

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
CIVIL

JÚLIO CÉZAR DE MENDONÇA UCHÔA

ESTUDO DE DESEMPENHO DE CONCRETOS
ESTRUTURAIS PRODUZIDOS COM AGREGADOS
RECICLADOS

MACEIÓ – ALAGOAS
2025

JÚLIO CÉZAR DE MENDONÇA UCHÔA

**ESTUDO DE DESEMPENHO DE CONCRETOS
ESTRUTURAIS PRODUZIDOS COM AGREGADOS
RECICLADOS**

Dissertação de mestrado submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas – PPGEC/UFAL, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Estruturas e Materiais.

Orientador (a): Prof(a). Dra. Karoline Alves de Melo
Moraes

MACEIÓ – ALAGOAS
2025

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária: Helena Cristina Pimentel do Vale CRB4 - 661

- U17e Uchôa, Júlio César de Mendonça.
 Estudo de desempenho de concretos estruturais produzidos com agregados
 reciclados / Júlio César de Mendonça Uchôa. – 2025.
 243 f. : il.
- Orientadora: Karoline Alves de Melo Moraes.
 Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas.
 Centro de Tecnologia. Maceió, 2025.
- Bibliografia: f. 178-213.
 Apêndices: f. 214-243.
1. Concreto estrutural. 2. Agregado reciclado misto graúdo. 3. Estatística.
 4. Metacaulim. 5. Tipo de cura. I. Título.

CDU: 624



**ESTUDO DE DESEMPENHO DE CONCRETOS ESTRUTURAIS PRODUZIDOS COM
AGREGADOS RECICLADOS**

JÚLIO CÉZAR DE MENDONÇA UCHÔA

Dissertação submetida à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas e aprovada no dia 24 do mês de fevereiro do ano de 2025.

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br **KAROLINE ALVES DE MELO MORAES**
Data: 14/03/2025 17:17:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Karoline Alves de Melo Moraes
(Orientadora – PPGEC/UFAL)

Documento assinado digitalmente
gov.br **WAYNE SANTOS DE ASSIS**
Data: 14/03/2025 15:26:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Wayne Santos de Assis
(Avaliador Interno – PPGEC/UFAL)

Documento assinado digitalmente
gov.br **GIBSON ROCHA MEIRA**
Data: 09/03/2025 16:27:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Gibson Rocha Meira
(Avaliador Externo– IFPB)

*Dedico este trabalho a meu Deus,
meu Senhor Jesus, minha esposa
Yasmin, minha mãe Avani, meu
pai Júlio César e minha
orientadora “Mãe” Karol.*

AGRADECIMENTOS

Eu primeiro agradeço a Deus e ao meu Senhor Jesus por tudo que Eles me proporcionaram desde o primeiro dia que vi a notícia que passei no concurso do mestrado. Entrei no último lugar, com uma base acadêmica da graduação que não me favoreceu quanto aos conhecimentos básicos para cursar uma pós-graduação em uma Universidade Federal do nível da de Alagoas. Entretanto, graças a minha orientadora Karoline Alves Melo Moraes que não desistiu de mim em nenhum momento, que tirou todas as minhas milhões de dúvidas básicas e a partir disso, fui me adequando ao “padrão UFAL”. Seus conselhos, sua dedicação em me ajudar, todo o seu conhecimento que compartilhou comigo, toda sua compreensão e, principalmente, toda a sua paciência em dar conselhos sempre que precisei. Sem a sua orientação, eu não chegaria nesse resultado final. Eu comecei a ser metódico em tudo, virei o “guru” das normas ABNT e pude avançar durante o meu mestrado.

Com o passar do tempo fiz amigos na graduação que me ajudaram dentro do projeto no qual eu estou inserido, onde posso frisar o João, Daiana, Leticia, Yelli, Rosangela, Samira e a Marília, esses que me auxiliaram nas elaborações dos concretos e das argamassas, além da execução dos ensaios no estado fresco e endurecido desses. Eu aprendi muito com eles e espero poder ajuda-los em suas jornadas rumo ao conhecimento.

