


## ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DO CAROÇO DE MACAÚBA COMO AGREGADO GRAÚDO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DURABILIDADE DE CONCRETOS ECOLÓGICO

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.909122430101>

*Data de aceite: 30/10/2024*

### **Denise Cardoso Guimarães**

Professora Mestre em Engenharia Civil,  
UNITPAC

### **Adriano Luiz Roma Vasconcelos**

Professor Mestre em Engenharia Civil,  
UNITPAC

### **Ana Beatriz Maciel Nascimento**

Estudante de Graduação em Engenharia  
Civil, UNITPAC

### **Nillya Rocha da Silva**

Estudante de Graduação em Engenharia  
Civil, UNITPAC

### **Vinícios Rodrigues Brito**

Estudante de Graduação em Engenharia  
Civil, UNITPAC

durabilidade de concretos confeccionados utilizando-se esse material em substituição parcial ao agregado natural. Assim sendo, serão produzidos compósitos com teores de 10%, 15% e 20% de caroço de macaúba em substituição ao agregado tradicional, buscando obter um concreto especial que apresente características semelhantes aos concretos convencionais. Para a análise das propriedades no compósito, foram executados os ensaios de avaliação da massa específica dos agregados miúdos NBR NM 52 (ABNT, 2009) e graúdos NBR NM 53 (ABNT, 2009), os ensaios de massa unitária dos agregados NBR 16972 (ABNT, 2021) e a análise granulométrica NBR 7181 (ABNT, 2016). Para os traços e análises dos corpos de prova serão feitos os ensaios de consistência do concreto no estado fresco pelo abatimento do tronco de cone NBR 16889 (ABNT, 2020), bem como a resistência à compressão axial NBR 5738 (ABNT, 2018) e o de resistência à tração por compressão diametral NBR 7222 (ABNT, 2011). Atingiu-se, com o teor de 10%, resultados de desempenho satisfatórios aos 7 dias, esperando-se manter este comportamento mecânico também aos 28 dias de cura.

**PALAVRAS-CHAVE:** Agregado Graúdo; Caroço De Macaúba; Durabilidade; Sustentabilidade.

**RESUMO:** Os agregados graúdos quando extraídos podem ser prejudiciais ao meio ambiente, a fabricação de materiais que apresentam características que unem sustentabilidade e bom desempenho mostra-se o grande desafio dos pesquisadores. Nesse sentido, surge a macaubeira, uma palmácea encontrada no cerrado brasileiro, possui uma estrutura rígida e particularidades que a transformam em objeto desse estudo, que tem como intuito avaliar o comportamento mecânico e de

# ANALYSIS OF THE REPLACEMENT OF MACAÚBA SEEDS AS COARSE AGGREGATE IN THE MECHANICAL PROPERTIES AND DURABILITY OF ECOLOGICAL CONCRETES

**ABSTRACT:** When coarse aggregates are extracted, they can be harmful to the environment. The manufacture of materials that have characteristics that combine sustainability and good performance is a major challenge for researchers. In this sense, the macaubeira appears, a palm found in the Brazilian cerrado, has a rigid structure and particularities that make it the object of this study, which aims to evaluate the mechanical behavior and durability of concrete made using this material as a partial replacement to the natural aggregate. Therefore, composites will be produced with 10%, 15% and 20% macaúba seed contents to replace traditional aggregate, seeking to obtain a special concrete that presents characteristics similar to conventional concrete. To analyze the properties of the composite, tests were carried out to evaluate the specific mass of fine aggregates NBR NM 52 (ABNT, 2009) and coarse aggregates NBR NM 53 (ABNT, 2009), unit mass tests of aggregates NBR 16972 (ABNT, 2021) and particle size analysis NBR 7181 (ABNT, 2016). For the traces and analysis of the specimens, concrete consistency tests will be carried out in the fresh state by slumping the frustum cone NBR 16889 (ABNT, 2020), as well as the axial compression resistance NBR 5738 (ABNT, 2018) and the of tensile strength by diametral compression NBR 7222 (ABNT, 2011). With the 10% content, satisfactory performance results were achieved after 7 days, and it is expected to maintain this mechanical behavior also after 28 days of curing.

