

## **Estudo da cinza da biomassa da palma como material cimentício suplementar na produção de concreto**

**Study of palm biomass ash as a supplementary cementitious material in concrete production**

**Estudio de las cenizas de biomasa de palma como material cementante suplementario en la producción de hormigón**

Recebido: 22/07/2021 | Revisado: 29/07/2021 | Aceito: 11/08/2021 | Publicado: 18/08/2021

### **Brenno Pires Percy**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4116-9075>  
Universidade Federal do Pará, Brasil  
E-mail: [brenno.pires@ufpa.br](mailto:brenno.pires@ufpa.br)

### **Camila Pereira de Oliveira**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0412-2219>  
Universidade Federal do Pará, Brasil  
E-mail: [caholiveira21@gmail.com](mailto:caholiveira21@gmail.com)

### **Luciana Carvalho Queiroz**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1285-5271>  
Universidade Federal do Pará, Brasil  
E-mail: [lucianaqueiroz@gmail.com](mailto:lucianaqueiroz@gmail.com)

### **Isaura Nazaré Lobato Paes**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1781-1689>  
Universidade Federal do Pará, Brasil  
E-mail: [isaurapaes@ufpa.br](mailto:isaurapaes@ufpa.br)

### **Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7931-4042>  
Universidade Federal do Pará, Brasil  
E-mail: [lupcordeiro@gmail.com](mailto:lupcordeiro@gmail.com)

### **Paulo Sérgio Lima Souza**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0328-7655>  
Universidade Federal do Pará, Brasil  
E-mail: [paseliso@ufpa.br](mailto:paseliso@ufpa.br)

### **Resumo**

A valorização de subprodutos e/ou resíduos de diferentes cadeias produtivas tem se mostrado como alternativa na incorporação como material cimentício suplementar (MCS), seja na produção de cimentos, em adição ou substituição à matriz cimentícia. Tais estudos se mostram importantes, visto que é crescente a busca por materiais sustentáveis e menos impactantes ao meio ambiente. Desta forma, este trabalho visa contribuir para o estudo de novos MCS através da utilização da cinza dos resíduos da extração do óleo de palma, uma vez que tais resíduos (fibra do mesocarpo, endocarpo e cachos vazios) são utilizados como biomassa nas caldeiras de beneficiamento e refinamento do óleo de palma, gerando grande quantidade de cinza. Para analisar a viabilidade técnica deste material, foram produzidos concretos convencionais em substituição ao cimento Portland nos teores de 7,5% e 15%, o método de dosagem utilizado foi IPT/EPUSP e foi fixado a relação água/aglomerante em 0,45 e 0,60. Adotou-se um traço referência (sem substituição) para o concreto e realizou-se a avaliação de propriedades mecânicas através de ensaios de resistência do concreto (compressão axial, tração por compressão diametral, tração na flexão e módulo de elasticidade), onde foi possível observar que na resistência à compressão o concreto com substituição não superou as resistências obtidas pelo traço referência, porém alcançou resultados similares com o teor de 15% de substituição associado a relação água/aglomerante de 0,60. Além disso, foi possível constatar que para a resistência a tração e módulo de elasticidade não apresentaram resultados significativos influenciados pelo teor de cinza.

**Palavras-chave:** Concreto; Resíduos; Cinza; Palma; Sustentabilidade.

### **Abstract**

The valorization of by-products and/or waste from different production chains has been shown as an alternative in the incorporation as supplementary cementitious material (SCM), either in the production of cement, in addition, or replacement to the cement matrix. Such studies are important since the search for sustainable materials and less impactful to the environment is growing. Thus, this work aims to contribute to the study of new MCS through the use of ash from palm oil extraction waste, since such waste (mesocarp fiber, endocarp, and empty clusters) are used as biomass in the boilers of processing and refining of palm oil, generating large amounts of ash. To analyze the

technical feasibility of this material, conventional concrete was produced as a substitute for Portland cement at 7.5% and 15%. The dosage method used was IPT/EPUSP and the water/binder ratio was set at 0.45 and 0.60. A reference mix (without replacement) was adopted for the concrete and the evaluation of mechanical properties was performed through strength tests (axial compression, tension by diametrical compression, flexural tension, and modulus of elasticity), where it was possible to observe that in compression strength the concrete with replacement did not overcome the strength obtained by the reference mix, but achieved similar results with the 15% substitution content associated with a water/binder ratio of 0.60. Moreover, it was possible to verify that the tensile strength and modulus of elasticity did not show significant results influenced by the ash content.

**Keywords:** Concrete; Waste; Ash; Palm; Sustainability.

### Resumen

La valorización de subproductos y / o residuos de diferentes cadenas productivas se ha mostrado como una alternativa para su incorporación como material cementante suplementario (SCV), ya sea en la producción de cemento, como complemento o reemplazo de la matriz de cemento. Estos estudios son importantes, ya que está creciendo la búsqueda de materiales sostenibles que tengan menos impacto en el medio ambiente. Así, este trabajo tiene como objetivo contribuir al estudio de nuevos SCV mediante el uso de cenizas de residuos de extracción de aceite de palma, ya que dichos residuos (fibra de mesocarpio, endocarpio y racimos vacíos) se utilizan como biomasa en el procesamiento de calderas y refinamiento del aceite de palma, generando grandes cantidades de ceniza. Para analizar la viabilidad técnica de este material, se elaboró hormigón convencional en sustitución del cemento Portland en los contenidos de 7,5% y 15%, el método de dosificación utilizado fue IPT / EPUSP y la relación agua / aglutinante se fijó en 0,45 y 0,60. Se adoptó una mezcla de referencia (sin reemplazo) para el hormigón y la evaluación de las propiedades mecánicas se llevó a cabo mediante ensayos de resistencia del hormigón (compresión axial, tensión de compresión diametral, tensión de flexión y módulo de elasticidad), donde fue posible señalar que en la resistencia a la compresión del hormigón con reemplazo no superó las concentraciones obtenidas por la mezcla de referencia, pero logró resultados similares con el contenido de reemplazo del 15% asociado con una relación agua / aglutinante de 0,60. Además, se pudo comprobar que para la resistencia a la tracción y el módulo elástico no presentaron resultados significativos influenciados por el contenido de cenizas.

**Palabras clave:** Hormigón; Residuos; Ceniza; Palma; Sostenibilidad.

## 1. Introdução

Dentre os impactos ambientais gerados devido a produção do concreto, um dos mais relevantes é a emissão de CO<sub>2</sub>. Aproximadamente, entre 88,6% a 92,2% das emissões derivadas da produção do concreto originam-se da produção do cimento. Para produção de uma tonelada de clínquer hoje no Brasil é emitido em média 866kg CO<sub>2</sub>/t de cimento. Em torno de 40% deste valor é devido a queima de combustíveis fósseis para geração de energia, enquanto o restante é devido a decomposição do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} \cdot \text{CO}_2$ ) durante a calcinação das matérias primas (Lima, 2010; Oliveira et al., 2014; Abrão, 2019).

