

**Análise do módulo de elasticidade de concretos de Pós Reativos contendo Metacaulim, e Cinza de Casca de Arroz****Analysis of the elasticity modulus of Reactive Powders concretes containing metakaolin and rice husk ash**

DOI:10.34115/basrv4n3-108

Recebimento dos originais: 20/04/2020

Aceitação para publicação: 27/06/2020

**Matheus Bittencourt Wilges**

Engenheiro Civil pela Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das missões- Campus Santo Ângelo

Instituição: Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das missões URI- Campus Santo Ângelo

Endereço: Rua Santos Dumont, 24- Centro- Santo Ângelo-RS, Brasil

E-mail: wilgesmatheus@gmail.com

**Bóris Casanova Sokolovicz**

Doutor em engenharia civil pela Universidade Federal de Santa Maria

Instituição: Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das missões URI- Campus Santo Ângelo

Rua Marechal Floriano 922 Apto 101 CEP 98.801-650, Bairro Centro, Santo Ângelo

E-mail: boriscs@san.uri.br

**Alessandro Soardi**

Mestrando em engenharia civil pela Universidade Federal de Santa Maria

Instituição: Universidade Federal de Santa Maria

Travessa Julio Padoin 70 Cep 98803300

E-mail: alessandro.soardi5@gmail.com

**Laura Alpe Coppeti**

Mestranda do Programa de Pós Graduação em Engenharia e Tecnologia Ambiental UFPR/UNIOESTE

Instituição: Universidade Federal do Paraná

Rua do encanador, 85. Apto 10 - Cascavel Paraná

E-mail: lauraalpecop@gmail.com

**Giovana Casarin**

Graduação em andamento pela Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das missões- Campus Santo Ângelo

Instituição: Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das missões URI- Campus Santo Ângelo

Rua Harteis Hortêncio, 231, ap 304, COHAB cep 98802-330

E-mail: gicasarin2010@hotmail.com

**RESUMO**

Atualmente os concretos especiais, entre eles o de ultra alto desempenho (CUAD, acima de 150 MPa de resistência a compressão axial) vêm tornando-se uma ótima alternativa na construção civil no cenário mundial. Isto se deve às propriedades diferenciadas que eles apresentam em relação aos concretos convencionais, principalmente em relação a durabilidade, micro e nanoestrutura, promovendo concretos mais densos e resistentes. O CUAD demanda um consumo de cimento muito elevado, e nesse contexto, as adições minerais têm se mostrado um aliado nas propriedades mecânicas, microestrutura e durabilidade dos concretos mais densa e compacta, impactando diretamente nas demais propriedades do concreto. A presente pesquisa visa analisar a resistência a compressão axial, resistência a tração na compressão diametral e o módulo de elasticidade de concretos de ultra alto desempenho. A dosagem foi feita através do método de empacotamento das partículas, com o auxílio do software Elkem Materials Mix Analyser (EMMA), sendo que através dos resultados de granulometria laser, o EMMA realiza a comparação entre a curva granulométrica ideal e a curva granulométrica gerada pelos traços. Assim foi definido um traço referência, nomeado Traço REF, e mais dois traços: Traço MET (15% de metacaulim (MET)) e o Traço CCA (15% de cinza de casca de arroz (CCA)). As idades de ensaio foram com 7, 14 dias, sendo que serão realizadas também com 28 dias. Os resultados mostraram que as duas adições são viáveis tecnicamente, atingindo valores muito próximas ao referência, com destaque para a mistura com cinza de casca de arroz, no que se refere a evolução das resistências.

