

## Estudo de desempenho de concretos estruturais produzidos com agregados reciclados mistos

JÚLIO CÉZAR DE MENDONÇA UCHÔA – DOUTORANDO – <https://orcid.org/0009-0004-1855-6928> (julio.uchoa@ctec.ufal.br)  
KAROLINE ALVES DE MELO MORAES – PROF.<sup>a</sup> DR.<sup>a</sup>; WAYNE SANTOS DE ASSIS – PROF. DR.; JOÃO PEDRO DE ARAÚJO LIMA – GRADUANDO;  
LETÍCIA SILVA DA COSTA CASTRO – GRADUANDA; DAIANA SANTOS PRIMO – GRADUANDA – UFAL

### RESUMO

CONSIDERANDO O VOLUME SUBSTANCIAL DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) GERADOS PELO SETOR DA CONSTRUÇÃO, JUNTAMENTE COM O ESGOTAMENTO CRESCENTE DE AGREGADOS NATURAIS (AN), HÁ UMA URGÊNCIA DE ALTERNATIVAS SUSTENTÁVEIS. UMA POSSIBILIDADE É A UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS MISTOS (ARM) PROVENIENTES DE RCD. ESTE ARTIGO TEM COMO OBJETIVO AVALIAR A VIABILIDADE ESTRUTURAL DO CONCRETO INCORPORANDO ARM EM SEIS MISTURAS DE CONCRETO, SUBSTITUINDO 20% E 50% DO AN POR ARM E INCORPORANDO 20% DE METACAULIM (MK). AS PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO FORAM EXAMINADAS POR MEIO DE ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E ABSORÇÃO DE ÁGUA CAPILAR. OS RESULTADOS INDICARAM UMA REDUÇÃO NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO COM O AUMENTO DO TEOR DE ARM, EMBORA O MK TENHA AUMENTADO A RESISTÊNCIA E REDUZIDO A ABSORÇÃO DE ÁGUA CAPILAR, DEMONSTRANDO SEU PAPEL BENÉFICO NAS FORMULAÇÕES DE CONCRETO SUSTENTÁVEIS.

**PALAVRAS-CHAVE:** CONCRETO ESTRUTURAL, AGREGADO RECICLADO MISTO GRAÚDO, ESTATÍSTICA, METACAULIM, SUSTENTABILIDADE.

### 1. INTRODUÇÃO

Diante da crescente geração de resíduos de construção e demolição (RCD) e da escassez de agregados naturais, os agregados reciclados mistos (ARM) configuraram-se como uma alternativa sustentável promissora para a construção civil, especialmente em concretos, onde contribuem para a redução dos impactos ambientais e o aproveitamento de materiais anterior-

mente descartados.

Os agregados reciclados mistos são naturalmente heterogêneos; suas principais características incluem maior porosidade, capacidade de absorção de água superior e maior teor de material pulverulento, o que, juntamente com sua forma irregular, reduz a trabalhabilidade e pode diminuir a resistência mecânica do concreto (1).

Os ARM apresentam alta porosidade, com isso absorvem mais água por capilaridade em comparação aos concretos convencionais, algo esperado em decorrência da elevada porosidade (2). O mesmo autor comenta que a utilização do ARM, no que tange à resistência à compressão em sua composição, demonstra um resultado satisfatório aos 28 dias, com um resultado mínimo de 20 MPa.

Ao incorporar o metacaulim no concreto com uso de ARM, observa-se um aumento na resistência à compressão, com valores próximos da referência, devido ao alto teor de finos deste material suplementar ao cimento (3). Em contrapartida, os mesmos autores comentam que a substituição parcial do cimento por metacaulim reduz o valor do abatimento.

Este estudo avalia o desempenho de concretos produzidos com agregado reciclado misto graúdo (ARM<sub>g</sub>), verificando a influência do ARM<sub>g</sub> no comportamento do concreto no estado endurecido, através dos ensaios de absorção de água por capilaridade e de resistência à compressão, trazendo uma abordagem estatística para a análise dos resultados.