De acordo com o Roadmap Tecnológico do Brasil (Roadmap, 2019), uma das metas a serem alcançadas até 2050 é elevar ainda mais o uso de adições na produção do cimento, o país é atualmente uma das referências mundiais na redução de clínquer no cimento, o que representa a principal alternativa e desafio do setor na mitigação de suas emissões. Com a redução da razão clínquer/cimento de 67% em 2014 para 52% em 2050, seria possível evitar a emissão cumulativa de 290Mt de CO<sub>2</sub>. Isto representa 69% do potencial de redução do setor até 2050.

A indústria nacional de cimento tem tradição no uso de adições. O aproveitamento de subprodutos de outras atividades e matérias primas alternativas é realizado há mais de 50 anos no país. A produção de cimentos com adições ao clínquer, de materiais como escórias de alto forno, cinzas volantes, argilas calcinadas e filler calcário, além de diversificar as aplicações e características específicas do cimento, representa uma solução ambientalmente correta para subprodutos de outros processos produtivos e para a preservação de recursos naturais não renováveis (Roadmap, 2019).

Existe ainda outra alternativa de se utilizar esses subprodutos, sendo na adição ou substituição direta do cimento Portland na produção de concretos, a depender da natureza da adição ela promoverá ao concreto uma alteração das suas propriedades com ganho de resistência, maior durabilidade e aumento de vida útil das estruturas de concreto, isso devido a mudança no comportamento da matriz cimentícia gerando uma baixa permeabilidade, resistência ao ataque de agentes

agressivos (cloretos e sulfatos), além de mitigação na reação álcali agregado.

De acordo com Queiroz et. al. (2015) um dos resíduos mais estudados para a produção de concreto é a cinza de casca de arroz (CCA), apresentando resultado satisfatório quando é avaliada a resistência à compressão axial adotando teores de substituição de 5% e 10%, chegando à resistências 24% maiores para concretos e até 28% para argamassas na idade de 28 dias.

Além da cinza de casca de arroz (CCA), outros resíduos da agroindústria têm sido estudados, entre eles o resíduo proveniente da produção do óleo de palma, popularmente conhecido no Brasil como óleo de dendê. Segundo o Foreign Agriculture Service do United States Department of Agriculture – USDA (2016), os países que mais produzem óleo de palma estão localizados no continente asiático, sendo que a Indonésia, Malásia e Tailândia são responsáveis por 87% da produção.

No Brasil, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017), o estado do Pará é o maior produtor de óleo de palma com uma quantidade produzida de aproximadamente 1 milhão e seiscentas toneladas na safra de 2017, sendo os municípios de Tailândia e Concórdia do Pará os maiores produtores do estado. Além disso, a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira impulsionou o uso de óleo vegetal (biodiesel) como fonte alternativa de energia, criando uma tendência de expansão da produção e conseqüentemente no aumento da geração de resíduos (Brasil, 2018).

No processo de geração de vapor para extração de óleo dos frutos, os resíduos da palma são utilizados nas caldeiras alimentadas à biomassa, gerando uma quantidade considerável de cinza, que caso não seja aproveitada corretamente, pode se transformar em um problema ambiental. Estima-se que em uma usina de processamento anual de 30.000 toneladas de cachos, sejam geradas 3.600 toneladas de fibras de mesocarpo, ao qual a queima resultará em aproximadamente 144 toneladas de cinza (Furlan, 2006).

Diante desse contexto, esse artigo teve por objetivo principal estudar a utilização da cinza residual originada da queima da biomassa da palma como material cimentício suplementar (MCS) na produção de concreto em substituição parcial ao cimento, avaliando sua influência nas propriedades no estado fresco e endurecido.

## 2. Metodologia

A metodologia desenvolvida neste trabalho é de caráter laboratorial com o desenvolvimento de um projeto de experimentos para análises quantitativas de desempenho (Koche, 2011). O projeto de experimentos é uma metodologia que visa otimizar o planejamento, execução e análise de um experimento, seu uso permite que seja estruturado a sequência de ensaios para atingir os objetivos propostos (Ribeiro et al., 2000).

De forma a entender o comportamento dos concretos produzidos com a substituição do cimento Portland pela cinza residual originada da queima da biomassa da palma e contribuir ao estudo de materiais cimentícios suplementares, foi desenvolvido um projeto de experimentos que buscou caracterizar inicialmente este resíduo para identificar suas características individuais e as possíveis mudanças que o mesmo apresentaria no comportamento do concreto, bem como a caracterização dos agregados utilizados, procedimentos de beneficiamento do resíduo, dosagem e ensaios de propriedades mecânicas do concreto.

Para execução do programa experimental definiu-se as seguintes variáveis de controle:

- Teor de substituição (em relação a massa do cimento): 0% (traço de referência), 7,5% e 15%. Tais teores foram utilizados devido a estes serem de uso comum ao estudo de cinzas no concreto;
- Relação água/cimento: 0,45 e 0,60. Optou-se por essas variáveis devido a necessidade de verificar o comportamento do concreto com a cinza da biomassa de palma (CBP), sendo o concreto com maior resistência (0,45) e o concreto com baixa resistência (0,60);
- Idades de rompimento: 7, 28 e 60 dias sendo estas comumente utilizadas em estudos de tecnologia do concreto.

Para análise do comportamento do concreto adotou-se como variáveis de resposta os seguintes ensaios:

a) Estado fresco

- Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (ABNT NBR 1688, 2020).

b) Estado endurecido

- Resistência à compressão axial (ABNT NBR 5739, 2018);
- Resistência à tração por compressão diametral (ABNT NBR 7222, 2011);
- Módulo de elasticidade (ABNT NBR 8522, 2017).

## 2.1 Dosagem e produção dos concretos

O processo de dosagem foi feito com base no método do IPT/EPUSP (Helene e Terzian, 1992), onde tendo a definição das relações água/cimento de 0,45 e 0,60, chegou-se aos traços conforme se observa na Tabela 1.

**Tabela 1** – Misturas executadas.

Traços	1:1.55:2.66:0.45			1:2.47:3.61:0.60		
	0%	7.5%	15%	0%	7.5%	15%
Teor de subst.	0%	7.5%	15%	0%	7.5%	15%

Fonte: Autores (2021).

A produção dos corpos de prova foi realizada no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, utilizando uma betoneira de 2 eixos com volume de 120 L. Foi realizada nas misturas, quando necessária, a substituição em massa do cimento pela cinza da biomassa de palma (CBP) e o teor inicial de aditivo foi fixado em 2% em relação a massa do cimento.