**Palavras-chave:** concreto de pós reativos, comportamento, ensaios, materiais, adições minerais

**ABSTRACT**

Today special concrete, including the ultra high performance (CUAD, over 150 MPa axial compression strength) have become a great alternative in construction on the world stage. This is due to the differentiated properties they present in relation to conventional concretes, especially in relation to durability, micro and nanostructure, promoting denser and more resistant concretes. The CUAD demands a very high cement consumption, and in this context, the mineral additions have been an ally in the mechanical properties. The present research aims to analyze the axial compression strength, tensile strength in diametral compression and the modulus of elasticity of ultra high performance concrete. The dosing was done through the particle packing method, with the aid of the Elkem Materials Mix Analyzer (EMMA) software, and through the results of laser granulometry, the EMMA performs the comparison between the ideal particle size curve and the particle size distribution curve generated by Traits. Thus, a reference trait, named Trace REF, and two traces were defined: Trace MET (15% of metacaulim (MET)) and Trace RHA (15% of rice husk ash (RHA)). The test ages were at 7, 14 days, and will be performed also at 28 days. The results showed that the two additions are technically feasible, reaching values very close to the reference, especially the mixture with rice husk ash, in relation to the evolution of the resistances.

**Keywords:** reactive powder concrete, behavior, test, materials, mineral additions

**1 INTRODUÇÃO**

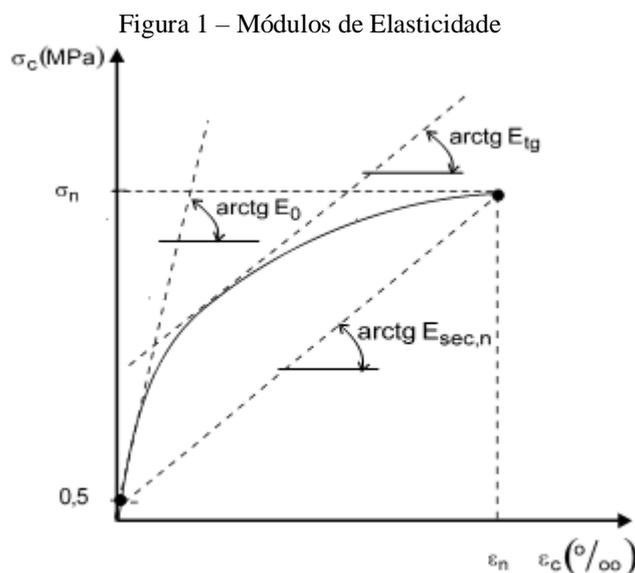
O concreto é o segundo material mais consumido pelo homem perdendo apenas para a água, estima-se que seu consumo anual seja na ordem de 11 bilhões de toneladas. Segundo Mehta (2008) tão elevado consumo se justifica por três propriedades: resistência a intempéries, facilidade de obter diversas formas, e a rápida disponibilidade de material. Com exigências cada vez maiores em comparação com as propriedades dos concretos de outrora, novos materiais eram necessários no mercado, devido a este

contexto o concreto de ultra alto desempenho (CUAD) também chamado de concreto de pós-reativos (CPR) foi desenvolvido nos anos 90, sendo um novo e revolucionário material construtivo podendo atingir um  $F_{ck}$  de 200 MPa aliado a excepcional durabilidade, alta tenacidade, alta ductilidade além de elevada trabalhabilidade, sendo classificado muitas vezes como concreto auto-adensável. O presente trabalho tem por objetivo verificar o módulo de elasticidade de concretos de pós-reativos com adições minerais que não a sílica ativa.

## 1.1 MÓDULO DE ELASTICIDADE

O concreto apresenta deformações elásticas e inelásticas quando submetido a forças externas, a deformação elástica é aquela em que após cessar a tensão atuante sob o material, o mesmo consegue retornar ao estado original, o valor limite de carregamento elástico sofrido pelo concreto é teoricamente compreendida como aquela que ocorre até 30% do carregamento total, após esse ponto o material apresenta comportamento inelástico, ou seja não possui mais a capacidade de voltar ao seu estado original e passa a apresentar fissuras devido a carga atuante.

