por compressão axial	19
Figura 6 – Ensaio de tração por tração uniaxial	20
Figura 7 – Resistência à compressão axial aos 7 dias	24
Figura 8 – Resistência à compressão axial aos 28 dias	24
Figura 9 – Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias	26
Figura 10 – Dispersão das fibras nos CP's com CCA	27
Figura 11 - Resistência à tração uniaxial aos 28 dias	29
Figura 12 – Módulo de elasticidade tangente médio	30
Figura 13 – Tensão vs deformação média para cada traço	31
Figura 14 – Análise dos resultados da bibliografia vs. experimentais	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Traço referência utilizado para o UHPC	16
Tabela 2 – Corpos de prova moldados para cada ensaio	18
Tabela 3 – Caracterização dos materiais utilizados	21
Tabela 4 – Resistência à compressão axial para a idade de 7 dias para o traço referência	22
Tabela 5 – Resistência à compressão axial para a idade de 7 dias com teor de 20% de CCA	22
Tabela 6 – Resistência à compressão axial para a idade de 7 dias com teor de 30% de CCA	22
Tabela 7 – Resistência à compressão axial para a idade de 28 dias para o traço referência	22
Tabela 8 – Resistência à compressão axial para a idade de 28 dias com teor de 20% de CCA	23
Tabela 9 – Resistência à compressão axial para a idade de 28 dias com teor de 30% de CCA	23
Tabela 10 – Resistência à tração por compressão diametral para a idade de 28 dias para o traço referência	25
Tabela 11 – Resistência à tração por compressão diametral para idade de 28 dias e teor de 20% de CCA	26
Tabela 12 – Resistência à tração por compressão diametral para a idade de 28 dias com teor de 30% de CCA	26
Tabela 13 – Tração uniaxial para idade de 28 dias para o traço com teor de 0% de CCA	28
Tabela 14 – Tração uniaxial para idade de 28 dias para o traço com teor de 20% de CCA	28
Tabela 15 – Tração uniaxial para idade de 28 dias para o traço com teor de 30% de CCA	28
Tabela 16 – Módulo de Elasticidade para idade de 28 dias para o traço referência	29
Tabela 17 – Módulo de Elasticidade para idade de 28 dias para o traço com teor de 20% de CCA	30

Tabela 18 – Módulo de Elasticidade para idade de 28 dias para o traço com teor de 30% de CCA	30
Tabela 19 – Resistência à compressão axial aos 28 dias apresentada na literatura	32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute Committee</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CCA	Cinca da Casca do Arroz
CP	<i>Cimento Portland</i>
CSA	<i>Canadian Standard Association</i>
DRX	Difração de Raios X
JSCE	<i>Japan Society of Civil Engineers</i>
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MET	Microscopia Eletrônica de Transmissão
NBR	Norma Brasileira
UHPC	<i>Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	OBJETIVOS	14
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	15
3.1	ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS MATERIAIS	15
3.2	DOSAGEM E CONFEÇÃO DO UHPC	15
3.3	ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS ..	18
3.3.1	Resistência à compressão axial.....	18
3.3.2	Resistência à tração por compressão diametral.....	19
3.3.3	Resistência à tração uniaxial	19
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	21
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	21
4.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	21
4.3	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	25
4.4	TRAÇÃO UNIAXIAL.....	27
4.5	MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	29
4.6	ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM OS RESULTADOS DA LITERATURA	31
5	CONCLUSÃO	33
	REFERÊNCIAS	35

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento e a introdução de aditivos e adições minerais na composição do concreto permitiram uma evolução significativa desse material ao longo do tempo, levando a melhorias substanciais em suas propriedades mecânicas. Nesse cenário, destaca-se o Concreto de Altíssimo Desempenho com Fibras de Aço (Ultra-high-Performance Fiber Reinforced Concrete - UHPC). O UHPC se diferencia do concreto armado convencional devido sua elevada resistência e durabilidade. Conforme Arora *et al* (2018), o UHPC destaca-se por suas elevadas propriedades mecânicas, como a resistência à compressão. Além disso, a adição de fibras de aço no material contribui para uma distribuição mais uniforme das tensões e evita a ruptura frágil (explosiva) do material (Prado, 2022), aumentando a vida útil das construções. Esses avanços tornam o UHPC uma escolha ideal para aplicações que exigem alta performance e confiabilidade estrutural, como pontes, edifícios altos e outras infraestruturas críticas.

Em relação ao concreto convencional, o Concreto de Altíssimo Desempenho com Fibras de Aço (UHPC) apresenta uma resistência à compressão e à tração significativamente mais alta. A principal diferença na composição do UHPC é a substituição dos agregados graúdos por minerais como pó de quartzo e sílica ativa. Essa formulação, rica em agregados finos, proporciona ao UHPC uma maior impermeabilidade, o que, por sua vez, aumenta a durabilidade do material. Embora contenha apenas agregados finos, o UHPC é classificado como um concreto de altíssimo desempenho com fibras (UHPC ou UHPFRC) devido à presença das fibras de aço. Essas fibras desempenham um papel estrutural comparável ao do concreto armado convencional, oferecendo maior capacidade de absorção de cargas e resistência aprimorada (AÏTCIN, 2008). Tal combinação torna o UHPC um material notável para aplicações com foco na resistência, durabilidade e segurança estrutural.

De acordo com Prado (2020), o aumento da resistência à compressão no UHPC resulta em uma resposta mais frágil e em deformações mínimas para os níveis de resistência atingidos. Para prevenir a ruptura abrupta e assegurar maior ductilidade no UHPC, é comum a utilização de fibras de diferentes dimensões e formatos. É fundamental que essas fibras possuam altos valores de resistência e módulo de elasticidade para funcionarem como pontos de transferência de esforços na estrutura. Nesse cenário, as fibras de aço se destacam como a opção mais adequada para a composição do concreto. No entanto, a quantidade de fibras incorporadas está diretamente relacionada aos requisitos específicos da aplicação estrutural, demandando uma análise metódica para garantir o desempenho esperado do material.

Existem diversas normas que definem os critérios para a classificação do UHPC, incluindo as do American Concrete Institute (ACI) Committee, American Society for Testing and Materials (ASTM) C1856, U.S., e Japan Society of Civil Engineers (JSCE). A maioria dessas normas estabelece que o UHPC deve apresentar uma resistência à compressão superior a 150 MPa e uma resistência à tração acima de 5 MPa (GONG et al., 2022).

Fehling et al. (2012) também define o UHPC como aquele com resistência à compressão superior a 150 MPa. No entanto, diversos estudos indicam que a resistência à compressão média do UHPC varia entre 130 e 140 MPa. Por outro lado, a Canadian Standard Association (CSA, 2014) especifica que a resistência à compressão mínima característica para o UHPC é de 120 MPa, e a resistência à tração mínima característica é de 5 MPa.

Para garantir propriedades mecânicas superiores, a produção de UHPC exige um maior consumo de cimento em comparação com os concretos convencionais, além da incorporação de adições minerais específicas (ARORA et al., 2018). Dentro das adições minerais, as pozolanas naturais têm ganhado destaque, e a cinza de casca de arroz se destaca como uma alternativa particularmente eficiente. Isso pode ser atribuído à sua alta concentração de sílica, que contribui para o aprimoramento da resistência e durabilidade do UHPC. Dessa forma, a sílica, presente na CCA em forma de dióxido de silício (SiO_2) reage com o hidróxido de cálcio (CaO) proveniente da hidratação do cimento, formando silicatos de cálcio hidratados (CSH), que aprimoram a resistência e reduzem a porosidade do concreto.

A inclusão de CCA pode melhorar a performance do concreto, oferecendo uma solução sustentável e econômica para a produção de materiais de alta performance.

O arroz é o cereal mais amplamente consumido globalmente, e durante o seu processo de beneficiamento, a casca é removida e frequentemente descartada como resíduo. A casca de arroz, se não reaproveitada, decompõe-se lentamente no ambiente, o que pode levar a um acúmulo significativo de resíduos ao longo do tempo. Esse acúmulo pode ter consequências ambientais adversas, incluindo a ocupação de espaço em aterros e a liberação de gases de efeito estufa durante a decomposição. A gestão adequada e o reaproveitamento da casca de arroz são, portanto, fundamentais para minimizar seus impactos ambientais e promover a sustentabilidade.