A colocação dos materiais no interior da betoneira obedeceu a uma determinada ordem em todos os traços. Primeiramente foi colocado todo o volume de agregado graúdo e 70% do volume de água, seguindo posteriormente com a colocação de todo o cimento e da cinza, além do aditivo, misturando por aproximadamente dois minutos para que o aditivo agisse sobre o cimento. Logo em seguida, foram acrescentados o agregado miúdo e o restante da água de forma gradual.

Após a mistura do material foi feita a verificação da consistência através do abatimento do tronco de cone conforme norma vigente (ABNT NBR 1688, 2020), cujo valor foi fixado em  $120 \pm 20$  mm servindo de parâmetro para determinar a trabalhabilidade adotada na pesquisa. Para os traços em que o abatimento ficou abaixo do pré-determinado o teor de aditivo foi aumentado até que atingisse o abatimento desejado. Em seguida os corpos de prova foram moldados seguindo recomendação normativa (ABNT NBR 5738, 2016). Após 24 horas foram retirados dos moldes, posteriormente foram imersos e mantidos em tanques de água para processo de cura até as idades de rompimento e execução dos ensaios.

## 2.2 Caracterização dos materiais

### 2.2.1 Cinza da biomassa da palma (CBP)

A cinza utilizada é oriunda da queima em caldeira dos resíduos, composta pela fibra do mesocarpo, endocarpo e cachos vazios do beneficiamento da palma, fornecida pela empresa Dendê do Tauá, localizada no Município de Concórdia do Pará/PA.

A empresa Dendê do Tauá se dedica ao processamento industrial da extração, refino e produção de gorduras de Palma para o mercado nacional. A Figura 1 mostra os resíduos usados como biomassa.

**Figura 1** – Resíduos da indústria da palma.



Fonte: Mujah (2016).

### 2.2.1.1 Beneficiamento da cinza

O cinza *in natura* foi primeiramente peneirada na malha de 19mm, para remoção de impurezas e restos de fibras e cascas que foram queimadas de maneira incompleta. Na Figura 2 é possível verificar a diferença entre a cinza *in natura* e a cinza tratada.

**Figura 2** – Cinza.



Fonte: Autores (2021).

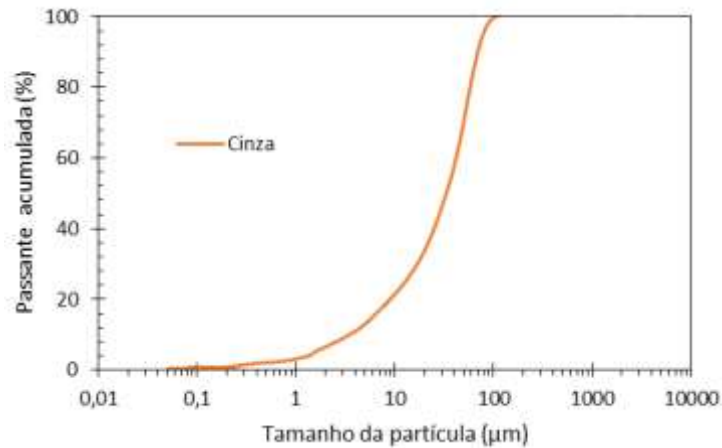
Posteriormente a cinza foi peneirada novamente, porém na malha de abertura de 2mm e finalmente o material passante foi moído em um moinho de bolas por duas horas, com razão entre carga dos corpos moedores na proporção de 1:3 (cinzas: bolas) mantido durante todo o processo e depois peneirado na malha de abertura de 0.075mm.

### 2.2.1.2 Caracterização da cinza

A caracterização da cinza foi realizada através de diferentes ensaios para avaliar suas propriedades físicas, químicas e identificação das principais fases presentes após processo de beneficiamento.

As propriedades físicas da CBP foram identificadas através de granulometria à laser e a massa específica encontrada foi de 2.47kg/dm<sup>3</sup> de acordo com NBR 16605 (ABNT, 2017). A Figura 3 mostra a distribuição granulométrica do CBP, onde o diâmetro médio encontrado foi de 35.19µm, 10% dos grãos têm diâmetro menor 3.47µm e 90% diâmetro menor 69.45µm.

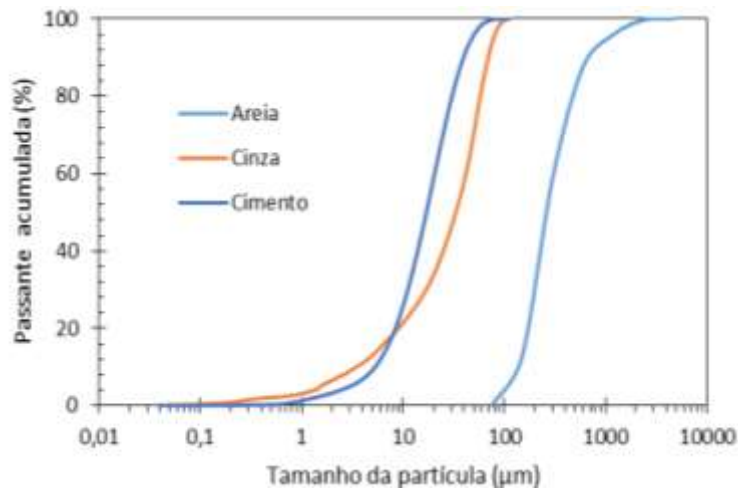
**Figura 3** – Granulometria à laser da cinza.



Fonte: Autores (2021).

Ao analisar a cinza com os demais materiais finos observa-se que a mesma apresenta um comportamento uniforme e bem distribuído situando-se em uma faixa de granulometria intermediária entre o cimento e a areia (ver Figura 4), podemos observar que cerca de 20% das partículas da CBP tem tamanho menor do que a do cimento. Este fato pode proporcionar melhorias físicas na matriz cimentícia, atuando como material de preenchimento e melhorando o empacotamento de esqueleto granular (Polisseni, 2018).

**Figura 4** – Granulometrias dos materiais finos.



Fonte: Autores (2021).