O módulo de elasticidade elástico é definido como sendo a máxima tensão que o material suporta sem entrar na fase inelástica do carregamento, seu valor é dado pela declividade da curva tensão deformação, uma vez que a curva não possui comportamento linear três métodos para calcular o módulo de elasticidade foram criados: o módulo tangente, o módulo secante, e o módulo cordal, sendo eles apresentados no gráfico abaixo:



## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

O CPR é um dos mais notáveis avanços na tecnologia do concreto, pois tornou o homem capaz de produzir um material tão resistente quanto as rochas, que pode possuir as mais diversas formas. Para isso é necessário um cuidado especial em todas as etapas, principalmente no que tange as matérias primas do concreto, dentre os fatores que possibilitam resistências tão elevadas podemos citar a ausência de agregado graúdo, permitindo ao CPR um tamanho médio das partículas de 0.2mm, sendo do ponto de vista granulométrico classificado como uma argamassa e não um concreto (AITCIN, 2008).

Outro fator de suma importância para atingir as propriedades desejadas é a redução do fator água/aglomerante, preferencialmente menor do que 0.2. Para isso é necessário o uso de aditivos superplastificantes, assim o CPR irá possuir elevada resistência, sem perder a trabalhabilidade devido a um consumo restrito de água.

Segundo Richard e Cheyrezezy (1995) um dos principais fatores que propicia ao CPR suas propriedades é o empacotamento de partículas, que nada mais é do que uma otimização granular, para que os vazios do concreto sejam diminuídos ao máximo, aumentando sua compacidade. De Lahard e Sedran (1994) também defendem o uso de empacotamento para materiais de ultra alto-desempenho, alegando que é uma das formas mais eficientes tanto economicamente, quanto tecnicamente para incrementar a capacidade de um compósito de base cimentícia.

Além disso, temos as adições minerais pozolânicas como mais um ponto extremamente importante para o sucesso do CPR, uma vez que elas reagem com o Hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento, produzindo uma microestrutura mais densa e com menos vazios, o que melhora consideravelmente as propriedades do compósito. Segundo Maroliya (2012) o uso de sílica Ativa no CPR auxilia na diminuição dos vazios, melhor reologia da pasta, além da produção de C-S-H secundário. Além da Sílica Ativa existem outras adições minerais com vasto potencial para aplicação em CPR, como foi mostrado por Sokolovicz (2020), em sua tese de doutorado, onde mostrou ser possível produzir concretos acima de 150 MPa utilizando-se de Cinza de casca de Arroz, Cinza volante, e Cal como adições.

Com o objetivo de melhorar ainda mais as propriedades mecânicas do CPR é recomendado o processo de cura térmica, para elevar a resistência nas idades iniciais tendo em vista que com a utilização de calor novas reações pozolânicas são estimuladas dentro do concreto. Como outro ponto positivo da cura térmica podemos citar o fato de a elevada temperatura alterar a estrutura do pó de quartzo tornando-o extremamente reativo (VANDERLEI, 2004), e, portanto, beneficiando as propriedades do compósito.

**3 MATERIAIS E MÉTODOS****3.1 CIMENTO PORTLAND**

Para confecção dos corpos de prova foi utilizado o cimento CP-V ARI, cujas propriedades físicas e químicas seguiram os preceitos da norma NBR-5733 e estão expostas na tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades do cimento CP V ARI

Propriedades Físico-Químicas	Valores típicos	Valores limites (ASTM C1240-03)
SiO <sub>2</sub>	>91%	>85%
Atividade Pozolânica Chapelle	>130,0	>105
Perda o Fogo	<1%	<6%
Retenção peneira 325 MESH	<5%	<10%
Densidade	2,26 g/cm <sup>3</sup>	
Umidade	<1,5	<3
RAA (15% de adição)	<0,01%	-
Sílica Amorfa	>90%	-
Carbono Livre Combusto	<8%	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,15%	-
CaO	0,5%	-
MgO	0,8%	-

**3.2 CINZA DE CASCA DE ARROZ**

A cinza de casca de arroz utilizada foi proveniente da empresa Ekosil. A ficha técnica da cinza se encontra na tabela 2.