A CCA pode ser classificada como uma adição mineral reativa devido à sua alta atividade pozolânica.

Quando a casca de arroz é queimada sob condições controladas, a cinza resultante possui uma elevada concentração de sílica amorfa, essencial para a reação pozolânica. Essa sílica reage com o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento, formando silicatos de

cálcio hidratados. Esses compostos são responsáveis pelo aumento da resistência e pela redução da porosidade do concreto (Tashima et al., 2012).

Dessa maneira, a atividade pozolânica pode ser compreendida como a capacidade do material de reagir com o hidróxido de cálcio na presença de água, gerando compostos cimentícios que contribuem significativamente para a resistência e a durabilidade de concretos e argamassas. Este processo é fundamental para a melhoria das propriedades do concreto, pois os compostos formados ajudam a preencher os vazios e a reduzir a porosidade, resultando em um material mais robusto e resistente ao desgaste e a condições adversas do meio.

Xu (2012) revelou que a cinza de casca de arroz possui uma microestrutura porosa, uma área superficial específica elevada e um alto teor de nanossílica amorfa, utilizando técnicas modernas de análise, como Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET) e Difração de Raios-X (DRX). A sílica ativa desempenha um papel importante no Concreto de Altíssimo Desempenho com Fibras de Aço (UHPC), contribuindo tanto como preenchimento físico quanto como reativo químico pozolânico.

De acordo, Pereira et al. (2021), a alta atividade pozolânica da Cinza de Casca de Arroz reduz a porosidade e aumenta a resistência mecânica dos materiais em que é incorporada, além de melhorar a durabilidade ao longo do tempo. Dessa forma, a CCA não apenas valoriza um subproduto agrícola, mas também promove avanços significativos na tecnologia da construção civil.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), as cinzas de casca de arroz são predominantemente constituídas por sílica na forma não-cristalina, o que as torna adequadas para uso como adição mineral na produção de concreto de altíssimo desempenho. Em um estudo conduzido por Breugel et al. (2014), foi analisado o uso da Cinza de Casca de Arroz na fabricação de UHPC. Os resultados indicaram que o UHPC contendo CCA alcançou uma resistência à compressão superior a 150 MPa em condições normais de cura. Além disso, amostras com 10% de CCA em substituição à sílica mostraram uma resistência à compressão melhor do que o traço de referência.

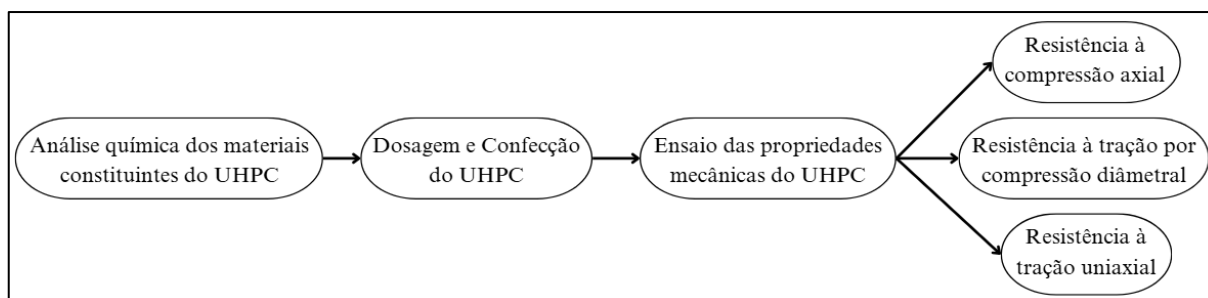
2 OBJETIVOS

Neste contexto, o objetivo geral deste estudo foi examinar os efeitos da substituição parcial da sílica ativa por Cinza de Casca de Arroz nas propriedades mecânicas do Concreto de Altíssimo Desempenho com Fibras. Para isso, foram realizados ensaios de resistência à compressão axial, à tração por compressão diametral e à tração uniaxial. Além do módulo de elasticidade para analisar as deformações do material.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A organização das etapas relacionadas aos materiais e métodos do presente trabalho estão apresentadas na Figura 1.

Figura 1 – Metodologia do trabalho



Fonte: Autoria própria

3.1 ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS MATERIAIS

O traço de UHPC investigado é composto por areia fina industrial, pó de quartzo, fibra de aço, sílica ativa não densificada, cimento CPV e cinza de casca de arroz (quando aplicável).

Para caracterizar os materiais constituintes, foi realizada uma análise da composição química utilizando fluorescência de raios X em um equipamento Axios MAX, da marca PANalytical. A análise semiquantitativa, sem a utilização de padrões, permitiu a determinação dos elementos químicos desde flúor até urânio. Este procedimento foi conduzido no Laboratório de Caracterização Química da Escola de Engenharia de Lorena (EEL-USP). A Cinza de Casca de Arroz empregada tanto na análise química quanto na produção do UHPC foi fornecida pela empresa Ekosil.

3.2 DOSAGEM E CONFECÇÃO DO UHPC

Para a pesquisa, foram estudadas três misturas de UHPC: o traço referência (Traço A), que não inclui adição de CCA; um traço com 20% de substituição da sílica ativa por CCA (Traço B); e um traço com 30% de substituição da sílica ativa por CCA (Traço C). A Tabela 1 detalha a composição do traço referência e dos traços contendo CCA para a produção do UHPC. Esses traços foram preparados para a confecção dos corpos de prova utilizados no estudo, que também

foi analisado por Prado (2020). A tabela 1 apresenta os traços que foram utilizados no presente estudo.

Tabela 1 – Traço referência utilizado para o UHPC

Materiais	UHPC Referência (sem CCA) - Traço A	UHPC com teor de 20% de CCA - Traço B	UHPC com teor de 30% de CCA - Traço C
	Quantidade (kg/m ³)	Quantidade (kg/m ³)	Quantidade (kg/m ³)
Cimento CPV Ultra Rápido Holcim	757,2	757,2	757,2
Areia fina industrial (Módulo de finura 80/100 - Mineração Jundu)	833,0	833,0	833,0
Pó de quartzo (SM 200 Mineração Jundu)	378,6	378,6	378,6
Sílica ativa não densificada (Elkem)	189,3	151,4	132,5
Água	159	159,0	159,0
Superplastificante (ADVA 585) (1,43% massa cimento)	68,2	68,2	68,2
Fibra (2% em volume) importada com comp. de 12,0 mm +/- 10%, diâmetro de 0,2 mm +/- 10%, resistência à tração de 2900 N/mm ² .	157,0	157,0	157,0
Cinza de Casca de Arroz	-	37,9	56,8

Fonte: Autoria própria

A figura 2, ilustra os materiais constituintes do UHPC.

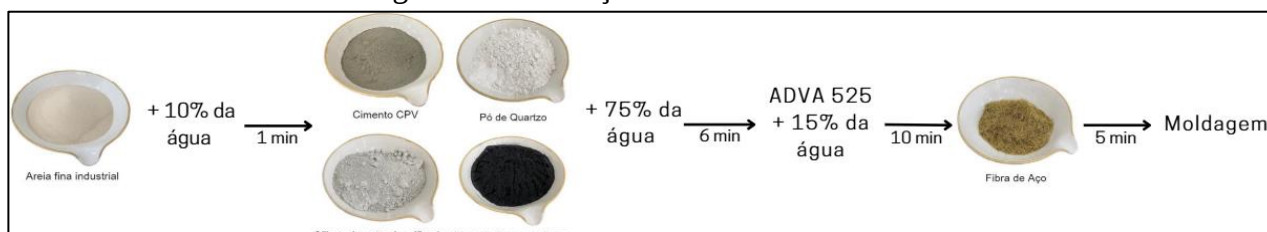
Figura 2 – Materiais constituintes do UHPC



Fonte: Autoria própria

A preparação da mistura de UHPC seguiu o procedimento descrito por Prado (2020) e foi realizada em um misturador de eixo de rotação vertical com capacidade de 5 litros. A Figura 3 apresenta o procedimento:

Figura 3 – Confeção do UHPC com CCA



Fonte: Autoria própria

A preparação da mistura de UHPC foi realizada conforme o método descrito por Prado (2020) em um misturador de eixo de rotação vertical com capacidade de 5 litros. Inicialmente, foi adicionado ao misturador a areia fina industrial e 10% da água total necessária para o umedecimento, realizando a agitação por 1 minuto. Em seguida, foram incorporados o cimento, a sílica ativa, o pó de quartzo, a CCA (quando utilizada) e 75% da água restante, e a mistura foi agitada por mais 5 minutos, totalizando 6 minutos de mistura.