Com relação às normativas brasileiras, a atualização da norma NBR 15116 (4) permitiu apenas o uso de agregados

reciclados de concreto (ARCO) para aplicações estruturais, entretanto alguns trabalhos verificaram a possibilidade de uso do ARM em aplicações estruturais (1)(2)(3). Porém, a heterogeneidade inerente desses, particularmente dos agregados reciclados mistos graúdos (ARM<sub>g</sub>), continua sendo um desafio significativo. Por esse fator, mais pesquisas são necessárias para compreender a heterogeneidade do ARM<sub>g</sub>, que apresenta desafios para a viabilidade estrutural. Dessa forma, este estudo foi impulsionado pela lacuna de pesquisa existente na temática da aplicação estrutural de ARM<sub>g</sub>, tanto no Brasil quanto no mundo, abordando a necessidade de compreender suas diversas propriedades. Além disso, em regiões como os bairros de Maceió/AL, afetados pelo afundamento do solo, o aproveitamento dos resíduos de edificações demolidas para a construção sustentável poderá auxiliar na recuperação econômica e na revitalização dessas áreas. Consequentemente, a relevância deste estudo é ressaltada tanto por um imperativo global de práticas de construção sustentáveis quanto por necessidades locais específicas.

### 2. METODOLOGIA

O presente estudo é caracterizado como uma pesquisa experimental, inerentemente estruturada para avaliar hipóteses vinculadas às suposições dos pesquisadores, empregando grupos de controle, amostragem estocástica e manipulação de variáveis. Esta categoria de pesquisa visa extrair inferências gerais por meio de técnicas de amostragem específicas executadas durante a análise.

De acordo com os objetivos propostos no presente estudo, foi elaborado e desenvolvido um planejamento experimental, estabelecendo-se o fator de controle. Esse planejamento foi pensado considerando a disponibilidade dos recursos e seguindo um cronograma de execução.

Esta pesquisa aplicou as fases do método estatístico implementada por Montgomery (5), progredindo por quatro fases: definição do problema/objetivo; planejamento da coleta de dados qualitativos-quantitativos com métodos mistos; organização dos dados/análise estatística (identificação de padrões); e formulação de conclusões alinhadas aos objetivos, garantindo o rigor metodológico da investigação.

Em concordância com Montgomery (5), a execução e sucesso do planejamento de experimentos dependerão de como ele é estruturado e realizado. Para o presente estudo, foi utilizado o planejamento fatorial (Equação 1). A execução desse planejamento possibilitou a realização de análises estatísticas com maior significância.

$$[1] n^k$$

Onde:

$n$  = número de níveis;

$k$  = número de fatores.

As etapas experimentais desenvolvidas ao longo do trabalho foram:

- ▶ Seleção e caracterização dos materiais;
- ▶ Estudo de dosagem;
- ▶ Produção dos concretos e moldagem de corpos de prova;
- ▶ Avaliação dos concretos no estado endurecido em relação à absorção de água por capilaridade e resistência à compressão.

## 2.1 Fatores de controle: tipos de concreto x idade do concreto

Os ensaios realizados nessa categoria de fatores foram o ensaio de resistência à compressão e o ensaio de absorção de água por capilaridade.

Os fatores analisados são: tipos de concreto e idade do concreto. O fator “tipo de concreto” tem 6 níveis para todos os ensaios, sendo descritos no Quadro 1. O fator “idade do concreto” tem 2 níveis, sendo 7 dias e 28 dias para resistência à

compressão e 28 dias para absorção de água por capilaridade.

Quanto à variável resposta “ensaio de resistência à compressão”, utilizando a fórmula do planejamento fatorial (Equação 1), é observado 1 fator com 6 níveis e 1 fator com 2 níveis, além da consideração de 3 réplicas. Portanto, ao menos 36 espécimes foram necessários para realização das análises estatísticas, conforme o cálculo, mostrado na Equação 2.

$$[2] \text{Tamanho da amostra} = 6^1 * 2^1 * 3 = 36 \text{ unidades}$$

O Quadro 2 mostra o programa fatorial para o ensaio de resistência à compressão.

Quanto à variável resposta “ensaio de absorção de água por capilaridade”, utilizando a fórmula do planejamento fatorial, Equação 1, é observado 1 fator com 6 níveis e 1 fator com 1 nível, além da consideração de 3 réplicas, portanto ao menos 18 espécimes foram necessários para realização das análises estatísticas, conforme Equação 3.

$$[3] \text{Tamanho da amostra} = 6^1 * 1^1 * 3 = 18 \text{ unidades}$$

O Quadro 3 mostra o programa fatorial para o ensaio de absorção de água por capilaridade.

## 2.2 Caracterização dos materiais

O cimento utilizado foi o CP V-ARI, que possui massa específica de 3040 kg/m<sup>3</sup> e resistência à compressão de 48,70 MPa aos 28 dias. Esse cimento foi utilizado para compensar a perda de resistência esperada devido ao emprego de AR.