Tabela 2 - Composição química da CCA

Composição	%
SiO <sub>2</sub>	94,84
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,39
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,54
CaO	1,32
MgO	0,40
SO <sub>3</sub>	0,01
Na <sub>2</sub> O	0,11
K <sub>2</sub> O	1,45
Perda ao fogo - PF	0,25

## 3.3 METACAULIM

O Metacaulim utilizado teve origem na empresa Metacaulim do Brasil. Suas propriedades físico-químicas se encontram na tabela 3.

Tabela 3 - Composição química do metacaulim

Propriedades Físico-Químicas	Valores típicos	Valores limites (NBR 15.894)
SiO <sub>3</sub>	57%	44% a 65%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34%	32% a 46%
CaO + MgO	<0,1%	<1,5%
SO <sub>3</sub>	<0,1%	<1%
Na <sub>2</sub> O	<0,1%	<0,5%
Eq. Alcalino Na <sub>2</sub> O	<1,5%	<1,5%
Fe <sub>2</sub> A <sub>3</sub>	2%	-
TiO <sub>3</sub>	1,50%	-
Umidade	0,50%	<2%
Perda o Fogo	3%	<4%
Resíduo #325	6%	<10%
Desempenho com Cimento (7 dias)	115%	>105%
Atividade Pozolânica Chapelle	880mg Ca(OH) <sub>2</sub> /g	>750mg Ca(OH) <sub>2</sub> /g
Área Específica BET	230.000cm <sup>2</sup> /g	150.000cm <sup>2</sup> /g
Massa Específica	2,56kg/dm <sup>3</sup>	-

## 3.4 PÓ DE QUARTZO

O pó de quartzo utilizado na pesquisa possui massa específica de 2.640 g/cm<sup>3</sup>. Sua granulometria se encontra na tabela 4, assim como sua composição química, na tabela 5.

Tabela 4 - Resultados da granulometria do pó de quartzo

Peneira ASTM E-11	Abertura (mm)	% Retida	% Retida Acumulada
100	0,15	0	0
140	0,106	0,06	0,06
200	0,075	0,45	0,51
325	0,045	7	7,51
<325	<0,045	92,49	100

Tabela 5 - Composição química

Propriedades Químicas	Valores típicos
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,06%
TiO <sub>2</sub>	0,020%
Perda ao fogo	0,11%
SiO <sub>2</sub>	99,73%

### 3.5 AREIA INDUSTRIAL

A areia utilizada é disponibilizada comercialmente pela empresa mineração Jundu, possui massa específica de 2,650g/cm<sup>3</sup> contendo 99,42% de quartzo, sendo classificada então como areia quartzosa. Suas composições granulométricas assim como a composição física se encontram respectivamente nas tabelas 6 e 7.

Tabela 6 - granulometria da areia industrial

Peneira (mm)	% Retida	% Retida Acumulada
0,85	0	0
0,6	0,4	0,4
0,425	7,5	7,9
0,3	29,1	37
0,212	35,5	72,5
0,15	20,4	92,9
0,106	6,6	99,5
0,075	0,4	99,9
0,053	0,1	100
Fundo	0	100

Diâmetro máx. característico:  $\phi_{\text{máx}}=0,6\text{mm}$

Módulo de Finura: MF= 1,303

Classificação: Areia Muito Fina (Zona 1)

Tabela 7 - Propriedades químicas

Propriedades Químicas	Valores típicos
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,25%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,12%
TiO <sub>2</sub>	0,055%
MnO <sub>2</sub>	0,001%
ZrO <sub>2</sub>	0,013%
Perda ao fogo	0,14%
SiO <sub>2</sub>	99,42%
pH	6,7%

**3.6 ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE DE TERCEIRA GERAÇÃO**

O aditivo utilizado foi o Glenium 54, se trata de um superplastificante de última geração baseado em uma cadeia de éter policarboxílico modificado que atua como dispersante do material cimentício. O Glenium® 54 é um aditivo para concreto, líquido, pronto para o uso e livre de cloretos. Foi desenvolvido para produção de concretos fluídos, concretos reodinâmicos e concretos de alto desempenho (CAD), geralmente utilizados na indústria de pré-moldados e concretos protendidos, onde se requer maior durabilidade e desempenho. A tabela 8 apresenta as suas características.