**KEYWORDS:** Large Aggregate; Macaúba Seed; Durability; Sustainability.

## INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil desempenha um papel crucial na economia global, mas seus impactos ambientais são significativos, afetando diretamente a sociedade. Estatísticas revelam que o setor consome uma parcela substancial dos recursos naturais, energia e gera uma considerável quantidade de resíduos e emissões de gases de efeito estufa. Neste contexto, surge a necessidade premente de buscar alternativas mais sustentáveis para os materiais de construção, visando mitigar esses impactos ambientais.

Este estudo concentra-se na análise do endocarpo do fruto da *Acrocomia aculeata*, conhecido como “macaúba”, como um potencial material alternativo para a produção de concretos sustentáveis. Este material apresenta propriedades que se assemelham aos agregados convencionais, abrindo portas para sua utilização na composição de concretos com menor impacto ambiental.

O concreto, como um dos materiais mais amplamente utilizados no mundo, é responsável por uma grande demanda por recursos naturais, incluindo agregados minerais, além de gerar impactos significativos durante seu processo de produção, como as emissões de gases poluentes e resíduos líquidos das siderúrgicas.

Uma alternativa promissora para mitigar esses impactos é a adição de fibras de caroço de açaí na composição do concreto, reduzindo a necessidade de aço em concretos armados. Isso não apenas diminui a demanda por recursos finitos, mas também oferece uma destinação apropriada para resíduos agroindustriais.

Assim, a implementação de resíduos agroindustriais como substitutos dos agregados convencionais no concreto representa uma área de pesquisa emergente, que tem despertado interesse tanto de universidades quanto de pesquisadores em todo o mundo. Essa abordagem não só busca reduzir a dependência de recursos naturais finitos, mas também contribui para a mitigação dos impactos ambientais associados à produção de materiais de construção.

O projeto teve como intuito realizar uma avaliação técnica do desempenho mecânico e da durabilidade de concretos, utilizando ensaios de resistência à compressão axial, tração por compressão diametral e absorção por capilaridade. Investigar as diferenças nas propriedades mecânicas dos concretos feitos com diferentes teores (10%, 15% e 20%) de caroço de macaúba em substituição ao agregado graúdo natural. Avaliar como esses teores afetam as propriedades no estado fresco dos concretos e contribuir para a redução de impactos ambientais, adotando conceitos e características da engenharia verde na produção de concretos sustentáveis com o uso do caroço de macaúba.

## REFERENCIAL TEÓRICO

### **Acromia aculeata (Macaúba)**

No cerrado brasileiro é encontrada uma grande diversidade de plantas frutíferas nativas ou adaptadas com grande potencialidade para o aproveitamento agroindustrial (SANJINEZ-ARGANDOÑA; CHUBA, 2011). Nesse contexto, está inserida a *Acromia aculeata*, popularmente conhecida como macaúba, palmeira que atinge até 15 m e cujos frutos são bastante apreciados na alimentação, tanto da fauna, quanto dos seres humanos.

Segundo Zanata (2015), a macaúba é uma palmeira nativa do Brasil com ocorrência ao longo das Américas Tropical e Subtropical. No Brasil, encontra-se principalmente nos estados de Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Tocantins, tendo grande importância para algumas comunidades extrativistas dessas localidades (LORENZI, 2006).

Ainda, segundo Zanata (2015), os frutos da macaubeira possuem formato achatado e têm diâmetro variando de 2,5 a 5 cm. Os frutos são divididos em quatro partes: epicarpo (casca), mesocarpo (polpa), endocarpo e amêndoa, cujas porcentagens na composição total do fruto são, respectivamente, 21%, 38%, 34% e 7%.