Após esse período, o misturador foi interrompido para a limpeza das bordas e a remoção de qualquer material aderido às paredes, uma vez que o composto ainda estava seco. Com a limpeza concluída, o misturador foi ligado novamente e o aditivo ADVA 525 foi introduzido gradualmente, juntamente com o restante da água. Esta fase de mistura durou 10 minutos, completando um total de 16 minutos de processo.

Finalmente, as fibras de aço foram adicionadas à mistura com o misturador ainda em operação, e a mistura foi agitada por mais 5 minutos, totalizando 21 minutos de mistura desde o início do procedimento.

Após essa etapa, os corpos de prova passaram para a cura úmida em temperatura ambiente. Todos os procedimentos de moldagem e cura seguiram as diretrizes estabelecidas pela ABNT NBR 5738: 2016. A Tabela 2 apresenta a quantidade de corpos de prova moldados para cada ensaio deste estudo.

Tabela 2 – Corpos de prova moldados para cada ensaio

Ensaio de caracterização realizado	Quantidade de corpos de prova moldados	
	7 dias	28 dias
Resistência à compressão axial	3 – 0% de CCA	3 – 0% de CCA
	3 – 20% de CCA	3 – 20% de CCA
	3 – 30% de CCA	3 – 30% de CCA
Resistência à tração por compressão diametral	-	3 – 0% de CCA
	-	3 – 20% de CCA
	-	3 – 30% de CCA
Resistência à tração uniaxial	-	3 – 0% de CCA
	-	2 – 20% de CCA
	-	2 – 30% de CCA

Fonte: Autoria própria

3.3 ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

3.3.1 Resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão axial (Figura 4) foi realizado conforme o indicado pela ABNT NBR 5739:2007, para as idades de 7 e 28 dias.

O teste do corpo de prova se deu através da aplicação de uma tensão de compressão por uma prensa hidráulica. A tensão aplicada foi aumentada de forma constante até a verificação da ruptura e a redução da tensão aplicada pela máquina.

Figura 4 – Ensaio de compressão axial



Fonte: Autoria própria

3.3.2 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão (Figura 5) foi realizado conforme o indicado pela ABNT NBR 7222:2011, para a idade de 28 dias.

O teste do corpo de prova se deu através da aplicação de uma tensão de compressão no diâmetro do corpo de prova, por uma prensa hidráulica. A tensão aplicada foi aumentada de forma constante até a verificação da ruptura e a redução da tensão aplicada pela máquina.

Figura 5 – Ensaio de tração por compressão axial

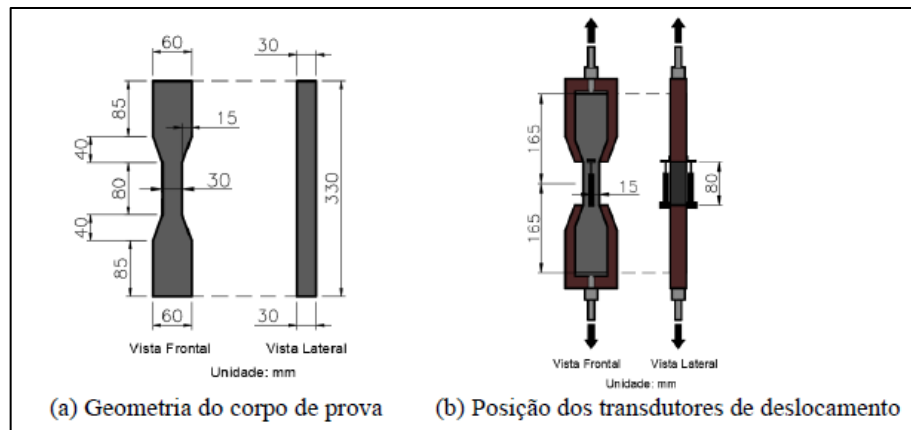


Fonte: Autoria própria

3.3.3 Resistência à tração uniaxial

A resistência à tração uniaxial foi avaliada através da aplicação de uma força contínua no corpo de prova, cuja geometria está indicada na Figura 6-a, com controle de deslocamento constante, adaptada de Su-Tae Kang (2016). Para a medição dos deslocamentos verticais serão utilizados transdutores de deslocamento, com comprimento inicial de 80,00 mm (Figura 6-b)

Figura 6 – Ensaio de tração por tração uniaxial



Fonte: Adaptado de Prado (2022)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos para a caracterização, através da fluorescência de raios X, dos materiais constituintes do UHPC.

Tabela 3 – Caracterização dos materiais utilizados (Laboratório de Caracterização Química da Escola de Engenharia de Lorena (EEL-USP)).

Microsílica		Sílica Casca de Arroz		Quartzo		Cimento CPV	
Al₂O₃	0,12 %	Al₂O₃	0,07 %	Al₂O₃	0,23 %	Al₂O₃	5,27 %
Br	0,07 %	Br	0,05 %	Br	0,05 %	Br	0,08 %
CaO	0,27 %	CaO	0,55 %	CaO	0,06 %	CaO	58,85 %
Cl	0,53 %	Cl	-	Cl	0,18 %	Cl	-
Fe₂O₃	0,16 %	Fe₂O₃	0,26 %	Fe₂O₃	0,18 %	Fe₂O₃	4,2 %
K₂O	0,97 %	K₂O	0,96 %	K₂O	-	K₂O	0,59 %
MgO	0,59 %	MgO	0,49 %	MgO	0,21 %	MgO	1,54 %
MnO	-	MnO	0,48 %	MnO	-	MnO	0,08 %
Na₂O	0,42 %	Na₂O	0,18 %	Na₂O	-	Na₂O	0,79 %
P₂O₅	0,28 %	P₂O₅	0,55 %	P₂O₅	0,06 %	P₂O₅	0,29 %
SiO₂	96,22 %	SiO₂	87,42 %	SiO₂	98,9 %	SiO₂	21,73 %
SO₃	0,37 %	SO₃	0,16 %	SO₃	0,13 %	SO₃	5,95 %
SrO	-	SrO	-	SrO	-	SrO	0,4 %
TiO₂	-	TiO₂	-	TiO₂	-	TiO₂	0,23 %
P.F.	-	P.F.	8,83 %	P.F.	-	P.F.	-

Fonte: Autoria própria

Assim, através da análise da composição química dos constituintes do UHPC, pode-se verificar a predominância do dióxido de silício (SiO₂) na composição da Cinza da Casca do Arroz, de forma semelhante à sílica ativa não densificada (microsílica) comumente utilizada na execução do UHPC. Dado o exposto, é possível inferir que estes materiais possuem composição rica em sílica, de forma permitem que a substituição na elaboração do UHPC sem prejuízo ao concreto.

4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Após a realização dos ensaios de compressão axial nos corpos de prova para as idades de 7 e 28 dias, os resultados foram organizados e distribuídos nas Tabelas 3, 4, 5, 6, 7 e 8.