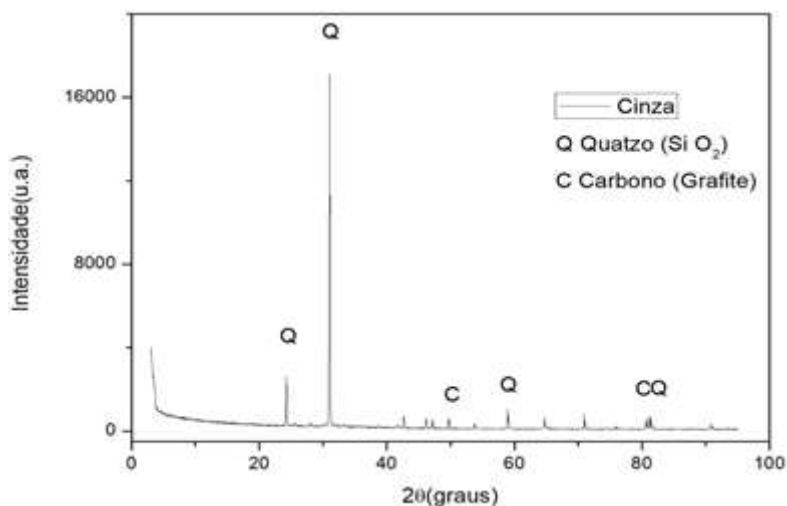
Comparando com uma adição mineral comumente usada como a sílica ativa, a CBP apresenta distribuição granulométrica muito superior. Mehta e Monteiro (2014) mostraram que a sílica ativa apresenta distribuição granulométrica das partículas cem vezes mais fina que o cimento Portland comum, o mesmo usado neste programa experimental.

A identificação das principais fases presentes foi realizada através da técnica de difração de raios X (ver Figura 5), onde se utilizou um difratômetro de raios X Philips, modelo X'Pert MPD. Os dados foram coletados via radiação Cu-K $\alpha$ 1 (de comprimento 1.54056Å) entre o intervalo 5-75°2 $\theta$  a um passo de 0.05° e tempo por passo de 1 segundo. Para identificação das fases utilizou-se o software *X'Pert High Score Plus* e plotagem do gráfico foi utilizado o software *Origin v8*, por fim as fichas cristalográficas utilizadas foram retiradas da base de dados *Inorganic Crystal Structure Database – ICSD* (ICSD, 2011).



Os picos de carbono na forma cristalina de grafite podem ser justificados pelo possível teor de carbono não queimado presente na CBP. Segundo Awal e Shehu (2013) e Zeyad et al. (2016), o carbono é responsável pela cor escura da cinza de combustível de óleo de palma (CCOP), quanto mais escura a cinza maior o teor de carbono não consumido, quando o resíduo é tratado termicamente a cor da cinza muda de preto para cinza claro. Não foi realizado ensaio para a verificação de carbono residual na CBP. Desta forma, buscou-se identificar nos concretos produzidos o efeito filer com redução de porosidade e ganho de resistência.

**Figura 5 – DRX da cinza.**



Fonte: Autores (2021).

Já a caracterização química foi realizada através da técnica de fluorescência de raios X de dispersão por comprimento de onda com varredura de todos os óxidos representativos para composição química em comparação ao cimento Portland e o equipamento utilizado foi *Shimadzu* modelo XRF1800. A Tabela 2 apresenta os principais óxidos encontrados na composição química da CBP.

**Tabela 2 – Análise química da amostra de CBP (%).**

SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	NiO	SO <sub>3</sub>	Outros óxidos
47.99	8.72	8.39	8.16	6.76	6.73	3.98	2.93	2.07	1.34	2.92

Fonte: Autores (2021).

Em relação a sua composição química, Hamada et al. (2018), fez uma revisão de vários estudos sobre o uso da cinza comparando as características químicas e físicas de vários autores. A média de compostos químicos encontrados em 42 autores, por ordem decrescente foi de 59.49% SiO<sub>2</sub>, 7.53% CaO, 6.71% K<sub>2</sub>O, 4.32% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 4.23% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 4.13% MgO, havendo bastante variabilidade nas composições químicas, porém o teor de sílica ficou entre 40% e 70%, de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> entre 1% e 12% e o Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> entre 1.0% e 9%. Dessa forma, a composição química da CBP deste estudo está conforme bibliografias.

Segundo Johari et al. (2012) e Zeyad et al. (2013) o teor de sílica é obtido pela queima da casca (endocarpos) e a variabilidade química pode ser devido a diferentes fatores como: tipo e temperatura de queima, pureza de partículas, partes da planta queimada, proporção entre as partes queimadas (cachos vazios, fibras do mesocarpo e casca), entre outros.

A soma dos compostos  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  é de 60.13% o que a deixa na classe de pozolana de classe E, porém os álcalis disponíveis em termos de  $\text{Na}_2\text{O}$  superam o limite máximo especificado na norma NBR 12653 (ABNT, 2015), fator que a desclassifica como material pozolânico.

Tal comportamento corrobora com o resultado encontrado na identificação das principais fases presentes (ver Figura 5) onde é possível identificar que não há desvio na linha de base que indique halo amorfo característico de materiais pozolânicos, como encontrado na sílica de casca de arroz, sílica ativa e metacaulim estudados por Hoppe Filho et al. (2015), porém se assemelha ao resultado do fíler quartzoso apresentando picos de maior intensidade de  $\text{SiO}_2$  na forma cristalina, indicando um material pouco reativo.

### 2.2.2 Cimento portland

O cimento Portland usado no concreto para a confecção dos corpos de prova foi do tipo CP I, tal cimento foi escolhido por ser o mais puro disponível no mercado, livre de pozolanas e/ou adições. Segundo o fabricante sua massa específica é de 3.100 kg/dm<sup>3</sup>, e sua resistência à compressão (28 dias) é de 32MPa.

### 2.2.3 Aditivo superplastificante

Foi utilizado aditivo superplastificante, cujas características, segundo fabricante estão expostas na Tabela 3. Sua dosagem foi estipulada individualmente para cada traço para obter-se o abatimento de 120±20mm.

**Tabela 3** – Características do aditivo superplastificante.

Característica	Valor	Observações
Densidade	1.09 kg/L	NBR 10908 (ABNT, 2008)
Dosagem Recomendada	$\geq 0.2\% \leq 5.0\%$	Sobre o peso do cimento
Cor	Marrom	-

Fonte: Fabricante.

### 2.2.4 Água

Foi utilizada água potável, distribuída pela rede pública de Belém. Não foi realizado nenhum ensaio de caracterização.

### 2.2.5 Agregados

Os agregados utilizados na produção do concreto foram areia e seixo, ambos adquiridos comercialmente na região de Belém/ PA. A Tabela 4 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização de acordo com as normas vigentes.

**Tabela 4** – Propriedades físicas dos agregados.

Propriedades Físicas	Miúdo	Graúdo	Normas
Massa Específica	2.51 Kg/dm <sup>3</sup>	2.57 Kg/dm <sup>3</sup>	NM 52 (ABNT, 2009)
Módulo de Finura	1.45	3.09	NM 248 (ABNT, 2003)
Diâmetro máximo	1.2 mm	19 mm	NM 248 (ABNT, 2003)

Fonte: Autores (2021).