Tabela 8 - Características do hiperplastificante Glenium® 54

Teste	Especificação	Unidade
Aparência	Líquido branco turvo	Visual
pH	5 - 7	-
Densidade	1,067- 1,107	g/cm <sup>3</sup>
Sólidos	38,0 - 42,0	%
Viscosidade	<150	cps

Fonte: Adaptado de BASF (2016)

**4 METODOLOGIA**

O presente trabalho tem como objetivo investigar o módulo de elasticidade de produtos à base de cimento Portland que possuam resistência de compressão superior a 150 Mpa, porém sem a utilização da Sílica ativa, a mais tradicional adição mineral para os concretos de pós-reativos, ao invés da já citada sílica ativa, foi utilizada a cinza de casca de arroz, e o Metacaulim, pelo fato de também serem classificadas como superpozolâneas segundo Mehta (2014).

Para obter a dosagem, foi utilizado o auxílio do método do empacotamento de partículas através do software EMMA, uma vez que o CPR apresenta comportamento microestrutural semelhante ao das cerâmicas, e, portanto, o conceito de empacotamento de partículas se aplica a ele.

**4.1 DOSAGEM DO CPR**

A dosagem do concreto seguiu o método do empacotamento de partículas, uma vez que o método trabalha relacionando a granulometria de todos os materiais envolvidos na mistura com o objetivo de conseguir aumentar a densidade do concreto, e por consequência conseguir um material mais homogêneo, e com menos vazios, fatores estes que aumentam significativamente à resistência a compressão. Segundo Castro e Pandolfelli (2009) o conceito de uma alta densidade de empacotamento

foi recentemente redescoberto como um parâmetro chave para a obtenção de materiais cimentícios de ultra-alto desempenho como é o caso do CPR estudado.

O modelo de empacotamento escolhido foi o Andreassen modificado, uma vez que o método correlaciona um fator de distribuição granulométrico “q”, e limita os tamanhos máximo e mínimo das partículas de acordo com a Equação 1.

$$CPFT(\%) = 100x \left( \frac{D_p^q - D_s^q}{D_L^q - D_S^q} \right) \quad (1)$$

Onde:

CPFT= percentual de finos menor que “d” em volume

q= Coeficiente de distribuição

DL= Diâmetro da maior partícula

DS= Diâmetro da menor partícula

O valor de “q” para um empacotamento máximo compreende o valor entre 0,2 e 0,37, sendo este último o valor teórico para um empacotamento máximo, ou seja, qualquer valor acima de 0,37 gerará uma porosidade residual na mistura.

No presente trabalho foi utilizado um coeficiente de distribuição  $q = 0,25$  e um diâmetro máximo de 900 micrometros, com o objetivo de otimizar a quantidade de finos presentes no CPR.

Assim o traço foi desenvolvido utilizando o software de simulação computacional EMMA, sendo que a linha vermelha representa a distribuição granulométrica ideal sugerida pelo software, e a linha em azul a distribuição granulométrica encontrada para o traço referência, que se encontram respectivamente: na figura 2 e na tabela 9.