Tabela 4 – Resistência à compressão axial para a idade de 7 dias para o traço referência

Teor CCA (%)	Cura	Resistência à compressão (MPa)
		105,4
0	Normal	118,2
		122,3
Média (MPa)		115,30
Desvio padrão		7,20
Coeficiente de Variação (%)		6,24

Fonte: Autoria própria

Tabela 5 – Resistência à compressão axial para a idade de 7 dias com teor de 20% de CCA

Teor CCA (%)	Cura	Resistência à compressão (MPa)
		93,9
20	Normal	86,4
		85,6
Média (MPa)		88,64
Desvio padrão		3,76
Coeficiente de Variação (%)		4,24

Fonte: Autoria própria

Tabela 6 – Resistência à compressão axial para a idade de 7 dias com teor de 30% de CCA

Teor CCA (%)	Cura	Resistência à compressão (MPa)
		85,8
30	Normal	90,6
		98,9
Média – Cura normal (MPa)		91,78
Desvio padrão – Cura normal		5,41
Coeficiente de Variação – Cura normal (%)		5,90

Fonte: Autoria própria

Tabela 7 – Resistência à compressão axial para a idade de 28 dias para o traço referência

Teor CCA (%)	Cura	Resistência à compressão (MPa)
		129,5
0	Normal	128,8
		131,0
Média (MPa)		129,77
Desvio padrão		0,92
Coeficiente de Variação (%)		0,71

Fonte: Autoria própria

Tabela 8 – Resistência à compressão axial para a idade de 28 dias com teor de 20% de CCA

Teor CCA (%)	Cura	Resistência à compressão (MPa)
20	Normal	136,7
		133,8
		141,4
		137,30
	Média (MPa)	137,30
	Desvio padrão	3,14
	Coeficiente de Variação (%)	2,29

Fonte: Autoria própria

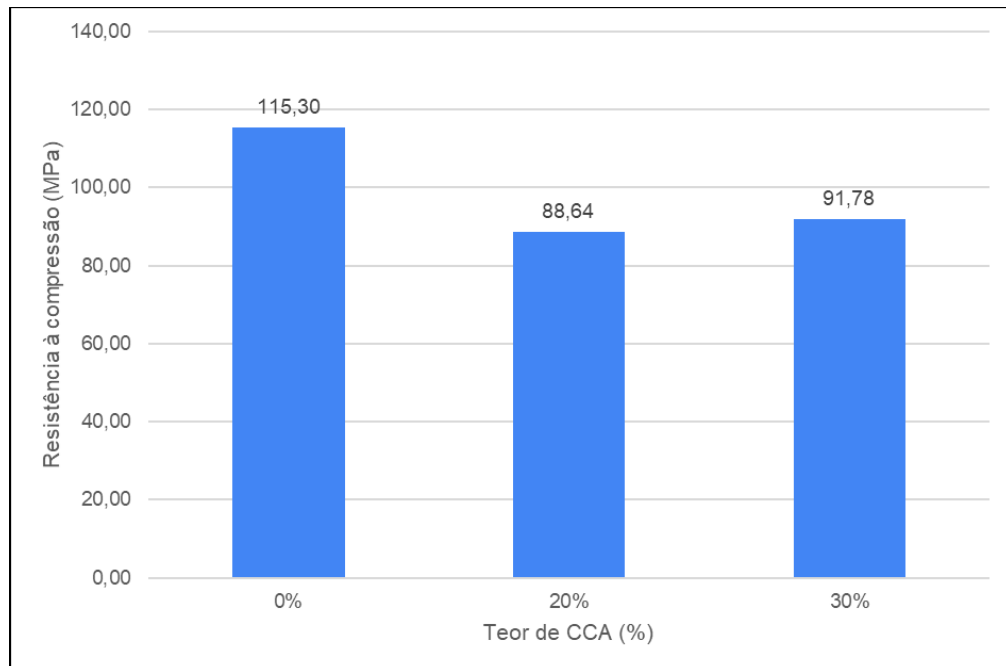
Tabela 9 – Resistência à compressão axial para a idade de 28 dias com teor de 30% de CCA

Teor CCA (%)	Cura	Resistência à compressão (MPa)
30	Normal	129,3
		136,2
		123,6
		129,70
	Média (MPa)	129,70
	Desvio padrão	5,15
	Coeficiente de Variação (%)	3,97

Fonte: Autoria própria

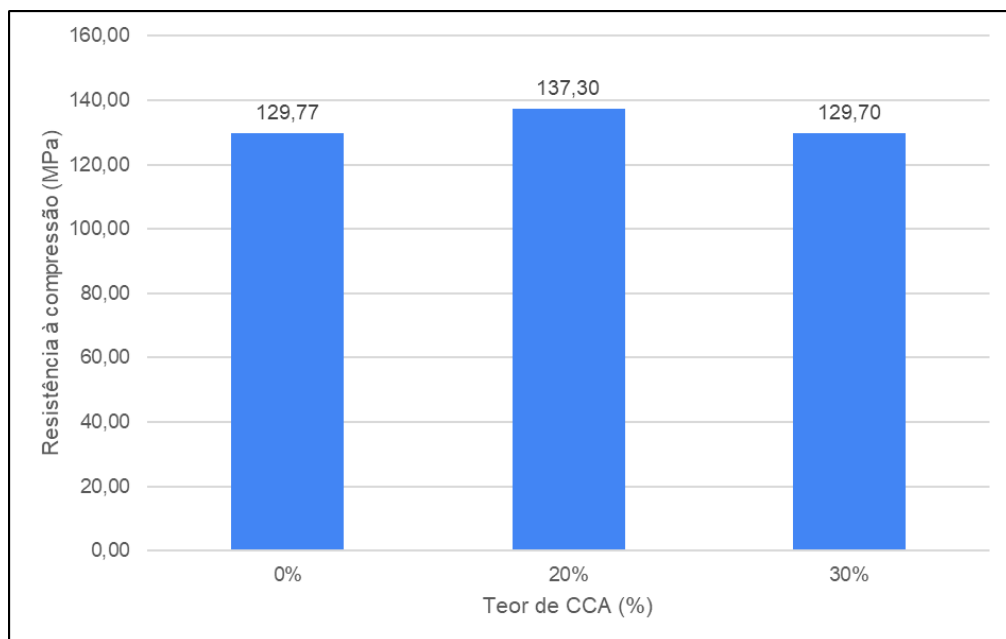
As Figuras 7 e 8 abaixo demonstram os resultados obtidos para a resistência à compressão do UHPC para o traço referência, com teor de 0% de substituição, e para os traços com adição de CCA, aos 7 e 28 dias.

Figura 7 – Resistência à compressão axial aos 7 dias



Fonte: Autoria própria

Figura 8 – Resistência à compressão axial aos 28 dias



Fonte: Autoria própria

Dessa forma, observa-se que, aos 7 dias, o UHPC sem a adição de CCA apresentou maior resistência à compressão em comparação às misturas que continham CCA.

Além disso, as amostras contendo CCA apresentaram resistências à compressão bastante semelhantes entre si. Entretanto, aos 28 dias, a resistência à compressão do UHPC com CCA

apresentou um aumento, indicando um comportamento consistente e eficiente da adição de CCA ao longo do tempo.

Dessa maneira, aos 28 dias, verifica-se um aumento de 6% na resistência à compressão axial quando se utilizou 20% de CCA em comparação ao UHPC sem essa adição. Contudo, não foi registrado um aumento significativo na resistência à compressão axial ao se elevar o teor de CCA de 20% para 30%. Ainda, pode-se destacar que o UHPC com 20% de substituição por CCA apresentou desempenho superior em termos de resistência à compressão em relação ao UHPC com 30% de substituição.

Nesse sentido, o aumento na resistência à compressão das misturas com adição de CCA aos 28 dias pode ser atribuído à absorção e ao início da atividade pozolânica da sílica amorfa presente na CCA, que foi incorporada à mistura. Esse período de 28 dias reflete o tempo necessário para a ação efetiva da sílica da CCA na matriz do UHPC.

Durante esse tempo, podem ocorrer as reações pozolânicas, fundamentais para o desenvolvimento de uma microestrutura mais densa e resistente, resultando em um ganho expressivo na resistência mecânica.

4.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Após a realização dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias, os resultados foram organizados e apresentados nas Tabelas 9, 10 e 11. A distribuição dos dados considerou o teor de CCA presente nos corpos de prova e o tipo de cura aplicado durante o período de 28 dias. Essas tabelas permitem a análise dos efeitos dessas variáveis na resistência à tração por compressão diametral, possibilitando a avaliação das influências do teor de CCA sobre o comportamento mecânico dos materiais analisados.