Agradeço também aos professores Wayne Santos de Assis e Gibson Rocha Meira, por me auxiliarem no ramo estatístico e no ramo da durabilidade, respectivamente. Em conjunto com a professora Cassia Vanessa Albuquerque de Melo, os senhores me auxiliaram muito nas minhas bancas de qualificação e de defesa, contribuindo para a melhoria desta dissertação.

A minha amada mãe Avani Mauricio dos Santos, que tanto cuidou de mim em toda a minha jornada do ensino fundamental até esse mestrado, e principalmente no câncer que estou enfrentando. Sem a senhora eu estaria destruído e sem rumo para seguir. Te amo muitíssimo minha mãe maravilhosa!!!

Um agradecimento especial para minha esposa Yasmin Marques de Mendonça Uchôa, essa esposa de garra que cuidou de mim em todos os meus procedimentos de quimioterapia, que me ajudou a corrigir os erros da dissertação, que me auxiliou na elaboração dos artigos, que fez com que eu tivesse o melhor casamento que eu pudesse ter em toda a minha vida. Amo estar casado com ela desde novembro de

2024, e estar com ela é um amor incrível que quero manter até o dia de minha morte. Te amo minha esposa gatinha fofa.

Agradeço imensamente a minha irmã Júlia Vanessa de Mendonça Uchôa, por ter me ajudado nos meus tratamentos do câncer e também agradeço grandiosamente ao meu cunhado Vitor, por ter me auxiliado nos treinamentos para as apresentações da qualificação e da defesa.

Agradeço aos técnicos e funcionários Seu Cicero, Jonas, Gustavo e, em especial, o Seu Valdemir. Esse último que se esforçou ao máximo para ir em dias que ninguém compareceu para romper meus corpos de prova, por me defender de acusações injustas e por me dar conselhos como um “avô incrível” que nunca tive.

Agradecimento super especial aos funcionários do LEMA, Paulo e Flabel, pelo apoio incrível na realização dos meus concretos as 4 h da manhã, 7 h da manhã, 9h da manhã e até 13 h e 15h da tarde, em vários dias seguidos. Sem vocês eu não conseguiria ter executado os “1 milhão de corpos de prova”, na qual fui apelidado.

Agradeço ao meu professor Alessandro Sarmiento, por ter acreditado em mim desde a graduação, por ter me apoiado em toda a dissertação e por ter me impedido de desistir de cursar a disciplina de estatística, essa na qual foi essencial para a realização das análises que essa dissertação necessitou fazer.

Agradeço a FAPEAL pela bolsa de estudo concedida, que me permitiu a dedicação ao mestrado em tempo integral.

Agradeço a todos os meus amigos da graduação, em especial o Eduardo, que fez a vaquinha para me ajudar nos exames e nas medicações do câncer. Agradeço também aos amigos da minha mãe que ajudaram na vaquinha, em especial o Doutor Marcus, que conseguiu velocidade e muita ajuda financeira nos exames médicos.

Agradeço também a todos aqueles que direta ou indiretamente colaboraram para a realização desta dissertação.