Figura 2 - Dosagem do concreto pelo método do empacotamento de partículas

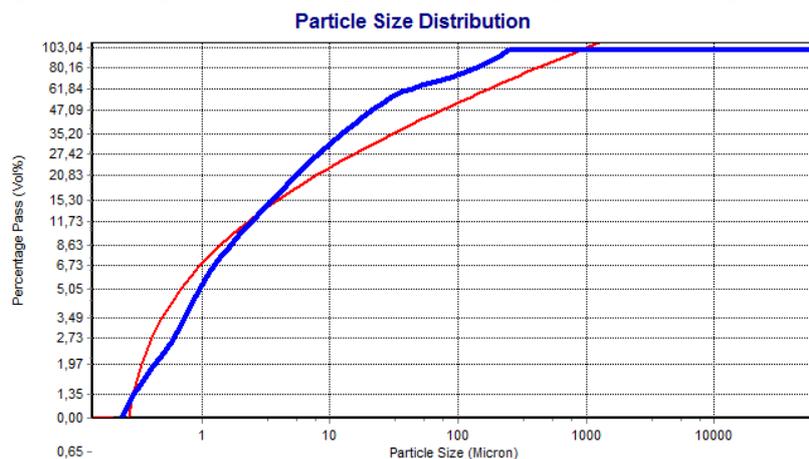


Tabela 8 – Traço unitário

Material	Traço Referência
Cimento	1
Areia	0,88
Pó de Quartzo	0,37
Água	0,2

#### 4.2 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Para esta pesquisa foram moldados 2 corpos de prova 10X20 cm para cada traço aos 7, e 14 dias, totalizando 12 corpos de prova. O Teor de aditivo havia sido pré-estabelecido anteriormente tendo em vista moldagens anteriores que não satisfizeram uma boa trabalhabilidade para o fator a/c escolhido. Foram feitas 2 substituições de adições minerais em relação a massa de cimento, e, portanto, três traços sendo utilizados na pesquisa. A tabela 9 mostra o traço unitário com metacaulim, e a tabela 10 com cinza de casca de arroz.

Tabela 9 – Traço unitário com metacaulim

Material	Traço 15%metacaulim
Cimento	0,85
Areia	0,88
Pó de Quartzo	0,37
Água	0,18
Metacaulim	0,15

Tabela 10 – Traço unitário com cinza de casca de arroz

Material	Traço 15% CCA
Cimento	0,85
Areia	0,88
Pó de Quartzo	0,37
Água	0,18
CCA	0,15

Para os três traços foram realizados o mesmo processo de homogeneização prévia do material, e em seguida o mesmo foi inserido na batedeira planetária, a água foi inserida em duas frações e o aditivo em uma, após a verificação da trabalhabilidade desejada os corpos de prova foram devidamente moldados e rasurados, sem a necessidade de vibração.

Os corpos de prova foram ensacados, e colocados na cura úmida até estarem curados e poderem ser deformados, após isso foram inseridos em um balde com água por 2 dias, e colocados na cura térmica até as datas dos ensaios.

A figura 3 mostra a realização do ensaio de módulo de elasticidade.

Figura 3 - Realização do ensaio de módulo de elasticidade



#### 4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 11 apresenta os resultados do Módulo de Elasticidade do traço referência, a tabela 12 apresenta os resultados do traço com 15% de substituição parcial de cimento por cinza de casca de arroz e a tabela 13 apresenta os resultados do traço com 15% de substituição parcial de cimento por Metacaulim.

Tabela 11 – Resultados para o traço referência

<b>Traço Referência</b>		
<b>Idade</b>	<b>Resistência</b>	<b>Módulo de Elasticidade</b>
7 dias	91,5 MPa	37,18 GPa
14 dias	115,6 MPa	49,5 GPa