Há uma infinidade de estudos que apontam as grandes potencialidades de aproveitamento da macaúba, as quais vão desde a utilização na alimentação até o uso como fonte de bioenergia. Segundo a Embrapa (2013) a *Acromia aculeata* tem se destacado como uma das espécies mais promissoras como fonte de óleo para o biodiesel e bioquerosene, cuja produção é crescente no Brasil. As principais fontes de matéria-prima para a produção dos biocombustíveis no País são o óleo de soja e a gordura bovina – no caso do biodiesel, representavam respectivamente 74% e 20% em setembro de 2014, de acordo com a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2014).

Em comparação a outras plantas oleaginosas, como a soja por exemplo, a macaúba possui uma maior produtividade de óleo por hectare plantado, o que torna essa espécie muito atrativa para as empresas que fabricam esse produto, as quais são as maiores financiadoras das pesquisas relacionadas ao uso da macaúba como matéria prima para a produção de biodiesel e outras potencialidades da espécie (EMBRAPA, 2013).

Vários estudos têm demonstrado o grande potencial calorífico do endocarpo da macaúba (PRADO; SANTOS, 2017). Esse componente representa em média 33% do peso total da fruta e apresenta uma grande dureza e resistência, sendo impossível o seu rompimento sem o auxílio de alguma ferramenta abrasiva.

Lorenzi (2006) citando algumas utilizações da macaúba por comunidades tradicionais do Mato Grosso se refere a substituição da brita pelo caroço integral da fruta no concreto em construção locais nessas regiões, mas não faz nenhuma referência ao desempenho mecânico destes compósitos. Tal incorporação se deu apenas por indisponibilidade do agregado natural na região, não apresentando qualquer embasamento técnico-científico.

## **Definição de Concreto**

A definição de concreto varia entre os autores pesquisados, mas todas se assemelham quando dizem que este é um material compósito formado basicamente por um aglomerante hidráulico, água e agregados (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2015).

Bassin (1998) diz que o concreto é considerado tradicionalmente como um material formado por agregados envoltos em uma matriz de cimento e que suas propriedades mecânicas estão diretamente relacionadas como as propriedades dos referidos componentes básicos, da proporção entre eles e das características físico-químicas da sua interface.

Já para Pinheiro et. al. (2010) o concreto simples é formado por uma mistura homogênea de cimento, água, agregado graúdo (geralmente brita) e agregado miúdo (geralmente areia) cujas principal característica esperada após o endurecimento é uma boa resistência à compressão.

## **Agregados**

A NBR 9935 (ABNT, 2011) define agregado como um material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para a confecção de concretos e argamassas.

Esses materiais ocupam em média 75% do volume total do concreto e algumas de suas características influenciam diretamente nas propriedades deste compósito. Segundo Vasconcelos (2016) as características dos agregados que mais importam na determinação do desempenho dos concretos incluem composição granulométrica, porosidade, absorção de água, forma e textura superficial das partículas.

Os agregados tradicionalmente empregados no concreto são de origem natural, extraídos de jazidas. Porém, como se trata de um material com função primordial de enchimento, torna-se possível a substituição do mesmo por outros materiais com características semelhantes.

Nesse contexto, encontrou-se na literatura pesquisada uma série de estudos que visam o reaproveitamento de resíduos como agregados no concreto, tendo em vista a sustentabilidade e a questão técnico-econômica.

## **Durabilidade**

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014) a durabilidade de uma estrutura é a sua capacidade de resistir às interferências ambientais previstas em projeto, sempre conservando sua integridade física, promovendo segurança a seus ocupantes e mantendo desempenho adequado durante sua vida útil.

Um dos fatores que mais influenciam na durabilidade de uma estrutura é a presença de água no meio em que ela se encontra. Em fundações, a entrada de água por capilaridade ocorre devido à presença de água no solo e à falta de obstáculos que impeçam sua passagem

## **METODOLOGIA**

A princípio foi necessário a coleta da matéria prima, logo depois deu-se início a limpeza e retirada do insumo (Figura 01) para garantir que usássemos apenas o caroço da macaúba. Em seguida, foi preciso começar pelo processo de caracterização dos materiais, onde foram feitos os ensaios para garantir a qualidade e caracterizar os componentes a serem utilizados na mistura.