RESUMO

Dada a grande quantidade de resíduos de construção e demolição (RCD) gerados no setor da construção civil, bem como a necessidade constante de extração de agregados naturais (AN) das jazidas no planeta (as quais vão ficando mais escassas a cada dia), é evidente que é necessário investir em alternativas eficientemente sustentáveis. Uma alternativa normalmente negligenciada é o uso de agregados reciclados mistos (ARM), uma vez que a maioria dos trabalhos brasileiros e internacionais se limita a aplicações em concretos não estruturais ou em argamassas. Entretanto, devido ao fato de que a maioria dos RCD produzidos são classificados como ARM, vê-se necessária a realização de estudos que analisem suas propriedades para fins estruturais. Dessa forma, o objetivo geral do trabalho é avaliar o desempenho de concretos produzidos com agregado reciclado misto graúdo (ARM_g). Foram produzidos concretos com seis diferentes dosagens, utilizando o método proposto pela ABCP, variando-se o percentual de substituição do agregado natural graúdo (AN_g) por ARM_g (20% e 50%) e adotando, em todas as misturas, a substituição de 20% do cimento CP V – ARI pela adição mineral metacaulim (MK). No estado fresco, o desempenho foi avaliado através do ensaio de abatimento (*slump*) e do ensaio de massa específica. A análise das propriedades no estado endurecido se deu por meio dos ensaios de resistência à compressão, bem como índices físicos dos concretos, a exemplo de absorção de água por capilaridade. Quanto ao uso de ARM_g, os resultados de resistência à compressão tenderam a diminuir frente os concretos convencionais, sendo essa redução menor nos concretos com uso de 20% de ARM_g e maior com 50% de ARM_g. O uso de MK melhorou os resultados de resistência à compressão nesses concretos, possibilitando que eles tivessem valores mais próximos do concreto convencional. Quanto à propriedade de absorção de água por capilaridade, os concretos com uso de ARM_g absorveram mais água em relação ao convencional, o que já era esperado em função da alta porosidade desses materiais. O uso de MK melhorou essa propriedade em todos os concretos, em função do alto teor de finos desse material suplementar. Com relação à influência do tipo de cura nos concretos, foi encontrado que as médias dos resultados de resistência à compressão são estatisticamente iguais em ambas as idades de análise, 7 e 28 dias de cura, e as médias dos resultados de absorção de água por capilaridade também são iguais aos 28 dias de cura, demonstrando que o tipo de cura não influenciou nos resultados no estado endurecido dos concretos. Quanto à influência do fator localidade nos concretos, foi encontrado que as médias dos resultados de resistência à compressão são estatisticamente iguais em ambas as idades de análise, sendo 7 e 28 dias de cura.

Palavras-chave: Concreto estrutural; Agregado reciclado misto graúdo; Estatística; Metacaulim; Tipo de cura.

ABSTRACT

Given the large amount of construction and demolition waste (CDW) generated in the construction industry, as well as the constant need to extract natural aggregates (NA) from deposits on the planet (which are becoming scarcer every day), it is clear that it is necessary to invest in efficiently sustainable alternatives. One alternative that is often overlooked is the use of mixed recycled aggregates (MRA), since most Brazilian and international studies are limited to applications in non-structural concrete or mortars. However, due to the fact that most of the RCDs produced are classified as MRA, it is necessary to carry out studies that analyze their properties for structural purposes. Thus, the general objective of this study is to evaluate the performance of concrete produced with coarse mixed recycled aggregate (MRA_c). Concretes were produced with six different dosages, using the method proposed by ABCP, varying the percentage of replacement of coarse natural aggregate (NA_c) by MRA_c (20% and 50%) and adopting, in all mixtures, the replacement of 20% of CP V – ARI cement by the mineral addition metakaolin (MK). In the fresh state, the performance was evaluated through the slump test and the specific mass test. The analysis of the properties in the hardened state was carried out through compressive strength tests, as well as physical indices of the concretes, such as water absorption by capillarity. Regarding the use of MRA_c, the compressive strength results tended to decrease compared to conventional concretes, with this reduction being smaller in concretes using 20% MRA_c and greater with 50% MRA_c. The use of MK improved the compressive strength results in these concretes, allowing them to have values closer to conventional concrete. Regarding the capillary water absorption property, the concretes using MRA_c absorbed more water than the conventional one, which was expected due to the high porosity of these materials. The use of MK improved this property in all concretes, due to the high fine content of this supplementary material. Regarding the influence of the type of curing in the concretes, it was found that the average results of compressive strength are statistically equal at both ages of analysis, 7 and 28 days of curing, and the average results of water absorption by capillarity are also equal at 28 days of curing, demonstrating that the type of curing did not influence the results in the hardened state of the concretes. Regarding the influence of the location factor in the concretes, it was found that the average results of compressive strength are statistically equal at both ages of analysis, being 7 and 28 days of curing.