Tabela 10 – Resistência à tração por compressão diametral para a idade de 28 dias para o traço referência

Teor CCA (%)	Cura	Resultado (MPa)
0	Normal	18,2
		17,1
		13,3
		16,22
Média (MPa)		16,22
Desvio padrão		2,10
Coeficiente de Variação (%)		12,93

Fonte: Autoria própria

Tabela 11 – Resistência à tração por compressão diametral para idade de 28 dias e teor de 20% de CCA

Teor CCA (%)	Cura	Resultado (MPa)
20	Normal	19,9
		18,3
		20,5
		19,56
		0,93
		4,76

Fonte: Autoria própria

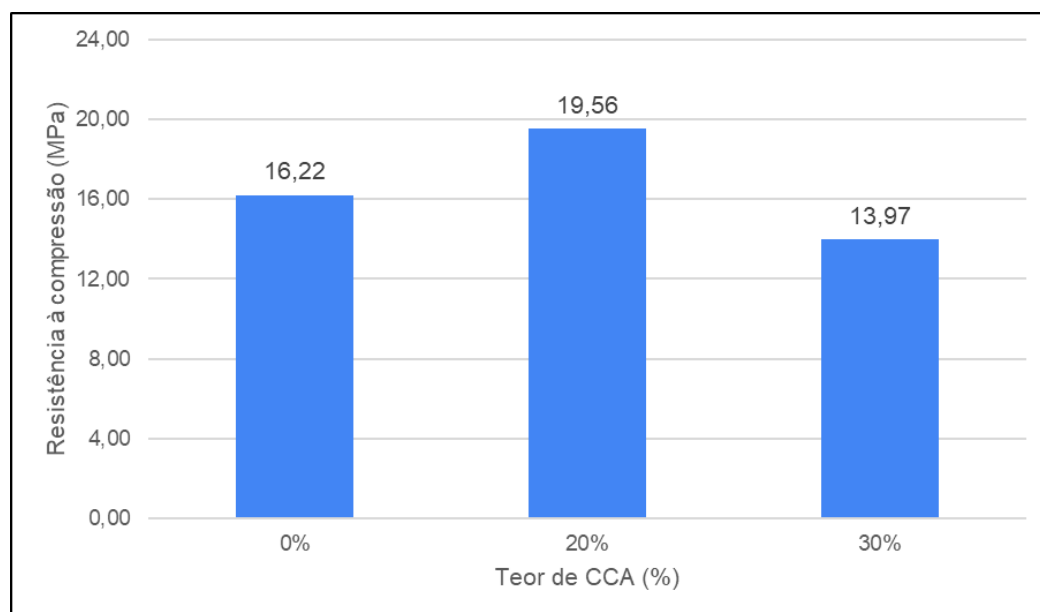
Tabela 12 – Resistência à tração por compressão diametral para a idade de 28 dias com teor de 30% de CCA

Teor CCA (%)	Cura	Resultado (MPa)
30	Normal	15,5
		14,7
		11,7
		13,97
		1,64
		11,75

Fonte: Autoria própria

A Figura 9 apresenta os resultados da resistência à tração por compressão diametral do UHPC de referência e do UHPC com adição de CCA.

Figura 9 – Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias



Fonte: Autoria própria

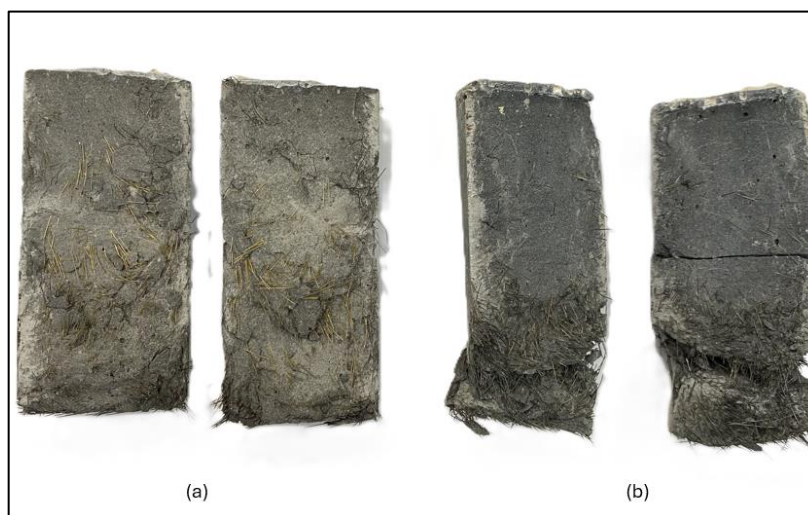
Através do gráfico, pode-se verificar um incremento de 21% na resistência à tração do UHPC com 20% de substituição por CCA em relação ao traço de referência, sem adição de

CCA. De acordo com estudos como o de Jorge et al. (2023), a literatura aponta que o teor de substituição de 20% é o mais eficaz para o incremento da resistência do UHPC.

Por outro lado, as amostras com 30% de substituição por CCA apresentaram um decréscimo de 14% da resistência à tração por compressão diametral em relação à do UHPC de referência, o que sugere que a elevação do teor de CCA além de 20% pode não ser vantajosa para a resistência à tração.

Além disso, durante o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, constatou-se que os corpos de prova com teor de substituição de 30% da sílica ativa pela CCA apresentaram um acúmulo de fibras na parte inferior do CP, diminuindo a resistência à tração da parte superior e, portanto, facilitando a ruptura neste local. A Figura 10 apresenta a dispersão das fibras nos corpos de prova após a ruptura.

Figura 10 – Dispersão das fibras nos CP's com CCA



Fonte: Autoria própria

Através da figura, é possível analisar que o corpo de prova com fator de substituição de 20% (a), apresentou dispersão uniforme das fibras, com ruptura na seção longitudinal bem definida. Nesse sentido, o corpo de prova com fator de substituição de 30% (b), apresentou acúmulo de fibras no fundo, e diversas rupturas na seção transversal.

4.4 TRAÇÃO UNIAXIAL

Após a realização dos ensaios de tração uniaxial nos corpos de prova para a idade de 28 dias, os resultados foram organizados e distribuídos nas Tabelas 13, 14 e 15.

Tabela 13 – Tração uniaxial para idade de 28 dias para o traço com teor de 0% de CCA

Teor CCA (%)	Cura	Tração uniaxial (MPa)	Deformação (mm)
0	Normal	9,7	0,06
		9,9	0,16
		9,9	0,14
Média		9,83	0,12
Desvio padrão		0,09	0,04
Coeficiente de Variação (%)		0,96	36

Fonte: Autoria própria

Tabela 14 – Tração uniaxial para idade de 28 dias para o traço com teor de 20% de CCA

Teor CCA (%)	Cura	Tração uniaxial (MPa)	Deformação (mm)
20	Normal	14,07	0,09
		13,27	0,08
		13,67	0,08
Média		13,67	0,08
Desvio padrão		0,40	0,004
Coeficiente de Variação (%)		2,95	5,25