Figura 1: Limpeza dos caroços de macaúba. Fonte: Próprio Autor, 2023.

O primeiro ensaio a ser desenvolvido em laboratório foi o da massa unitária dos agregados NBR 16972 (ABNT, 2021), onde os agregados grãos e miúdos foram pesados a fim de determinar sua massa unitária a partir da relação entre massa e volume. Para determinar a massa específica dos agregados miúdos NBR NM 52 (ABNT, 2009) utiliza-se o Método do Frasco de Chapman que por meio de um frasco calibrado e graduado, contendo inicialmente 200 cm<sup>3</sup> de água, coloca-se uma amostra de 500 g de areia seca (Figura 2).



Figura 2: Método do Frasco de Chapman. Fonte: Próprio Autor, 2024.

Já para a massa específica do agregado grão NBR NM 53 (ABNT, 2009), analisou-se a massa do agregado seca e úmida (Figura 3).



Figura 3: Pesagem do agregado graúdo úmido. Fonte: Próprio Autor, 2024.

Na sequência a massa específica do cimento NBR 16605 (ABNT, 2017), por meio do frasco volumétrico de Le Chatelier (Figura 4), coloca-se a amostra de cimento dentro do frasco, para isso utilize o funil de haste curta, em pequenas proporções atentando para que não ocorra aderência de cimento nas paredes internas do frasco, obtendo o resultado dividindo a massa de cimento introduzida pela diferença de volume provocada pela adição do cimento.



Figura 4: Frasco de Le Chatelier. Fonte: Próprio Autor, 2024.

Bem como a análise granulométrica que de acordo com a NBR 17054 (ABNT, 2022) pode ser determinada por meio de ensaios de peneiramento em laboratório, as partículas retidas em cada peneira são pesadas, e esses dados são usados para calcular a porcentagem de material em cada faixa de tamanho, que ilustra a distribuição das partículas de acordo com o tamanho.

Após a caracterização dos materiais deu-se início a mistura do primeiro traço 1:2:3 sem a substituição parcial da macaúba, onde foram utilizados 15,70kg de cimento, 32,68 de areia, 44,30 de brita e 8,32kg de água, ao rodar o traço foi feito o ensaio de consistência do concreto no estado fresco pelo abatimento do tronco de cone NBR 16889 (ABNT, 2020), e em seguida moldado 20 corpos de prova que aguardaram em cura úmida o rompimento dos corpos de prova de 7 dias e 28 dias (Figura 5).



Figura 5: Corpos de prova. Fonte: Próprio Autor, 2024.

Logo depois do primeiro traço foi feito o traço com a substituição parcial de 10% do agregado graúdo por caroços de macaúba, com o caroço sem um tamanho padrão já que foi utilizado in natura, sendo assim a dosagem foi composta por 15,70kg de cimento, 32,68 de areia, 39,87 de brita, 1,94kg dos caroços de macaúba e 8,32kg de água, após a mistura e moldagem dos corpos de prova, eles repousaram em cura úmida aguardando o rompimento dos corpos de prova aos 7 dias e 28 dias. A fim de sanar o inchamento causado pela absorção do caroço de macaúba, que conseqüentemente gera fissuras por expansão volumétrica em concreto, utilizou-se a técnica de pré-molhagem por 24 horas antes da concretagem (Figura 6).