Como agregados, foram utilizados: agregado natural miúdo (AN<sub>m</sub>), agregado natural graúdo (AN<sub>g</sub>) e agregado reciclado misto graúdo (ARM<sub>g</sub>).

O agregado natural miúdo (AN<sub>m</sub>) é uma areia grossa, com módulo de finura de 2,45, dimensão máxima de 4,75 mm, massa unitária no estado compactado de 1620 kg/m<sup>3</sup>, massa unitária no estado solto de 1500 kg/m<sup>3</sup>, massa específica de 2510 kg/m<sup>3</sup>, absorção de água de 0,60% e teor de material pulverulento de 2,68%.

O agregado natural graúdo (AN<sub>g</sub>) tem módulo de finura de 4,71, dimensão máxima de 19 mm, massa unitária no estado compactado de 1530 kg/m<sup>3</sup>, massa unitária no estado solto de 1450 kg/m<sup>3</sup>, massa

específica de 2670 kg/m<sup>3</sup> e absorção de água de 0,30%.

O agregado reciclado misto graúdo (ARM<sub>g</sub>) tem dimensão máxima de 25 mm, massa unitária no estado compactado de 1160 kg/m<sup>3</sup>, massa unitária no estado solto de 1100 kg/m<sup>3</sup>, massa específica de

### QUADRO 1

FATOR TIPOS DE CONCRETO

Sigla	Detalhamento
FC	Concreto convencional (CV)
FC2	CV + metacaulim (MK)
FC3	20% de Agregado Reciclado Misto Graúdo (ARM <sub>g</sub> )
FC4	20% de ARMg + 20% de MK
FC5	50% de ARMg
FC6	50% de ARMg + 20% de MK

FONTE: AUTORES (2024)

### QUADRO 2

PROGRAMA FATORIAL PARA O ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Tipos de concreto	Quantidade de espécimes por idade		Total de espécimes
	7 dias	28 dias	
FC	3	3	36
FC2	3	3	
FC3	3	3	
FC4	3	3	
FC5	3	3	
FC6	3	3	

FONTE: AUTORES (2024)

### QUADRO 3

PROGRAMA FATORIAL PARA O ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Tipos de concreto	Quantidade de espécimes por idade	Total de espécimes
	28 dias	
FC	3	18
FC2	3	
FC3	3	
FC4	3	
FC5	3	
FC6	3	

FONTE: AUTORES (2024)

1910 kg/m<sup>3</sup>, absorção de água de 12,50%, teor de material pulverulento de 4,25% e composição por análise visual sendo: G1 (materiais cimentícios) com 42,34%, G2 (fragmentos de rochas naturais) com 10,34%, G3 (materiais cerâmicos) com 44,83% e G4 (contaminantes e impurezas) com 2,59%.

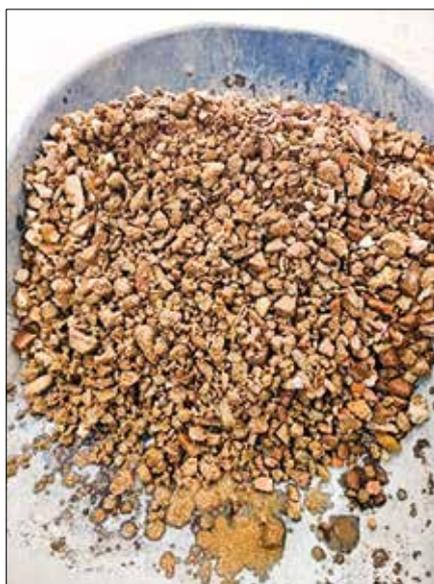
Como adição mineral, para contribuir para a resistência mecânica das misturas, foi utilizado um metacaulim com massa específica de 2560 kg/m<sup>3</sup>.

Foi utilizado também aditivo superplastificante, com massa específica de 1100 kg/m<sup>3</sup> e teor de sólidos de 45%, com justificativa para garantia de trabalhabilidade.

### 2.3 Produção dos concretos

O método de dosagem escolhido no estudo foi o da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), especificando uma resistência característica à compressão (fck) de 40 MPa. O traço encontrado foi 1:1,33:2,37:0,45 (cimento:areia:brita:água). As composições das misturas estão detalhadas na Tabela 1.