Key-words: Structural concrete; Coarse mixed recycled aggregate; Statistics; Metakaolin; Type of curing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Projeção de crescimento global em matérias-primas de construção por tipos	23
Figura 2 – Materiais produzidos pelas unidades de reciclagem de RCD no Brasil ...	36
Figura 3 – Fluxograma do processo de produção de agregado reciclado de RCD ...	37
Figura 4 – Economia circular x circuito fechado	77
Figura 5 – Esquematização da sustentabilidade na construção civil através da economia circular	78
Figura 6 – Comparação da resistência à compressão do ARM _g com valores de referência	87
Figura 7 – Progressão da resistência à compressão com ARCO _g sem metacaulim (gráfico a esquerda), progressão da resistência à compressão com ARCO _g com metacaulim (gráfico a direita)	91
Figura 8 – Progressão da resistência à compressão com ARCO _g sem metacaulim x com ARCO _g com metacaulim	91
Figura 9 – Localização dos pontos de análise.....	104
Figura 10 – Mapa de estações	105
Figura 11 – Fluxograma das fases do método estatístico da pesquisa	105
Figura 12 – Fluxograma da metodologia qualitativa e quantitativa da pesquisa	106
Figura 13 – Distribuição granulométrica do agregado natural miúdo	114
Figura 14 – Distribuição granulométrica do agregado natural graúdo.....	117
Figura 15 – Distribuição granulométrica do agregado reciclado misto graúdo.....	119
Figura 16 – ARM _g após a pré-molhagem	130
Figura 17 – Concreto curados em meio úmido.....	131
Figura 18 – Concreto curados ao ar (FC, FC2 e FC4)	132
Figura 19 – Concretos na obra.....	132
Figura 20 – Recipiente adaptado em plástico bolha (esquerda); concreto protegido por plástico bolha (direita)	133
Figura 21 – Ensaio de abatimento do tronco de cone	133
Figura 22 – Ensaio de resistência à compressão.....	134
Figura 23 – Ensaio de absorção de água por capilaridade	135
Figura 24 – Resultados médios de resistência à compressão em MPa	139

Figura 25 – Valores médios de absorção de água por capilaridade (g/cm^2), cura úmida (esquerda) e cura ao ar (direita)	149
Figura 26 – Normalidade dos dados (Resistência à compressão – Ar – 7 dias)	155
Figura 27 – Normalidade dos dados (Resistência à compressão – Úmida – 28 dias)	155
Figura 28 – Representação gráfica do teste de normalidade <i>Shapiro Wilk</i> para absorção de água por capilaridade (Ar – 24 h)	158
Figura 29 – Representação gráfica do teste de normalidade <i>Shapiro Wilk</i> para absorção de água por capilaridade (Úmida – 24 h)	159
Figura 30 – Resultados médios de resistência à compressão em MPa (Campo) ...	161
Figura 31 – Normalidade dos dados (Resistência à compressão – Obra – 7 dias) .	167
Figura 32 – Normalidade dos dados (Resistência à compressão – Obra – 28 dias)	167