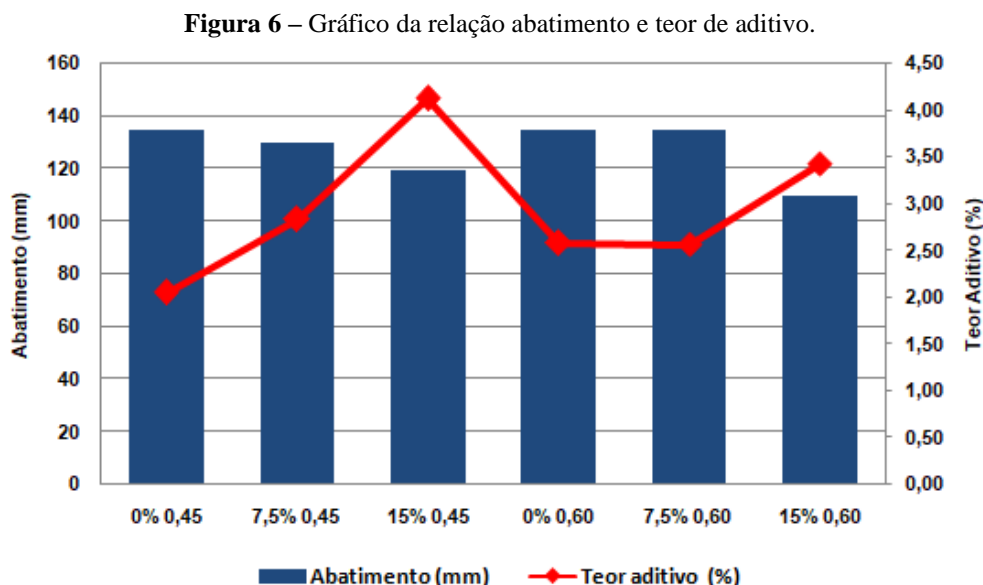


### 3. Resultados e Discussões

#### 3.1 Propriedades do concreto

##### 3.1.1 Estado fresco

Conforme pode ser observado na Figura 6, as misturas onde a proporção de CBP foi mais alta atingiram os maiores teores de aditivo e inversamente, as misturas sem substituição tiveram os menores teores de aditivo, sendo o menor teor de 2% na mistura de 0% de substituição e relação água/cimento 0,45.



Fonte: Autores (2021).

Esse comportamento ficou dentro do esperado, visto que, a CBP é um material com elevada finura. Materiais com composições granulométricas reduzidas e maior superfície específica, apresentam tendência para uma maior retenção de água devido à adsorção do líquido na superfície dos grãos, fenômeno este que explica a inexistência de exsudação em concretos com presença de adições minerais (Fernandes et al., 2015 apud Giammusso, 2006).

Outro fato que pode influenciar nesta propriedade é o possível teor de carbono residual presente na CBP, segundo Awal e Shehu (2013), a diminuição do abatimento do concreto contendo até 70% de cinza de combustível de óleo de palma, foi justificado pelo alto teor de carbono não queimado e elevada perda ao fogo que indicou a natureza porosa da cinza usada no estudo, pois quanto mais poroso o material, maior a demanda de água.

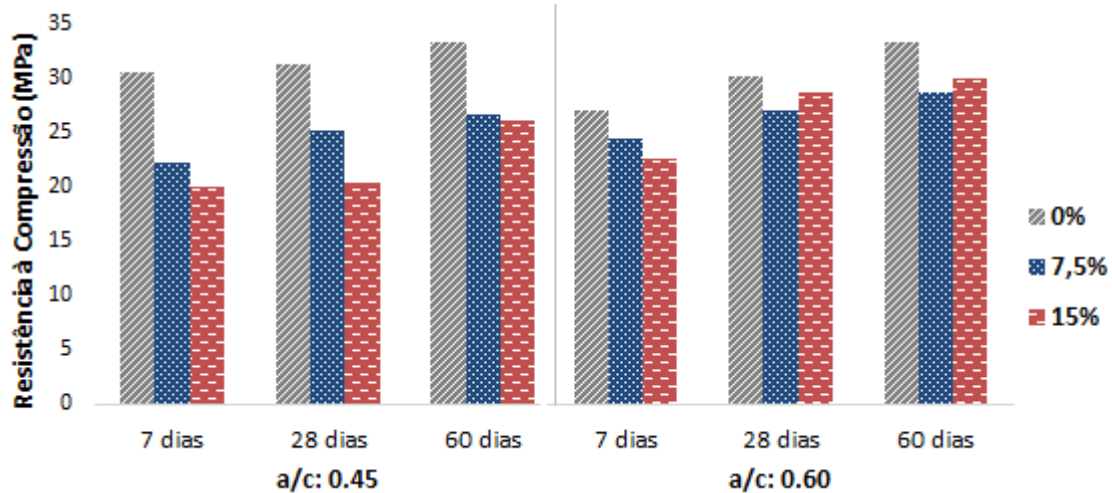
##### 3.1.2 Resistência à compressão axial

A Figura 7 mostra os valores de resistência à compressão adotados para análise. Nos traços com relação a/c de 0,45 pode-se observar que houve perda na resistência à compressão em todos os concretos com CBP em comparação ao traço de referência, sendo a resistência à compressão menor quanto maior o teor de substituição. Já nos concretos com relação a/c de 0,60 os traços com substituição se igualam com o traço de referência aos 28 dias, sendo o traço de referência levemente superior aos 60 dias. Podemos concluir que a CBP teve efeito negativo na resistência do concreto com relação a/c de 0,45 e desempenho satisfatório para a relação a/c 0,60.

Analisando a relação água/cimento, os resultados de certa forma já eram esperados e se comportam de acordo com a lei de Abrams, onde observa-se que quanto maior a relação água/cimento, menor será a resistência a compressão. Segundo

Metha e Monteiro (2014) essa relação pode ser explicada como consequência do gradativo enfraquecimento da matriz devido ao aumento da porosidade em concretos com relação água/cimento elevada.

**Figura 7 – Resistência à compressão axial.**



Fonte: Autores (2021).

A diferença do efeito da CBP, no que se diz respeito a relação a/c, pode-se ser explicado pela porosidade característica dos concretos com alta e baixa resistência, como explicado anteriormente. Em um concreto com menos vazios o efeito fíler da CBP não foi significativo em questão de ganhos de resistência, não conseguindo compensar o menor teor de cimento das misturas com substituição. Já no concreto de menor de resistência e maior relação a/c o efeito fíler da CBP foi mais notório, em um concreto mais poroso e com mais vazios a CBP atua como material de preenchimento, ocupando os vazios existentes entre as partículas de cimento dispersas, melhorando o empacotamento de esqueleto granular e consequentemente aumentando a resistência.