Fonte: Autoria própria

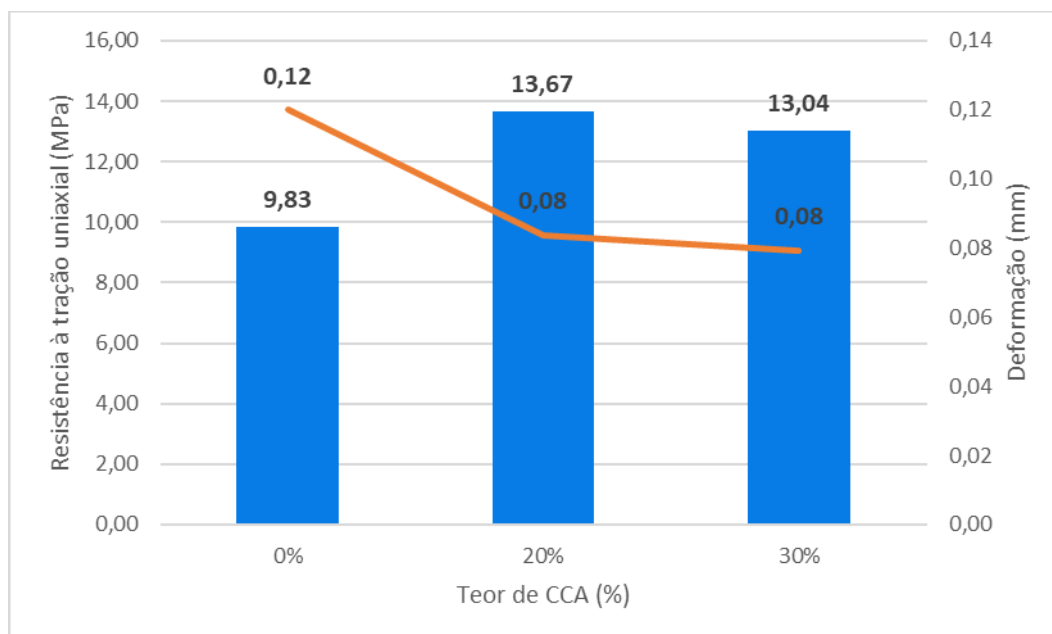
Tabela 15 – Tração uniaxial para idade de 28 dias para o traço com teor de 30% de CCA

Teor CCA (%)	Cura	Tração uniaxial (MPa)	Deformação (mm)
30	Normal	13,78	0,09
		12,28	0,07
		13,04	0,08
Média		13,04	0,08
Desvio padrão		0,75	0,01
Coeficiente de Variação (%)		5,76	9,25

Fonte: Autoria própria

A Figura 11 apresenta os resultados da resistência à tração uniaxial do UHPC de referência e do UHPC com adição de CCA.

Figura 11 – Resistência à tração uniaxial aos 28 dias



Fonte: Autoria própria

Através do gráfico, pode-se verificar um incremento de, aproximadamente 36% na resistência à tração do UHPC com CCA em relação ao traço de referência, sem adição de CCA.

Além disso, foi possível verificar uma redução na deformação do material com a incorporação da CCA, de 33%.

4.5 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Também foram analisados os módulos de elasticidade tangente médios aos 28 dias nos concretos estudados. Os valores obtidos estão apresentados nas Tabelas 16, 17 e 18.

A Figura 11 exibe os resultados do módulo de elasticidade tangente médio para os traços analisados e a Figura 12 mostra a curva tensão de compressão versus deformação média dos corpos de prova.

Tabela 16 – Módulo de Elasticidade para idade de 28 dias para o traço referência

Teor CCA (%)	Cura	Módulo de elasticidade (GPa)
0	Normal	48,38
		47,79
		47,60
		Média (GPa)
		47,96
		Desvio padrão
		0,38
		Coeficiente de Variação (%)
		0,79

Fonte: Autoria própria

Tabela 17 – Módulo de Elasticidade para idade de 28 dias para o traço com teor de 20% de CCA

Teor CCA (%)	Cura	Módulo de elasticidade (GPa)
20	Normal	49,51
		55,65
		54,90
		Média (GPa)
		53,35
		Desvio padrão
		2,73
		Coeficiente de Variação (%)
		5,13

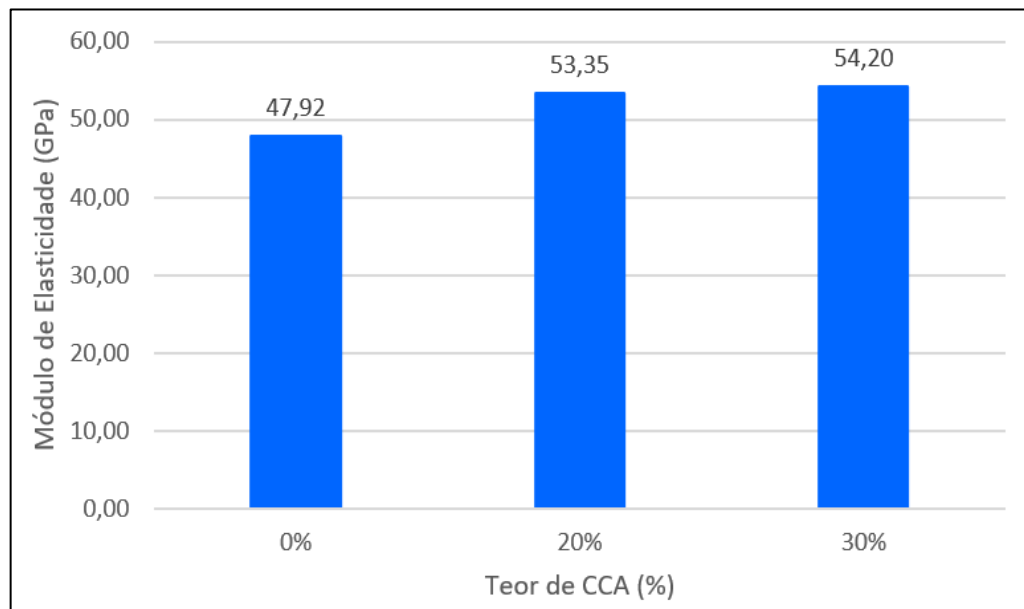
Fonte: Autoria própria

Tabela 18 – Módulo de Elasticidade para idade de 28 dias para o traço com teor de 30% de CCA

Teor CCA (%)	Cura	Módulo de elasticidade (GPa)
30	Normal	54,12
		55,56
		52,92
		Média (GPa)
		54,20
		Desvio padrão
		1,08
		Coeficiente de Variação (%)
		1,99

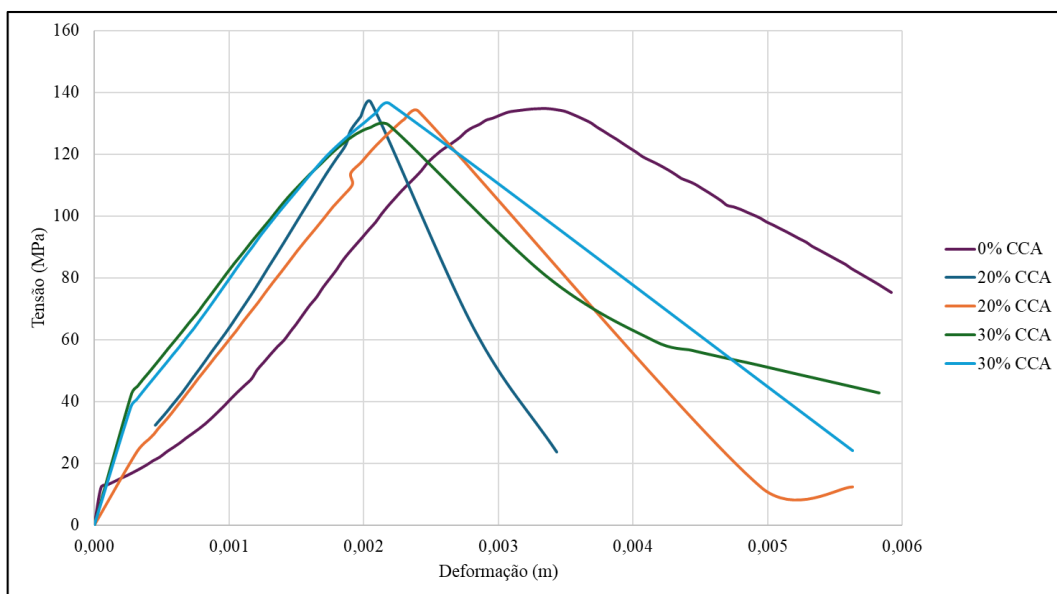
Fonte: Autoria própria

Figura 12 – Módulo de elasticidade tangente médio



Fonte: Autoria própria

Figura 13 – Curvas Tensão vs Deformação



Fonte: Autoria própria

Dessa maneira, a análise dos dados obtidos indica um aumento de aproximadamente 12% no módulo de elasticidade dos concretos com adição de CCA. Além disso, não houve variação significativa do módulo de elasticidade entre os teores de 20% e 30% de substituição do cimento pela CCA

A análise das curvas permite avaliar que a adição de CCA tem influência na deformação do UHPC durante a aplicação da tensão de compressão. Assim, é possível observar que o UHPC com a incorporação da CCA apresenta menor deformação antes da ruptura, se comparado ao traço referência.