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Estimativa da quantidade de RCD gerados em todo o mundo.....	24
Quadro 2 – Aspectos originários da geração de RCD.....	32
Quadro 3 – Classificação dos RCD quanto aos entulhos.....	33
Quadro 4 – Classificação dos resíduos de construção e demolição por Resoluções CONAMA.....	34
Quadro 5 – Requisitos específicos dos agregados totais reciclados e compostos para uso em produtos e compósitos cimentícios ¹	40
Quadro 6 – Recomendações dos agregados totais reciclados e compostos para uso em materiais cimentícios.....	41
Quadro 7 – Informações da literatura quanto à variabilidade dos materiais que compõem os ARM.....	42
Quadro 8 – Possíveis contaminantes no RCD e sua influência sobre o produto à base de cimento obtido	50
Quadro 9 – Faixa de resultados de literatura quanto ao teor de material pulverulento dos ARM.....	52
Quadro 10 – Faixa de resultados de literatura para massa específica e massa unitária dos ARM.....	57
Quadro 11 – Faixa de resultados de literatura para absorção de água dos ARM.....	68
Quadro 12 – Dosagens em massa das pesquisas	92
Quadro 13 – Propriedades dos concretos com agregados reciclados mistos graúdos no estado fresco.....	95
Quadro 14 – Propriedade dos concretos com agregados reciclados mistos graúdos no estado endurecido.....	97
Quadro 15 – Detalhamento do ponto onde foi alocado os corpos de prova de concreto	104
Quadro 16 – Fator tipos de concreto.....	107
Quadro 17 – Programa fatorial para o ensaio de resistência à compressão no campo (canteiro de obras)	107
Quadro 18 – Programa fatorial para o ensaio de resistência à compressão no laboratório	109

Quadro 19 – Programa fatorial para o ensaio de determinação da absorção de água por capilaridade.....	109
Quadro 20 – Normas utilizadas.....	113
Quadro 21 – Classes de agressividade ambiental.....	125
Quadro 22 – Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto	125
Quadro 23 – Determinação aproximada do consumo de água.....	126
Quadro 24 – Determinação do volume do agregado graúdo (Vb).....	126
Quadro 25 – Composição dos concretos (kg/m ³).....	129

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análise química do cimento utilizado.....	110
Tabela 2 – Propriedades físicas e mecânicas do cimento utilizado	111
Tabela 3 – Resistência à compressão do cimento utilizado.....	111
Tabela 4 – Ficha técnica do metacaulim utilizado	112
Tabela 5 – Dados e resultados do ensaio de massa específica e absorção de água do agregado	115
Tabela 6 – Resultados dos ensaios de massa unitária do agregado natural miúdo	115
Tabela 7 – Teor de material pulverulento do agregado natural miúdo	116
Tabela 8 – Teor de argila do agregado natural miúdo.....	116
Tabela 9 – Dados e resultados do ensaio de massa específica e de absorção de água do agregado	117
Tabela 10 – Resultados dos ensaios de massa unitária do agregado natural graúdo	118
Tabela 11 – Ensaio do teor de material pulverulento do agregado reciclado misto graúdo	119
Tabela 12 – Resumo do ensaio de índice de forma dos grãos pelo método do paquímetro	120
Tabela 13 – Resumo da classificação de forma dos grãos	120
Tabela 14 – Parâmetros do ensaio de resistência ao impacto e à abrasão <i>Los Angeles</i>	121
Tabela 15 – Dados quanto ao ensaio de resistência ao impacto e à abrasão <i>Los Angeles</i>	121
Tabela 16 – Dados e resultados obtidos do ensaio de massa específica e de absorção de água	122
Tabela 17 – Procedimento de ensaio da massa unitária (Método A)	122
Tabela 18 – Procedimento de ensaio da massa unitária (Método C).....	123
Tabela 19 – Resumo dos resultados do ensaio de determinação da composição por análise visual.....	123
Tabela 20 – Estação meteorológica mais próxima do LEMA	137
Tabela 21 – Estação meteorológica mais próxima do ponto analisado na cidade de São Miguel dos Milagres	138