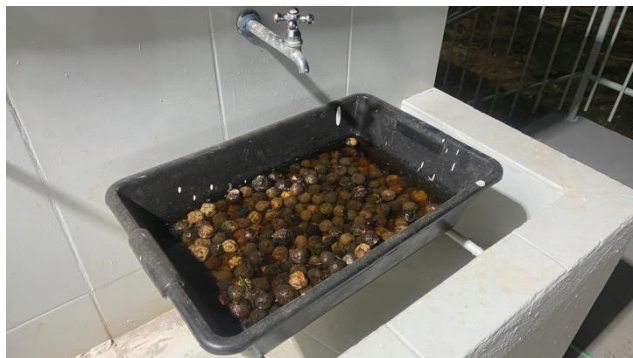


Figura 6: Carochos da macaúba saturados por 24h. Fonte: Próprio Autor, 2024.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para fins de avaliação, deve-se evidenciar que a absorção de água por este tipo de material e o índice de vazios é maior comparado ao agregado natural, pois há uma redução em parâmetros como, massa específica, relação água cimento e permeabilidade. Há um aumento na fluidez e na habilidade passante em teores de substituição acima de 50% para fração miúda e até 50% para graúda (CAMPOS et al., 2018; FROTTE et al., 2017 apud SANTOS et al., 2020).

Diante disso, as tabelas a seguir mostram os resultados a partir dos ensaios de caracterização dos compósitos utilizados para a confecção tanto do concreto de agregado graúdo britado quanto com incorporação parcial de 10%.

### Caracterização dos agregados

Os resultados encontrados nos ensaios de determinação da massa unitária e da massa específica dos agregados são apresentados na Tabela 1.

MASSA UNITÁRIA			
Areia grossa		Brita 1	
Peso de bandeja (g)	500,00	Peso de bandeja (g)	2940,00
Bandeja + areia (g)	4060,00	Bandeja + brita (g)	31070,00
Peso da areia (g)	3560,00	Peso da brita (g)	28130,00
<b>Massa unitária (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>1,519</b>	<b>Massa unitária (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>1,417</b>
MASSA ESPECÍFICA			
Areia grossa		Brita 1	
Quantidade de água (ml)	200	Peso do recipiente (kg)	3,76
Quantidade de areia (g)	500	1m1l Quantidade de brita (kg)	28,38
Nível de água com areia (ml)	389	1m2l Água com brita (kg)	38,02
Volume final – Volume inicial (ml)	189	M2 - M1	9,64
<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>2,646</b>	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>2,944</b>

Tabela 1: Massa unitária e massa específica dos agregados

Autores (2024)

A tabela apresenta o detalhamento e caracterização dos ensaios executados resultando em um valor esperado e satisfatório visto ao material utilizado.

### Influência da incorporação no estado fresco

Buscando avaliar a influência da incorporação do agregado graúdo especial de macaúba (AGEM) estudado nas propriedades frescas, realizou-se o ensaio de avaliação da consistência, cujo resultados são apresentados na Figura 7.

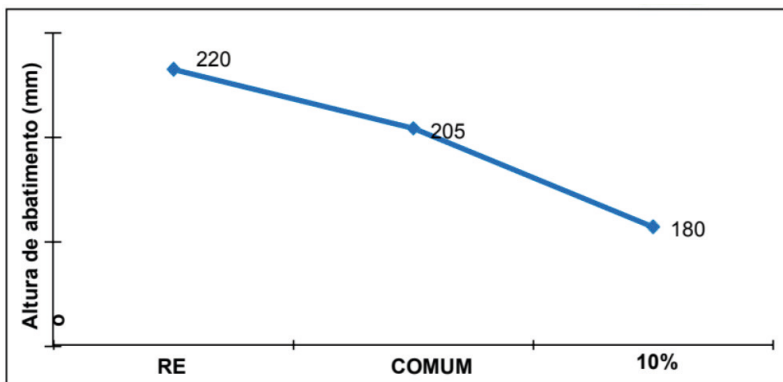


Figura 7: Abatimento (Slump Test). Fonte: Próprio Autor, 2024.

Apesar de possuir geometria esférica (Índice de Forma = 1,10), a da técnica de pré-molhagem para confecção dos concretos resultou em uma redução de cerca de 12,50% nos valores de abatimento. Pois a água absorvida pelo agregado especial estudado acaba por não colaborar com a consistência da massa de concreto.

### Caracterização do Cimento Portland

Os resultados encontrados nos ensaios de determinação da massa específica do cimento são apresentados na Tabela 2.