Tabela 12 – Resultados para o traço com cinza de casca de arroz

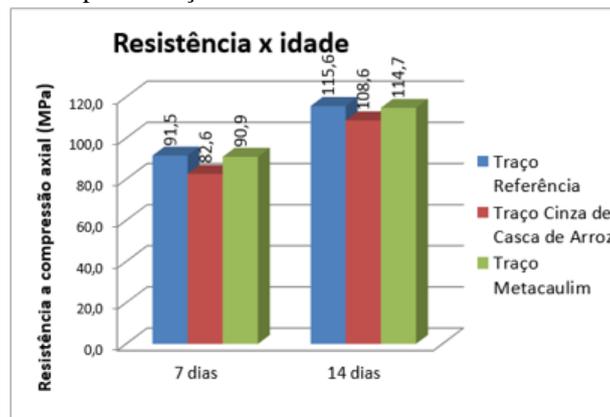
<b>Traço Cinza de Casca de Arroz</b>		
<b>Idade</b>	<b>Resistência</b>	<b>Módulo de Elasticidade</b>
7 dias	82,6 MPa	34,6 GPa
14 dias	108,6 MPa	47,8 GPa

Tabela 13 – Resultados para o traço com metacaulim

Traço Metacaulim		
Idade	Resistência	Módulo de Elasticidade
7 dias	90,9 MPa	35,1 GPa
14 dias	114,7 MPa	48,2 GPa

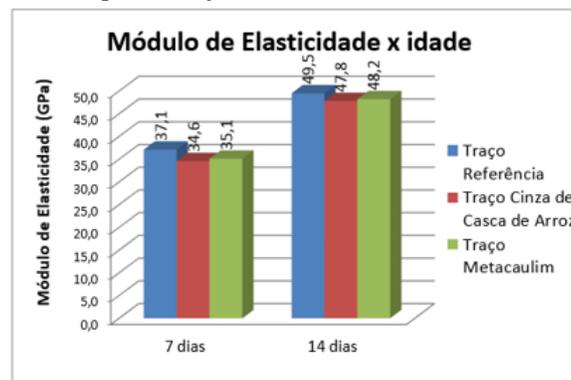
A figura 4 apresenta os resultados do ensaio de resistência a compressão axial para as três misturas estudadas. Verificou-se que os resultados ficaram bem próximos quando se substituiu parcialmente (15%) o cimento por cinza de casca de arroz e metacaulim. O metacaulim apresentou resultados ligeiramente superiores ao concreto com cinza de casca de arroz.

Figura 4 – Resultados para o traço referência do ensaio de resistência a compressão axial



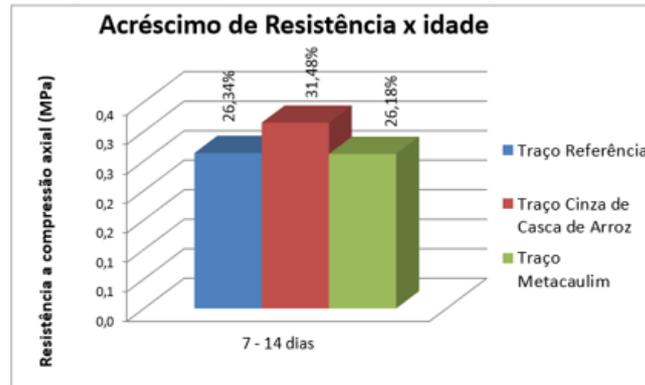
A figura 5 apresenta os resultados do ensaio de módulo de elasticidade para as três misturas estudadas. Verificou-se que, da mesma maneira que os resultados de resistência a compressão axial, os resultados ficaram bem próximos quando se substituiu parcialmente (15%) o cimento por cinza de casca de arroz e metacaulim. O metacaulim apresentou resultados ligeiramente superiores ao concreto com cinza de casca de arroz.