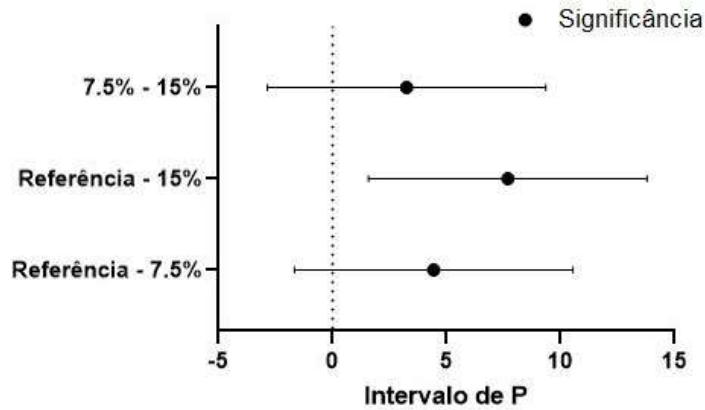
Já era esperado que a CBP influenciasse apenas fisicamente na estrutura do concreto visto que pelo ensaio de DRX foi possível constatar que a CBP é um material cristalino e inerte, não tendo efeito pozolânico. De acordo com Raisdosfer (2015) a atividade pozolânica está relacionada aos teores de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  amorfos, visto que a fração vítrea é quem reage com a cal livre para formar compostos hidratados resistentes.

Jaturapitakkul et al. (2007) observou diminuição na resistência à compressão aos 28 dias em misturas com teor de substituição de 10% a 40% de cinza. Esse resultado foi para cinza com partículas maiores que a do cimento e foi atribuída a sua alta porosidade e consequente aumento da relação água/cimento do concreto, resultando em uma diminuição na resistência à compressão. Já Hamada et al. (2018) em sua revisão sobre o uso da cinza citou vários autores que encontram melhoras na resistência da compressão do concreto com teores de substituição de 10% a 30%, principalmente em idades mais avançadas, ressaltando que os resultados obtidos estão intimamente relacionados a finura e reatividade da cinza de cada estudo.

Ao analisarmos estatisticamente os resultados apresentados, aplicando o teste de Tukey e considerando apenas as interações entre os teores de substituição é possível identificar houve significância dos resultados de compressão (ver Figura 8 e Tabela 5). A taxa de substituição apresenta valor de P menor que 0.05 o que se considera como significativo, no entanto ao analisarmos as interações entre os teores de substituição e o concreto de referência é possível identificar que apenas as interações entre as taxas de substituição apresentam valores significativos, e ao compararmos os comportamentos do concreto de referência com a taxa de substituição de 7.5% identifica-se que o valor de P fica dentro do intervalo da análise, porém não

apresenta um valor significativo. O que corrobora que a influência maior no comportamento dos concretos é devido a relação a/c que altera diretamente na porosidade final do concreto e por via, em sua resistência.

**Figura 8** – Teste de Tukey para resistência à compressão.



Fonte: Autores (2021).

**Tabela 5** – ANOVA para resultados de compressão.

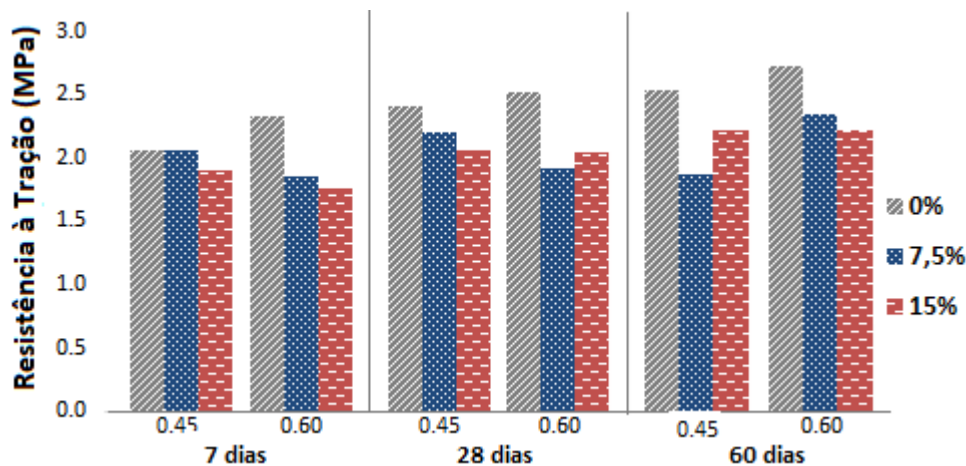
Fonte de Variação	Interações	Grau de Liberdade	Desvio Padrão	Variância	Valor de P	P<0.05
Taxas de substituições	46.14	14	4.075	16.60	0.0172	Significante

Fonte: Autores (2021).

### 3.1.3 Resistência à tração por compressão diametral

A Figura 9 apresenta os resultados adotados para análise onde em sua maioria a compressão diametral ficaram abaixo do estipulado pela norma NBR 6118 (ABNT, 2014), ou seja, aproximadamente 10% da resistência à compressão axial, com exceção da mistura com 15% de CBP e relação a/c de 0,45.

**Figura 9** – Resistência à tração por compressão diametral.



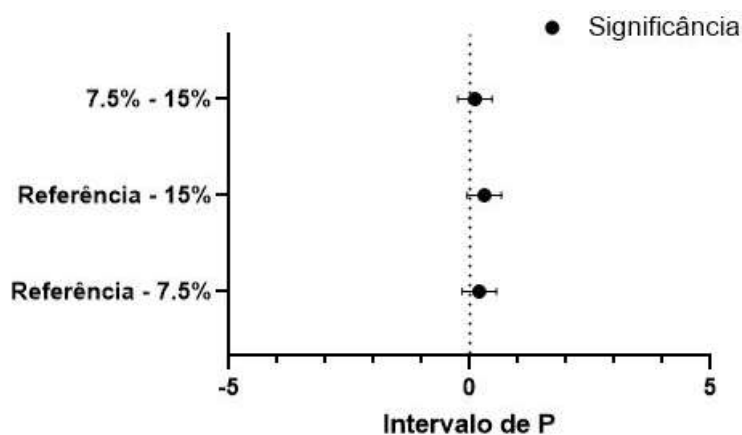
Fonte: Autores (2021).

Os traços de relação a/c 0,45 com teor de 7.5% e 15% obtiveram 95% e 93% da resistência do traço de referência respectivamente, aos 28 dias. Aos 60 dias esse percentual diminuiu para 88% e 91%, podemos considerar que a CBP não influenciou significativamente a resistência à tração como observamos na resistência à compressão axial. No traço de a/c 0,60, os concretos com substituição tiveram resultados abaixo da referência, sendo o teor de substituição de 15%, o pior resultado.