MASSA ESPECÍFICA CIMENTO CP II TOCANTINS	
Quantidade de querosene (ml)	1,00
Quantidade de cimento (g)	60,00
Nível de água com cimento (ml)	21,70
Volume final – Volume inicial (ml)	20,70
<b>Peso específico (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>2,899</b>

Tabela 2: Massa específica do cimento

Autores (2024)

## Propriedades no estado endurecido

### *Resistência à compressão axial*

Os valores foram obtidos através do ensaio como mostra a figura 8, foi executado aos 7 e 28 dias para os corpos de prova de referência



Figura 8: Ensaio de compressão axial. Fonte: Próprio Autor, 2024.

O ensaio foi executado sob os preceitos da NBR 5738 (ABNT, 2018), e os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 3.

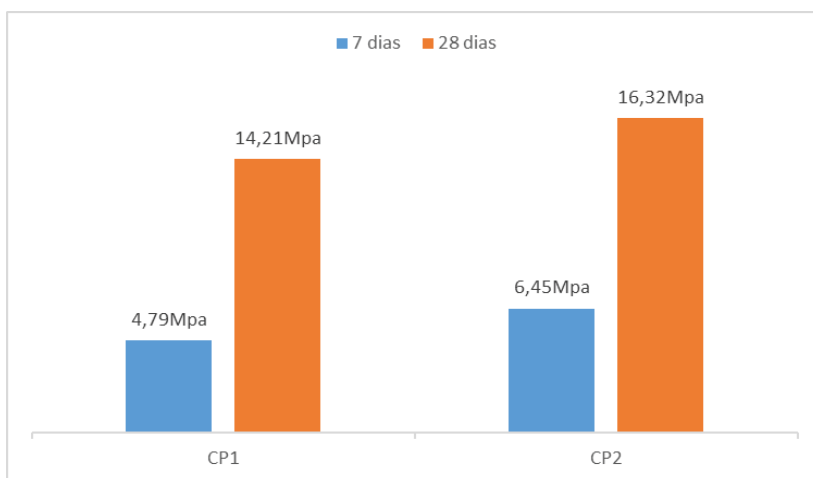


Tabela 3: Resistência a compressão  
Autores (2024)

Nota-se que o concreto apresentou resistência insatisfatória quanto ao  $F_{ck}$  de dosagem, todavia apesar de não ter atingido resistência para ser utilizado como concreto estrutural, o mesmo pode ser aplicado em concretos com fins não estruturais, como por exemplo o meio-fio, dentre outros.

#### *Resistência à tração por compressão diametral*

O ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral no componente do corpo de prova da substituição parcial de 10%, aos 7 dias, como mostrado na Figura 8 foi regido pela NBR 5738 (ABNT, 2018), e seus resultados estão apresentados na Figura 9.



Figura 8: Ensaio de tração por compressão diametral. Fonte: Próprio Autor, 2024.

O concreto com incorporação parcial obteve o desempenho esperado no rompimento dos corpos de prova aos 7 dias e teve um resultado relativamente bom aos 28 dias, sendo assim uma boa opção para concreto não estrutural.

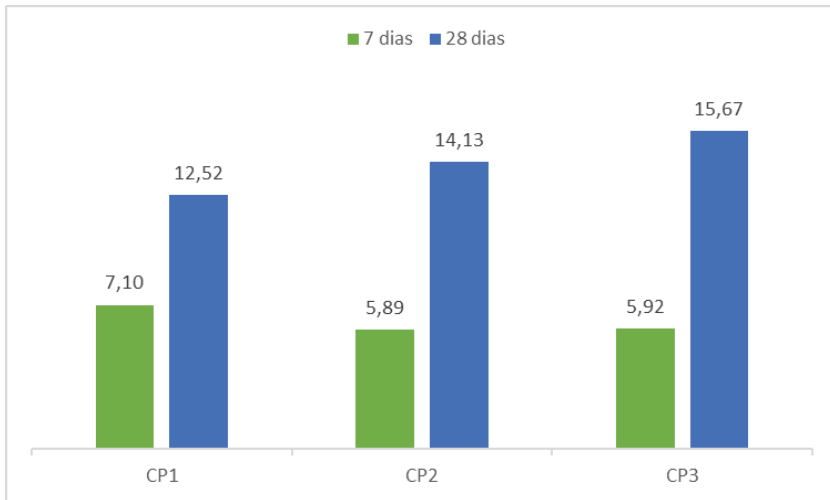


Figura 9: Resistência média a compressão diametral aos 7 dias (AUTORES (2024))