Tabela 22 – Propriedades físicas no estado fresco dos concretos produzidos	138
Tabela 23 – Teste de normalidade dos resultados de resistência à compressão (cura ao ar)	140
Tabela 24 – Teste de normalidade dos resultados de resistência à compressão (cura úmida)	141
Tabela 25 – Resultados do teste de homocedasticidade (7 dias – cura ao ar)	141
Tabela 26 – Intervalos de confiança para o desvio padrão (7 dias – cura ao ar)	141
Tabela 27 – Resultados do teste de homocedasticidade (28 dias – cura ao ar)	142
Tabela 28 – Intervalos de confiança para o desvio padrão (28 dias – cura ao ar) ..	142
Tabela 29 – Resultados do teste de homocedasticidade (7 dias – cura úmida).....	142
Tabela 30 – Intervalos de confiança para o desvio padrão (7 dias – cura úmida)...	143
Tabela 31 – Resultados do teste de homocedasticidade (28 dias – cura úmida)....	143
Tabela 32 – Intervalos de confiança para o desvio padrão (28 dias – cura úmida).143	
Tabela 33 – Resultados do teste não paramétrico (7 dias – cura ao ar)	144
Tabela 34 – Comparações múltiplas entre os grupos (7 dias – cura ao ar)	144
Tabela 35 – Resultados da ANOVA para resistência à compressão (28 dias – cura ao ar).....	145
Tabela 36 – Resultados do teste de <i>Tukey</i> para resistência à compressão (28 dias – cura ao ar)	145
Tabela 37 – Comparativo das médias entre os grupos (28 dias – cura ao ar)	146
Tabela 38 – Resultados da ANOVA para resistência à compressão (7 dias – cura úmida)	146
Tabela 39 – Resultados do teste de <i>Tukey</i> para resistência à compressão (7 dias – cura úmida)	146
Tabela 40 – Comparativo das médias entre os grupos (7 dias – cura úmida)	147
Tabela 41 – Resultados do teste não paramétrico (28 dias – cura úmida)	147
Tabela 42 – Comparações múltiplas entre os grupos (28 dias – cura úmida).....	148
Tabela 43 – Teste de normalidade para a absorção de água por capilaridade.....	150
Tabela 44 – Resultados do teste de homocedasticidade para a absorção de água por capilaridade (cura úmida – 24h)	150
Tabela 45 – Intervalos de confiança para o desvio padrão para a absorção de água por capilaridade (cura úmida – 24h).....	150
Tabela 46 – Resultados do teste de homocedasticidade para a absorção de água por capilaridade (cura ao ar – 24h).....	151

Tabela 47 – Intervalos de confiança para o desvio padrão para a absorção de água por capilaridade (cura ao ar – 24h)	151
Tabela 48 – Resultados do teste não paramétrico para a absorção de água por capilaridade (24 h – cura ao ar).....	151
Tabela 49 – Comparações múltiplas entre os grupos para a absorção de água por capilaridade (24 h – cura ao ar).....	152
Tabela 50 – Resultados do teste não paramétrico para a absorção de água por capilaridade (24 h – cura úmida)	153
Tabela 51 – Comparações múltiplas entre os grupos para a absorção de água por capilaridade (24 h – cura úmida)	153
Tabela 52 – Dados médios de resistência à compressão (Ar e Úmida)	154
Tabela 53 – Resultados do teste de normalidade (Resistência à compressão – Ar e Úmida).....	154
Tabela 54 – Resultados do teste de homocedasticidade (Resistência à compressão – 7 dias Ar <i>versus</i> Úmida)	156
Tabela 55 – Intervalos de confiança para o desvio padrão (Resistência à compressão – 7 dias Ar <i>versus</i> Úmida)	156
Tabela 56 – Resultados do teste de homocedasticidade (Resistência à compressão – 28 dias Ar <i>versus</i> Úmida)	156
Tabela 57 – Intervalos de confiança para o desvio padrão (Resistência à compressão – 28 dias Ar <i>versus</i> Úmida)	156
Tabela 58 – Resultados do teste t (Resistência à compressão – 7 dias Ar <i>versus</i> Úmida).....	157
Tabela 59 – Resultados do teste t (Resistência à compressão – 28 dias Ar <i>versus</i> Úmida).....	157
Tabela 60 – Dados médios de absorção de água por capilaridade (Ar <i>versus</i> Úmida)	158
Tabela 61 – Resultados do teste de normalidade (Absorção de água por capilaridade – Ar <i>versus</i> Úmida).....	158
Tabela 62 – Resultados do teste de homocedasticidade para absorção de água por capilaridade (24 h – Ar <i>versus</i> Úmida)	159
Tabela 63 – Intervalos de confiança para o desvio padrão para absorção de água por capilaridade (24 h – Ar <i>versus</i> Úmida)	159