Além disso, é possível inferir que os traços com a adição de CCA atingiram deformações similares antes da ruptura do corpo de prova, reforçando a hipótese de que a Cinza da Casca de Arroz pode diminuir a deformabilidade do UHPC. Dessa maneira, pode-se inferir que ambos os traços apresentam uma ruptura bem definida, porém o traço referência apresenta maior deformabilidade, com ruptura menos explosiva.

4.6 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM OS RESULTADOS DA LITERATURA

Para verificar a consistência dos resultados de resistência obtidos, realizou-se um amplo levantamento bibliográfico na literatura nacional e internacional sobre o uso de CCA como substituição parcial da sílica no UHPC. Contudo, foram encontrados poucos estudos sobre o

tema, e a maior parte destes não apresenta informações sobre o módulo de elasticidade e a resistência à tração.

Assim, a Tabela 15 apresenta uma revisão bibliográfica com os dados obtidos dos principais autores que investigaram o UHPC com adição de CCA e a resistência à compressão axial obtida em cada estudo.

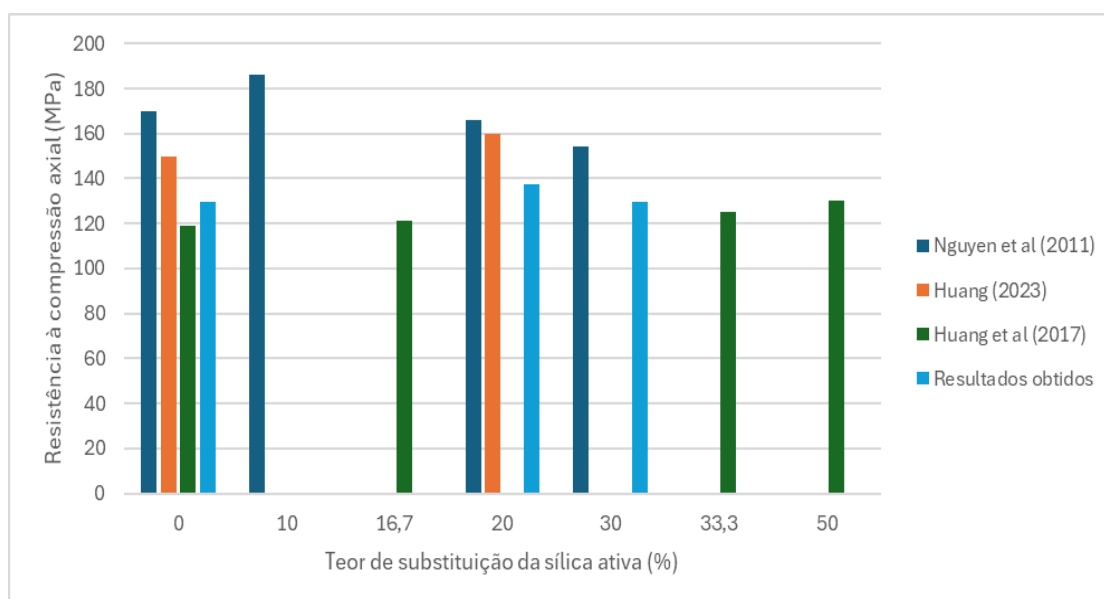
Tabela 19 – Resistência à compressão axial aos 28 dias apresentada na literatura

Autor	Teor de substituição da sílica ativa pela CCA (%)	Resistência à compressão (Mpa)
Nguyen <i>et al.</i> (2011)	0	170
	10	186
	20	166
	30	154
Huang (2023)	0	150
	20	160
Huang <i>et al.</i> (2017)	0	119
	16,7	121
	33,3	125

Fonte: Autoria própria

Na Figura 13, é apresentada uma análise comparativa dos resultados da literatura com os resultados obtidos neste estudo. Observa-se que os resultados experimentais estão em consonância com a literatura, evidenciando o bom desempenho da CCA na composição do UHPC e a reprodutibilidade da análise.

Figura 14 – Análise dos resultados da bibliografia vs. experimental



Fonte: Autoria própria

5 CONCLUSÃO

Dessa forma, pode-se evidenciar que a substituição parcial da sílica ativa pela Cinza de Casca de Arroz no concreto de ultra alto desempenho proporciona melhorias significativas nas propriedades mecânicas, isto é, na resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade. Assim, neste estudo, é possível concluir que a incorporação de CCA demonstrou um impacto positivo substancial na resistência à compressão do UHPC.

Conforme Kang *et al.* (2019), a Cinza da Casca do Arroz possui duas importantes aplicabilidades na produção de concretos: a alta reatividade pozolânica e sua utilização como *filler*, ou seja, o preenchimento dos vazios do concreto.

Nesse sentido, verifica-se que a adição de cinza de casca de arroz exerce uma influência substancial nas propriedades mecânicas do concreto, com destaque para o aumento da resistência à compressão axial. Esse aprimoramento é atribuído à alta atividade pozolânica da CCA, isto é, a reação química entre a sílica com o hidróxido de cálcio liberado durante o processo de hidratação do cimento ou previamente adicionado à mistura. Essa reação resulta na formação de compostos com propriedades cimentantes, contribuindo significativamente para o desenvolvimento de uma microestrutura mais densa e resistente no concreto.

Assim, o destaque das propriedades mecânicas do UHPC com CCA, em relação ao traço controle, corrobora com a hipótese de que a cinza da casca do arroz pode ser utilizada como fonte alternativa de sílica para a produção do Concreto de Ultra Alto Desempenho.

Com base nos resultados apresentados, pode-se inferir que a incorporação de Cinza de Casca de Arroz no Concreto de Altíssimo Desempenho Reforçado com Fibras como substituição da sílica ativa exerce um impacto significativo na resistência após os 28 dias de cura.

Em relação à resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral, verifica-se que o teor de 20% de CCA é o que proporciona o maior incremento nas resistências. Ao comparar com os resultados obtidos para 30% de CCA, nota-se uma variação menos acentuada, o que indica uma tendência de estabilização no ganho de resistência à medida que o teor de CCA é aumentado. Além disso, os resultados do ensaio de tração uniaxial demonstram que o ganho de resistência é maior para o teor de 20% de substituição, porém, nos traços com a incorporação da CCA, também foi possível notar a redução da deformabilidade do material.

Dessa maneira, pode-se inferir que, após o nível de 20%, o aumento da quantidade de CCA não resulta em melhorias expressivas nas propriedades mecânicas do concreto, possivelmente devido à saturação da capacidade reativa da sílica presente na CCA.

Assim, pode-se concluir que o teor ideal de substituição da sílica ativa pela Cinza de Casca de Arroz é de 20%. Com essa substituição, obtém-se um ganho médio de aproximadamente 6% na resistência à compressão aos 28 dias, um aumento de 21% na resistência à tração por compressão diametral, um crescimento de 36% na resistência à tração uniaxial e um incremento de 12% no módulo de elasticidade tangente. Esses resultados reforçam que a adição de 20% de CCA otimiza significativamente as propriedades mecânicas do UHPC, tornando-se uma alternativa eficiente para melhorar o desempenho deste material.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 239R-18**: Ultra-high-performance concrete: an emerging technology report. Farmington Hills, 2018.
- AİTCIN, PC. **Binders for durable and sustainable concrete**. New York: Taylor & Francis e-Library, 2008. *E-book*.
- ARORA, Aashay *et al.* Microstructural packing-and rheology-based binder selection and characterization for ultra-high-performance concrete (UHPC). **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 103, p. 179-190, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Concreto e argamassa – determinação da resistência à tração por compressão diametral por corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto - determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1856/C1856M-17** Standard practice for fabricating and testing specimens of ultra-high performance concrete. West Conshohocken, 2017.
- BARBOSA, M. B. et al. Resistência ao impacto e à abrasão de concreto de alta resistência com cinza de casca de arroz e borracha de pneus. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 6, p. 811-820, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/riem/a/kncqj9nPrrDh4CdTCRtjxKh/?lang=pt&format=html> . Acesso em 10 out. 2024.
- BITTENCOURT, T. N. **Estudo experimental do fraturamento do concreto estrutural por meio de corpos de prova cilíndricos**. 2000. Boletim Técnico. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **CEB-FIP Model Code 1990**. London, 1993.
- CORNELL FRACTURE GROUP. **Franc3D Menu & Dialog Reference**. Ithaca: Cornell University, 1998. *E-book*.
- CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **CSA A23.1-14/A23.2-14**: Concrete materials and methods of concrete construction / test methods and standard practice for concrete. Mississauga, 2014.