A Figura 10 apresenta um corpo de prova com substituição parcial de 10% rompido à tração por compressão diametral, onde é possível observar o caminho de fissuração na interface entre o agregado especial e a massa.



Figura 10: Corpo de prova rompido em corte longitudinal. Fonte: Próprio Autor, 2024

## CONCLUSÕES

Dessa maneira foi possível observar os diferentes comportamentos dentro de cada especificidade do concreto, há uma diminuição do abatimento quando incorporado o caroço de macaúba que pode ser justificado pela grande absorção que este agregado especial possui, que consequentemente diminui a água de amassamento que contribui para a consistência do concreto.

Nas avaliações das propriedades mecânicas no estado endurecido, constatou-se que o concreto de agregado graúdo brita não atingiu a resistência necessária de um concreto estrutural, fato que pode ter ocorrido devido alguma falha mecânica no processo de execução do traço. O que se dá ao concreto de agregado incorporado, com um teor de substituição de 10%, pode-se notar com o rompimento dos corpos de prova aos 7 dias, que se atingiu uma resistência favorável ainda que baixa na resistência de tração por compressão diametral, atingindo até 7,10Mpa.

Já o rompimento aos 28 dias atingiu até 15,67Mpa, diante disso pode-se notar um potencial significativo em relação a viabilidade técnica da substituição neste teor, considerando que os testes com o teor de substituição de 15% e 20% estão em desenvolvimento para determinar a eficiência em termos de resistência mecânica, e se a incorporação desse elemento natural é viável, tanto de forma técnica, quanto social e ambiental.

## REFERÊNCIAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR 9935: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 6118:2014 - Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

BITTENCOURT, T. N.. **Estudo experimental do fraturamento do concreto estrutural por meio de corpos de prova cilíndricos**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

Caracterização biométrica, física e química de frutos da palmeira bociauva *Acrocomia aculeata* (Jacq) Lodd COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **CEB-FIP Model Code 1990**. London, Thomas Telford, 1993.

CORNELL FRACTURE GROUP. **Franc3D Menu & Dialog Reference**. Cornell University, Ithaca, 1998.

FERNANDES, C. A., et al.. Reforço de pilares de elevado do metrô de São Paulo, **41º Congresso Brasileiro do Concreto**. São Paulo, IBRACON, 1999.

NEPA. Núcleo de Estudos e Pesquisas em Alimentação. **Tabela brasileira de composição de alimentos**: versão II. Campinas: NEPA-UNICAMP, 2006.105p.

**NBR 5739:** Ensaios de Compressão Corpo de prova Cilíndrico. Comitê ABNT/CB- 018 Cimento, Concreto e Agregado. 9 páginas, 2018.

**NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Comitê: ABNT/CB- 18 Cimento, Concreto e Agregados. 6 páginas, 2009.

**NBR NM 53:** Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Comitê: ABNT/CB-18 Cimento, Concreto e Agregados. 8 páginas, 2009.

PEREIRA, E. A., QUEIROZ, A. J. DE M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F. Massa específica de polpa de açaí em função do teor de sólidos totais e da temperatura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.3, p.526-530, 2002.

SANTOS, F. S. dos; AZEREDO, P. H. de A.; VENEU, D. M. Avaliação de concreto sustentável contendo teores de resíduos de agregados reciclados / Evaluation of sustainable concrete containing contents of recycled aggregate residues. **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 6, n. 7, p. 45457–45471, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n7-244. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/12996>. Acesso em: 23 aug. 2024.

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.