Em todas as misturas foi incluído um aditivo superplastificante, em um teor de 0,4% da massa de cimento, sendo este percentual adotado em relação ao teor de sólidos. Para minimizar o efeito



**FIGURA 1**  
ARM<sub>g</sub> APÓS A PRÉ-MOLHAGEM  
FONTE: AUTORES (2024)



**FIGURA 2**  
ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO  
FONTE: AUTORES (2024)



**FIGURA 3**  
ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE  
FONTE: AUTORES (2024)

**TABELA 1**  
CONSUMOS DOS MATERIAIS POR M<sup>3</sup> DE CONCRETO

Legenda	Cimento (kg)	AN <sub>m</sub> (kg)	AN <sub>g</sub> (kg)	ARM <sub>g</sub> (kg)	Metacaulim (kg)	Água total (kg)
FC	455,56	603,87	1078,80	—	—	205,00
FC2	364,45	603,87	1078,80	—	91,11	205,00
FC3	455,56	603,87	863,04	215,76	—	205,00
FC4	364,45	603,87	863,04	215,76	91,11	205,00
FC5	455,56	603,87	539,40	539,40	—	205,00
FC6	364,45	603,87	539,40	539,40	91,11	205,00

FONTE: AUTORES (2024)

da absorção de água do ARM<sub>g</sub>, foi calculada a água de absorção e efetuado o processo de pré-molhagem, imergindo os agregados reciclados em água por 15 minutos conforme demonstrado na Figura 1. Foi utilizada 80% da água de absorção dos ARM durante este processo, em detrimento de seu melhor desempenho frente aos resultados mecânicos do concreto (6).

Os procedimentos de moldagem e adensamento foram executados de acordo com as orientações previstas na NBR 5738 (7). A avaliação da resistência à compressão (Figura 2), das amostras de concreto foi realizada de acordo com a norma brasileira NBR 5739 (8). A avaliação da ab-

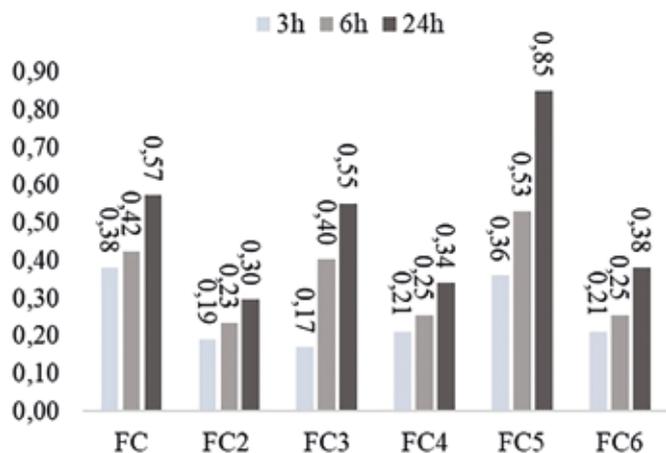
sorção por capilaridade das amostras de concreto (Figura 3), foi realizada de acordo com a norma brasileira NBR 9779 (9).

## 3. RESULTADOS

### 3.1 Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade foi avaliada aos 28 dias de cura nos tempos de 3 h, 6 h e 24 h de absorção. Os resultados médios são mostrados na Figura 4.

Observa-se que a incorporação de metacaulim (MK) reduziu a absorção de água, o que contribui para a durabilidade do concreto. Após 24 horas de imersão, as misturas modificadas com MK



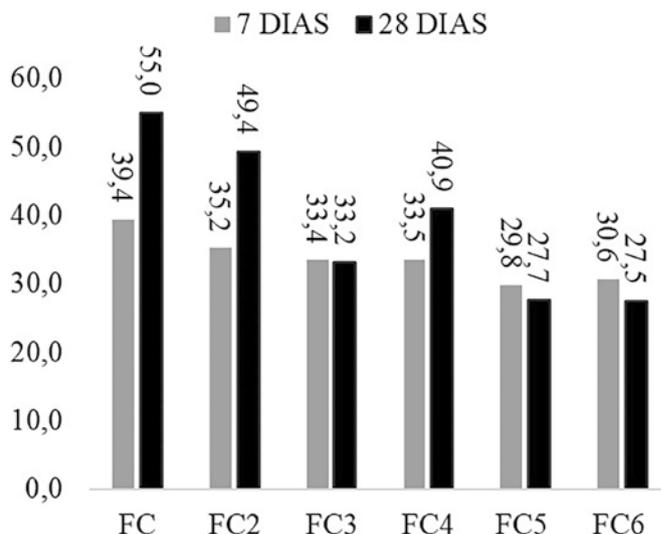
**FIGURA 4**

VALORES MÉDIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE (g/cm<sup>2</sup>)