Figura 5 – Resultados para o traço referência do ensaio de módulo de elasticidade



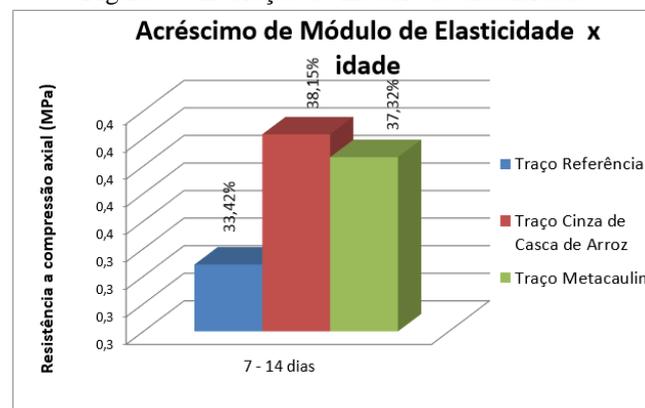
A figura 6 apresenta os resultados da evolução da resistência a compressão axial, onde os melhores resultados foram com concreto com cinza de casca de arroz. Isso ocorre em função da reação pozolânica, onde a pozolana da cinza de casca de arroz reage com as placas de hidróxido de cálcio, formando silicato de cálcio hidratado secundário, densificando a matriz do concreto.

Figura 6 – Evolução da resistência a compressão axial



A figura 7 apresenta os resultados da evolução do módulo de elasticidade, onde os melhores resultados foram com concreto com cinza de casca de arroz, na mesma lógica do ensaio de resistência axial a compressão.

Figura 7 – Evolução do módulo de elasticidade



## 4 CONCLUSÕES

Após o desenvolvimento do trabalho verificou-se que o módulo de elasticidade do concreto é propriedade importante. Foram propostas a utilização de duas adições minerais em substituição parcial ao cimento, no teor de 15%. Os resultados mostraram que a substituições foram viáveis.

No ensaio de resistência a compressão axial, verificou-se que os resultados ficaram bem próximos quando se substituiu parcialmente (15%) o cimento por cinza de casca de arroz e metacaulim.

O metacaulim apresentou resultados ligeiramente superiores ao concreto com cinza de casca de arroz. Porém quando se avaliou a evolução da resistência, verificou-se que os melhores resultados foram com concreto com cinza de casca de arroz. Isso ocorre em função da reação pozolânica, onde a pozolana da cinza de casca de arroz reage com as placas de hidróxido de cálcio, formando silicato de cálcio hidratado secundário, densificando a matriz do concreto.

No ensaio de módulo de elasticidade, verificou-se que, da mesma maneira que os resultados de resistência a compressão axial, os resultados ficaram bem próximos quando se substituiu parcialmente (15%) o cimento por cinza de casca de arroz e metacaulim. O metacaulim apresentou resultados ligeiramente superiores ao concreto com cinza de casca de arroz. Nos resultados da evolução do módulo de elasticidade, onde os melhores resultados foram com concreto com cinza de casca de arroz, na mesma lógica do ensaio de resistência axial a compressão.

Dessa maneira, sugere-se com continuidade do trabalho, estudar outros tipos e teores de adições minerais, bem como realizar análises mecânicas de microestrutura e de durabilidade dos concretos com adições minerais.

## REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro, 2008.

AITCIN, P.C. **Concreto de alto desempenho**. Editora Pini, São Paulo, 2000.

CASTRO, A. L., PANDOLFELLI, V. C. (2009) **Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil**. Cerâmica, 55, 18-32.

MAROLIYA, M.K, Microstructure analysis of reactive powder concrete. International Journal of engineering research and development. Volume 4, issue 2 pp 68-77. 2012

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

RICHARD, P.; CHEYREZY, M. (1995). **Composition of reactive powder concretes**. Cement and Concrete Research. v. 25, n. 7, p. 1501-1511.

SOKOLOVICZ, B, C. Avaliação das propriedades mecânicas e microestruturais de concreto de ultra alto desempenho com adições minerais e resíduos industriais. Tese (doutorado) – Universidade federal de Santa Maria, Centro de tecnologia, programa de pós-graduação em engenharia civil. 2020

VANDERLEI, R.D.; **Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas.** Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 2004.

DE LAHARD, F e SEDRAN, T ; Optimization of ultra high performance concrete by the use of a packing model. Cemtn and concrete research. Vol 24 n 6, p 997-1009. 1994