FERNANDES, C. A. *et al.* Reforço de pilares de elevado do metrô de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 41., 1999, São Paulo, **Anais [...]**, São Paulo: IBRACON, 1999. Disponível em: <https://www.maubertec.com.br/wp-content/uploads/2019/04/IBRACON-1999-T3.pdf> . Acesso em: 10 out. 2024.

FERREIRA, E. O. *et al.* **Análise das propriedades ligadas à durabilidade dos concretos de ultra alto desempenho confeccionados com microssílica e cinza de casca de arroz.** 2022. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2022. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/29356/1/durabilidadeconcretosaltodesempenho.pdf> . Acesso em 08 ago. 2024.

GUEDES, S. *et al.* Detalhes sobre os ensaios de compressão não confinada e tração por compressão diametral. **Geotecnia**, Lisboa, n. 136, p. 127-142, 2016. Disponível em: <https://impactum-journals.uc.pt/geotecnia/article/view/10387/7562> . Acesso em: 01 nov. 2024.

HASAN, N. M. S. *et al.* Integration of rice husk ash as supplementary cementitious material in the production of sustainable high-strength concrete. **Materials**, Basel, v. 15, n. 22, p. 8171, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/22/8171> Acesso em: 09 set. 2023.

HUANG, H. *et al.* Influence of rice husk ash on strength and permeability of ultra-high-performance concrete. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 149, p. 621-628, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061817310528> . Acesso em: 09 sep. 2023.

HUANG, H. **Mitigating the autogenous shrinkage of ultra-high-performance concrete by using rice husk ash.** 2023. Tese (Doutorado em Materiais e Meio Ambiente) – Delft University of Technology, Delft, 2023. Disponível em: <https://repository.tudelft.nl/record/uuid:f1e3f0a8-9270-4cf6-82af-592e13be7144>. Acesso em: 09 set. 2024

JORGE, F. A. *et al.* Influência da cinza de casca de arroz (CCA) nas propriedades mecânicas do concreto de ultra alto desempenho (UHPC) e concreto de alta resistência (HSC). In: ENCONTRO NACIONAL DE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO, 8., 2023. Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu, Paraná: ENARC, 2023. p. 1–5. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/enarc/article/view/3704>. Acesso em: 25 out. 2024.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Recommendations for design and construction of ultra-high strength fiber reinforced concrete structures (Draft).** 9. ed. Tokio: JSCE, 2004.

KANG, S.; HONG, S.; MOON, J. The use of rice husk ash as reactive filler in ultra-high performance concrete. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 115, p. 389-400, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884618302795> . Acesso em: 01 nov. 2024.

KISHORE, R.; BHIKSHMA, V.; PRAKASH, P. J. Study on strength characteristics of high strength rice husk ash concrete. **Procedia Engineering**, Oxford, v. 14, p. 2666-2672, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705811014123> . Acesso em: 01 nov. 2024.

MOSABERPANAH, M. A.; UMAR, S. A. Utilizing rice husk ash as supplement to cementitious materials on performance of ultra high performance concrete: – A review. **Materials Today Sustainability**, Oxford, v. 7–8, n. 100030, p. 100030, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2589234719300582> . Acesso em: 09 set. 2023.

NEHDI, M.; DUQUETTE, J.; EL DAMATTY, A. Performance of rice husk ash produced using a new technology as a mineral admixture in concrete. **Cement and concrete research**, Elmsford, v. 33, n. 8, p. 1203-1210, 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884603000383> . Acesso em: 09 set. 2023.

NGUYEN, V. T. **Rice husk ash as a mineral admixture for ultra-high-performance concrete**. 2011. Tese (Doutorado em Materiais e Meio Ambiente) – Delft University of Technology, Delft, 2011. Disponível em: https://repository.tudelft.nl/file/File_eae44913-00bd-4276-9110-42ff24d54192?preview=1. Acesso em: 09 set. 2023.

NURSYAMSI, N.; ARUAN, A. F. Application of rice husk ash in high strength concrete. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. Bristol, v. 1122, n. 1, p. 012013, 2021. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1122/1/012013/pdf> . Acesso em: 09 set. 2023.

PEREIRA, A. G. *et al.* Uma revisão sobre a utilização de cinza de casca de arroz na construção civil. **Research, Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 10, n. 3, p. e8610312970, 2021. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/download/12970/11760/171710>. Acesso em: 09 set. 2023.

PRADO, L. P. **Estudo da interface do concreto pré-moldado e concreto de altíssimo desempenho reforçado com fibras**. 2020, Tese (Doutorado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-02052023-151717/en.php> . Acesso em: 09 set. 2023.

RÖßLER, C. *et al.* Rice husk ash as both pozzolanic admixture and internal curing agent in ultra-high-performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 53, p. 270-278, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946514001334> . Acesso em: 09 set. 2023.

SHOAIB ISMAIL, M. *et al.* Effect of rice husk ash on high strength concrete. **Construction and Building Materials**. Guildford, v. 10, n. 7. 1996. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0950061896000104> . Acesso em: 09 set. 2023.

SINGH, P.; SINGH, T.; SINGH, G. To study strength characteristics of concrete with rice husk ash. **Indian Journal of Science and Technology**. Chennai, v. 9. n. 47. 2016. Disponível em: <https://www.academia.edu/download/87986557/76394.pdf> . Acesso em: 09 set. 2023.

SINGH R. R.; SINGH, D. Effect of rice husk ash on compressive strength of concrete. **International Journal of Structural and Civil Engineering Research**, Los Angeles, v. 8, n. 3, p 223-226, 2019. Disponível em: <https://www.ijscer.com/uploadfile/2019/0625/20190625021118313.pdf> . Acesso em: 09 set. 2023.

SHAH, S.P.; SWARTZ, S.E.; OUYANG, C. **Fracture mechanics of concrete** - applications of fracture mechanics to concrete, rock and other quasi-brittle materials. New York: John Wiley & Sons, 1995. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=v63v9KnKVHYC&oi=fnd&pg=PR17&dq=SHAH,+S.P.%3B+SWARTZ,+S.E.%3B+OUYANG,+C.+Fracture+mechanics+of+concrete+-+applications+of+fracture+mechanics+to+concrete,+rock+and+other+quasi-brittle+materials,+New+York,+John+Wiley+%26+Sons,+1995.&ots=NmtOp19Bjr&sig=SvE6Wu56pADkNn4Q9AZ-KybMpVc&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false . Acesso em: 09 set. 2023.

TASHIMA, M. M. *et al.* Cinza de casca de arroz (CCA) altamente reativa: método de produção e atividade pozolânica. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, p. 151-163, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/YfG83NG7mjWNn4YQWy3gVWq/?lang=pt> . Acesso em: 01 nov. 2024.

VAN BREUGEL, K.; GUANG, Y. Analyses of hydration processes and microstructural development of UHPC through numerical simulation. *In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE*, 3., 2004, Kassel, Alemanha. **Proceedings** [...]. Kassel, Alemanha. 2004. p. 253-264. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Lesday-Martinez/publication/271196269_Lime-pozzolan_binder_as_a_very_fine_mineral_admixture_in_concrete/links/54bffe160cf28a6324a03408/Lime-pozzolan-binder-as-a-very-fine-mineral-admixture-in-concrete.pdf#page=269 . Acesso em: 01 nov. 2024.

XU, W.; LO, T.; MEMON, S. A. Microstructure and reactivity of rice husk ash. **Construction and Building Materials**, Guildford, v.9, p. 541–547, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061811006349> . Acesso em: 01 nov. 2024.