FONTE: AUTORES (2024)

(FC2, FC4, FC6) apresentaram menores taxas de absorção (0,30 a 0,38 g/cm<sup>2</sup>) em comparação às misturas sem MK com agregados reciclados mistos (ARM) (FC3, FC5), que apresentaram o maior valor de absorção (0,85 g/cm<sup>2</sup>). A maior absorção nas misturas sem MK se deve às propriedades

inerentes do ARM, como alta porosidade, textura rugosa e formato angular, que promovem a penetração de água. Essa tendência foi consistente nos momentos anteriores (3h e 6h), enfatizando o efeito prejudicial da heterogeneidade do ARM na



**FIGURA 5**

RESULTADOS MÉDIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM MPA

FONTE: AUTORES (2024)

absorção de água e a compensação promovida pelo metacaulim.

### 3.2 Resistência à compressão

Os resultados médios da resistência à compressão axial em intervalos de 7 e 28 dias são mostrados graficamente na Figura 5.

A princípio, foi executado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk em todas as composições (FC a FC6), com um nível de significância de 5% (Valor p de 0,05). A partir dessa análise, foi constatado que apenas FC2 aos 28 dias possuía dados não normais, como mostrado na Tabela 2.

O próximo passo foi a realização do teste de homocedasticidade de Bartlett para os dados normais e Levene para não

**TABELA 2**

TESTE DE NORMALIDADE DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Misturas	Resistência à compressão (MPa)			
	Dados			
	7 dias		28 dias	
	Estatística: Shapiro-Wilk	Valor p	Estatística: Shapiro-Wilk	Valor p
FC	0,9990	0,9388	0,9592	0,6116
FC2	0,9740	0,6907	0,7653	0,0341
FC3	0,9980	0,9152	0,9231	0,4633
FC4	0,8322	0,1939	0,9643	0,6369
FC5	0,8263	0,1790	0,9838	0,7563
FC6	0,8622	0,2738	0,8403	0,2148

FONTE: AUTORES (2024)

**TABELA 3**

RESULTADOS DA ANOVA (7 DIAS)

Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	Valor p
Fator	5	178,6250	35,7250	4,1205	0,0207
Resíduos	12	104,0400	8,6700	—	—

FONTE: AUTORES (2024)

**TABELA 4**

RESULTADOS DO TESTE DE TUKEY (7 DIAS)

Níveis	Valor p
FC2-FC	0,5296
FC3-FC	0,1998
FC4-FC	0,2082
FC5-FC	0,0168
FC6-FC	0,0315

FONTE: AUTORES (2024)

**TABELA 5**

RESULTADOS DO TESTE NÃO PARAMÉTRICO (28 DIAS)

Informação	Valor
Kruskal-Wallis qui-quadrado	15,8304
Graus de Liberdade	5
Valor p	0,0073

FONTE: AUTORES (2024)

normais, obtendo resultados de valor p de 0,4217 (7 dias) e 0,8290 (28 dias), respectivamente. Conforme esses resultados, foi utilizado a ANOVA (Tabela 3) através do teste paramétrico de Tukey (Tabela 4) para os dados de 7 dias e foi utilizado o teste não paramétrico Kruskal-Wallis para os dados de 28 dias (Tabela 5), junto das comparações múltiplas do teste (Tabela 6).

Quanto à análise das médias separadamente, com um nível de confiança de 95%, os grupos FC a FC4 possuem equivalência estatística entre si, respectivamente, conforme elucidado na Tabela 4. Esses resultados demonstram que a substituição de 20% de cimento por MK no concreto convencional (FC2) e no concreto com 20% de ARM<sub>g</sub> (FC4), além de sua versão desprovida de MK (FC3), não produziram alterações nos valores médios equivalentes da resistência à compressão aos 7 dias em comparação ao seu não uso (FC), enquanto nos concretos com 50% de ARM<sub>g</sub> com (FC5) e sem MK (FC6) houve redução nos valores médios frente à mesma comparação.