Islam (2016) em seu estudo com a cinza relatou menor resistência à tração dos traços com substituição em relação ao traço de referência e justificou que possivelmente a cinza não foi eficaz na melhoria da zona de transição entre agregado graúdo e pasta de cimento, logo a densificação ocasionada pelo efeito filer, principalmente na zona de transição, não proporcionou melhorias nesta propriedade. Pereira (2015) em seu estudo com adição de casca de arroz (CCA) também constatou não haver melhorias de resistência tração, em relação ao traço de referência.

A aplicação do teste de Tukey e da ANOVA apresentam não significância dos resultados de tração considerando apenas as interações entre as taxas de substituição o que corrobora com a literatura supracitada, conforme apresentado na Figura 10 e Tabela 6.

**Figura 10** – Teste de Tukey para resistência à tração.



Fonte: Autores (2021).

**Tabela 6** – ANOVA para resultados de tração.

Fonte de Variação	Interações	Grau de Liberdade	Desvio Padrão	Variância	Valor de P	P<0.05
Taxas de substituições	3.940	14	0.2372	0.056	0.1110	Não Significante

Fonte: Autores (2021).

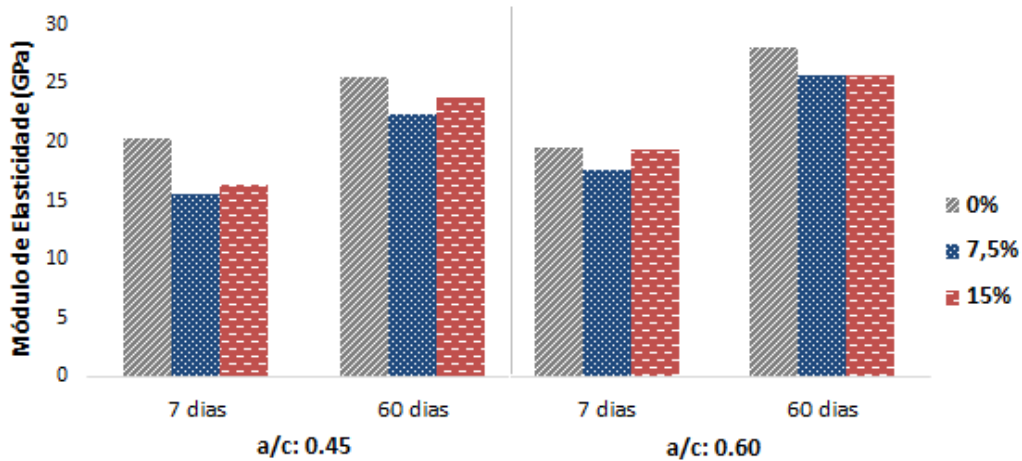
### 3.1.4 Módulo de elasticidade

A Figura 11 apresenta os resultados do módulo de elasticidade, onde o traço de referência com relação a/c de 0,45 tem resultado ligeiramente superior aos demais traços, o que condiz com os resultados da resistência à compressão axial. Porém, é possível verificar uma diferença mínima comparando todos os resultados aos 60 dias, sendo 15% e 7% a maior e menor diferença, respectivamente.

Esse resultado corrobora com o que foi constatado por Islam et al. (2016) onde houve uma pequena diminuição do módulo de elasticidade em todos os concretos com substituição de até 25% em relação a massa do cimento, concluindo que a cinza não tem efeito significativo no módulo de elasticidade do concreto.

Além disso, segundo Neville e Brooks (2013), no módulo de elasticidade os agregados têm influência no concreto, que advém do módulo de elasticidade do próprio agregado. Como todos os concretos do estudo foram feitos com os mesmos agregados, esperava-se que os valores de módulo não fossem divergir de forma significativa.

**Figura 11 – Módulo de elasticidade.**

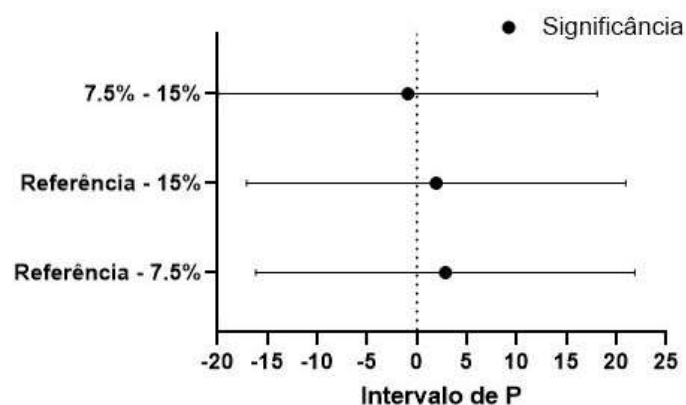


Fonte: Autores (2021).

Segundo Mehta e Monteiro (2014) existe uma relação direta entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, pois ambos são afetados pela porosidade das fases constituintes, porém não no mesmo grau. Isso corrobora com o que observamos na comparação entre os incrementos dos valores de compressão e módulo no intervalo das idades de 7 a 60 dias, onde para a compressão axial a taxa de incremento ficou em média em 14.8% enquanto no módulo 42.2%

Já no módulo de elasticidade a taxa de substituição apresenta valor de P menor que 0.05 (ver Figura 12 e Tabela 7) o considerando como significativo o que corrobora com os resultados anteriormente apresentados, onde a influência maior no comportamento dos concretos é devido a relação a/c impactando diretamente em sua resistência.

**Figura 12 – Teste de Tukey para resistência à tração.**



Fonte: Autores (2021).

**Tabela 7** – ANOVA para resultados de módulo de elasticidade.

Fonte de Variação	Interações	Grau de Liberdade	Desvio Padrão	Variância	Valor de P	P<0.05
Taxas de substituições	23.73	7	4.434	19.66	0.0028	Significante

Fonte: Autores (2021).

## 4. Conclusão

Com base na investigação realizada sobre a utilização da CBP como substituto parcial do cimento no concreto, as seguintes conclusões podem ser tiradas:

- Quanto ao estado fresco do concreto, quanto maior o teor de CBP maior foi o teor de aditivo, para chegar ao abatimento de  $120\pm 20$ mm. Evidenciando o aumento do consumo de água nas misturas com CBP;
- Não houve ganho de resistência mecânica em nenhum traço com teor de substituição em comparação com os traços de referência;
- Em relação à compressão axial, a substituição do cimento pela cinza se mostrou desvantajosa em concreto com relação a/c menor. No traço de a/c 0,45 com 7.5% e 15% de cinza tiveram resistências menores na idade de 3 dias;
- O concreto com 15% de cinza e relação a/c 0,60 obteve o melhor resultado entre os traços estudados, mostrando resistência mecânica semelhante ao traço de referência. Chegando a 96% e 93% da resistência à compressão axial e tração na compressão diametral, respectivamente;
- A CBP não teve influência na resistência à tração por compressão diametral em comparação à compressão axial;
- A CBP não teve influência nos resultados de módulo de elasticidade do concreto;
- Em função dos resultados obtidos, constatou-se a possibilidade do emprego da CBP em substituição parcial ao clínquer para a produção do cimento, contudo, é notório que existe a necessidade de mais estudos visando o seu emprego, sendo desta forma um notável passo de economia de clínquer e energia para a atual demanda social na indústria de concreto. Além disto, o emprego da cinza do resíduo de palma no cimento Portland apresenta-se como uma grande alternativa visando a solução de descarte, proporcionado uma gestão ambiental eficaz, bem como produção de concreto sustentável para as futuras gerações.

Com base nos resultados obtidos sugere-se que mais estudos sejam desenvolvidos para que a CBP possa ser utilizada em diferentes materiais na construção civil, tais como:

- Utilização da CBP como fonte de alumínio silicatos para a produção de geopolímeros;
- Aplicação como material de enchimento e estabilização física de solos;
- Produção de argamassas e concretos geopoliméricos através da ativação da CBP.

## Referências

- ABNT (2009) - NBR NM 53: *Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT (2003) - NBR NM 248: *Agregados - Determinação da composição granulométrica*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT (2017) - NBR 16605: *Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT (2016) - NBR 5738: *Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.



- ABNT (2020) - NBR 16889: *Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT (2015) - NBR 12655: *Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT (2018) - NBR 5739: *Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT (2011) - NBR 7222: *Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT (2017) - NBR 8522: *Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT (2015) - NBR 12653: *Materiais pozolânicos - Requisitos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT (2014) - NBR 6118: *Projeto de estruturas de concreto — Procedimento*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Abrão, P. C. R. A. (2018). *O uso de pozolanas como materiais cimentícios suplementares: disponibilidade, reatividade, demanda de água e indicadores ambientais* (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).
- Awal, A. A., & Shehu, I. A. (2013). Evaluation of heat of hydration of concrete containing high volume palm oil fuel ash. *Fuel*, 105, 728-731.
- Da Palma, D. Ó. (2018). Diagnóstico da produção sustentável da palma de óleo. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
- Fernandes, A. V. B., & Amorim, J. R. R. (2014). Concreto sustentável aplicado na construção civil. *Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-SERGIPE*, 2(1), 79-104.
- Fernandes, S. E., Tashima, M. M., Moraes, J. C. B. D., Istuque, D. B., Fioriti, C. F., Melges, J. L. P., & Akasaki, J. L. (2015). Cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBC) como adição mineral em concretos para verificação de sua durabilidade. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 20, 909-923.
- Foreign Agriculture Service do United States Department of Agriculture (USDA), 2016. <<https://www.fas.usda.gov/>>
- Furlan Júnior, J. (2006). Dendê: manejo e uso dos subprodutos e dos resíduos. *Embrapa Amazônia Oriental-Documentos (INFOTECA-E)*.
- Hamada, H. M., Jokhio, G. A., Yahaya, F. M., Humada, A. M., & Gul, Y. (2018). The present state of the use of palm oil fuel ash (POFA) in concrete. *Construction and Building Materials*, 175, 26-40.
- Recena, F. A. P. (1992). *Dosagem e controle da qualidade de concretos convencionais de cimento Portland*. Edipucrs.
- Hoppe, J., Souza, D. J., Medeiros, M. D., Pereira, E., & Portella, K. F. (2015). Ataque de matrizes cimentícias por sulfato de sódio: adições minerais como agentes mitigadores. *Cerâmica*, 61, 168-177.
- IBGE (2017). *Produção Agrícola – Lavoura permanente de 2017 – Estado do Pará*. <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/pesquisa/15/11934?localidade2=150275&localidade1=150795>>
- Islam, M. M. U., Mo, K. H., Alengaram, U. J., & Jumaat, M. Z. (2016). Mechanical and fresh properties of sustainable oil palm shell lightweight concrete incorporating palm oil fuel ash. *Journal of cleaner production*, 115, 307-314.
- Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., Tangchirapat, W., & Saeting, T. (2007). Evaluation of the sulfate resistance of concrete containing palm oil fuel ash. *Construction and Building Materials*, 21(7), 1399-1405.
- Johari, M. M., Zeyad, A. M., Bunnori, N. M., & Ariffin, K. S. (2012). Engineering and transport properties of high-strength green concrete containing high volume of ultrafine palm oil fuel ash. *Construction and Building Materials*, 30, 281-288.
- Koche, J. C. (2011). Fundamentos de metodologia científica.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. (2014). *Concreto-Microestrutura, Propriedades e Materiais*, Ibracon.
- Neville, A. M. (2013). *Tecnologia do concreto*. Bookman Editora.
- Pereira, A. M., Silva, C. A. R. D., Queiroz, D. C. D. A., Moraes, M. J. B. D., Melges, J. L. P., Tashima, M. M., & Akasaki, J. L. (2015). Estudo das propriedades mecânicas do concreto com adição de cinza de casca de arroz. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 20, 227-238.
- Civil, E. (2018). *Gabriela de Castro Polisseni* (Doctoral dissertation, UFRJ-Rio).
- Pereira, A. M., Silva, C. A. R. D., Queiroz, D. C. D. A., Moraes, M. J. B. D., Melges, J. L. P.,
- Raisdorfer, J. W. (2015). Influência da adição ou substituição de adições minerais ao cimento Portland: efeitos na carbonatação, absorção capilar e resistividade de concretos.
- Ribeiro, J. L. D., & Caten, C. T. (2001). Projeto de experimentos. *Porto Alegre: FEEng/UFRGS*.
- Tashima, M. M., & Akasaki, J. L. (2015). Estudo das propriedades mecânicas do concreto com adição de cinza de casca de arroz. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 20, 227-238.

Zeyad, A. M., Johari, M. A., Bunnori, N. M., Ariffin, K. S., & Altwair, N. M. (2013). Characteristics of treated palm oil fuel ash and its effects on properties of high strength concrete. In *Advanced Materials Research* (Vol. 626, pp. 152-156). Trans Tech Publications Ltd.

Zeyad, A. M., Johari, M. M., Tayeh, B. A., & Yusuf, M. O. (2016). Efficiency of treated and untreated palm oil fuel ash as a supplementary binder on engineering and fluid transport properties of high-strength concrete. *Construction and building materials*, 125, 1066-1079.