Quanto à análise das medianas separadamente, com um nível de confiança de 95%, os grupos FC a FC4, são considerados equivalentes entre si, como visto na Tabela 6. Esses resultados demonstram que a

**TABELA 6**

COMPARAÇÕES MÚLTIPLAS ENTRE OS GRUPOS (28 DIAS)

Fatores comparados	Diferença observada	Diferença crítica	Diferença
FC - FC2	3,0000	12,7942	Não
FC - FC3	9,3333	12,7942	Não
FC - FC4	6,0000	12,7942	Não
FC - FC5	13,0000	12,7942	Sim
FC - FC6	13,6667	12,7942	Sim

FONTE: AUTORES (2024)

substituição de 20% de cimento por MK no concreto convencional (FC2) e no concreto com 20% de ARM<sub>g</sub> (FC4), além do uso isolado de 20% de ARM<sub>g</sub> (FC3) não alteraram a mediana dos resultados de resistência à compressão aos 28 dias, enquanto nos concretos com 50% de ARM<sub>g</sub> com (FC5) e sem MK (FC6) houve redução nas medianas frente ao concreto convencional sem MK (FC). Isso confirma o resultado anterior.

#### 4. CONCLUSÕES

Em termos de absorção capilar de água, pode-se verificar a influência do metacaulim (MK) para melhoria da durabilidade, uma vez que as misturas de MK (FC2, FC4 e FC6) apresentaram as menores taxas, de 0,30 a 0,38 g/cm<sup>2</sup>, após 24 horas. Em contraste, as misturas com ARM<sub>g</sub> sem MK (FC3 e FC5) apresentaram a maior taxa, de 0,85 g/cm<sup>2</sup>. Esse aumento na absorção é atribuído à alta porosidade e angularidade do ARM<sub>g</sub>, que promovem a entrada de água, um padrão consistente nos tempos iniciais (3 h e 6 h). A presença do metacaulim contribuiu para a redução da absorção, evidenciando sua eficácia em melhorar a compactação da matriz e a interface pasta-agregado, que são fatores importantes

para o desempenho do concreto.

Em se tratando da resistência à compressão, nenhuma das misturas com ARM<sub>g</sub> atingiu a meta de dosagem ( $f_{ci}$ ) de 46,6 MPa (equivalente a  $f_{ck}$  de 40 MPa), sendo esse desempenho alcançado apenas pelos concretos convencionais (FC e FC2). No entanto, a mistura produzida com 20% de ARM<sub>g</sub> e 20% de MK (FC4) apresentou o valor mais próximo da meta, evidenciando o efeito positivo do metacaulim no ganho de resistência.

Todas as formulações superaram 26,6 MPa aos 28 dias, valor mínimo exigido para uso estrutural conforme as normas brasileiras. A análise estatística aos 7 dias mostrou que as misturas com 20% de ARM<sub>g</sub> com ou sem MK, não apresentaram diferenças significativas em relação ao concreto de referência, resultado esse repetido aos 28 dias. As misturas com 50% de ARM<sub>g</sub> exibiram resistências inferiores, mesmo com a adição de MK (FC5 e FC6), confirmando que maiores teores de ARM<sub>g</sub> tendem a comprometer a resistência mecânica, mas, de modo geral, o metacaulim mostrou-se eficaz em mitigar parte das perdas de resistência associadas ao uso de ARM<sub>g</sub>. 

## ▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SALLES, P. V.; GOMES, C. L.; POGGIALI, F. S. J.; RODRIGUES, C. S. A importância da segregação do agregado reciclado na resistência e na durabilidade do concreto estrutural. *Ambiente Construído*, v. 21, n. 3, p. 177-196, jul./set. 2021.
- [2] VINTIMILLA, Carla; ETXEBERRIA, Miren. Limiting the maximum fine and coarse recycled aggregates - Type B used in structural concrete. *Construction and Building Materials*, v. 459, n. 139791, p. 1-18, jan./2025.
- [3] GONZÁLEZ, M. D.; CABALLERO, P. P.; FERNANDEZ, D. B.; VIDAL, M. M. J.; DEL BOSQUE, I. F. S.; MARTINEZ, C. M. The Design and Development of Recycled Concretes in a Circular Economy Using Mixed Construction and Demolition Waste. *Materials (Basel, Switzerland)*, v. 14, n. 16, p. 1-22, ago./2021.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15116: Agregados reciclados para uso em argamassa e concretos de cimento Portland – Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2021.
- [5] MONTGOMERY, Douglas C. *Design and Analysis of Experiments*. Nova Jersey: Wiley, 2020.
- [6] LIMA, N. K. S. Análise da viabilidade do uso de agregado reciclado graúdo misto em concretos estruturais. 2024. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2024.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.
- [8] \_\_\_\_\_. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018a.
- [9] \_\_\_\_\_. NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2013.