Tabela 64 – Resultados do teste U de <i>Mann-Whitney</i> para absorção de água por capilaridade (24 h – Ar <i>versus</i> Úmida)	160
Tabela 65 – Propriedades físicas no estado fresco dos concretos produzidos	160
Tabela 66 – Teste de normalidade nos resultados de resistência à compressão (Obra)	162
Tabela 67 – Resultados do teste de homocedasticidade para resistência à compressão (7 dias – Obra)	162
Tabela 68 – Intervalos de confiança para o desvio padrão para resistência à compressão (7 dias – Obra)	162
Tabela 69 – Resultados do teste de homocedasticidade para resistência à compressão (28 dias – Obra)	163
Tabela 70 – Intervalos de confiança para o desvio padrão para resistência à compressão (28 dias – Obra)	163
Tabela 71 – Resultados do teste não paramétrico para resistência à compressão (7 dias – Obra)	163
Tabela 72 – Comparações múltiplas entre os grupos para resistência à compressão (7 dias – Obra)	164
Tabela 73 – Resultados da ANOVA para resistência à compressão (28 dias – Obra)	165
Tabela 74 – Resultados do teste de <i>Tukey</i> para resistência à compressão (28 dias – Obra)	165
Tabela 75 – Comparativo das médias entre os grupos para resistência à compressão (28 dias – Obra)	166
Tabela 76 – Dados médios de resistência à compressão (Obra)	166
Tabela 77 – Resultados do teste de normalidade (Resistência à compressão – Obra)	167
Tabela 78 – Resultados do teste de homocedasticidade (Resistência à compressão – 7 dias Ar <i>versus</i> Obra)	168
Tabela 79 – Intervalos de confiança para o desvio padrão (Resistência à compressão – 7 dias Ar <i>versus</i> Obra)	168
Tabela 80 – Resultados do teste de homocedasticidade (Resistência à compressão – 28 dias Ar <i>versus</i> Obra)	168
Tabela 81 – Intervalos de confiança para o desvio padrão (Resistência à compressão – 28 dias Ar <i>versus</i> Obra)	168

Tabela 82 – Resultados do teste de homocedasticidade (Resistência à compressão – 7 dias Úmida <i>versus</i> Obra).....	169
Tabela 83 – Intervalos de confiança para o desvio padrão (Resistência à compressão – 7 dias Úmida <i>versus</i> Obra).....	169
Tabela 84 – Resultados do teste de homocedasticidade (Resistência à compressão – 28 dias Úmida <i>versus</i> Obra).....	169
Tabela 85 – Intervalos de confiança para o desvio padrão (Resistência à compressão – 28 dias Úmida <i>versus</i> Obra).....	169
Tabela 86 – Resultados do teste t (Resistência à compressão – 7 dias Laboratório (cura ao ar) <i>versus</i> Campo (obra))	170
Tabela 87 – Resultados do teste t (Resistência à compressão – 28 dias Laboratório (cura ao ar) <i>versus</i> Campo (obra))	170
Tabela 88 – Resultados do t (Resistência à compressão – 7 dias Laboratório (Cura úmida) <i>versus</i> Campo (Obra)).....	171
Tabela 89 – Resultados do teste t (Resistência à compressão – 28 dias Laboratório (Cura úmida) <i>versus</i> Campo (Obra))	172

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AACMI_{esquerda - direita} = Altura da ascensão capilar máxima interna (esquerda - direita)

AACMI_{média (esquerda - direita)} = Altura da ascensão capilar máxima interna média (esquerda - direita)

ABCP: Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRECON: Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição

ABRELPE: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ABREMA: Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente

AN: Agregado Natural

AN_g: Agregado(s) Natural(is) graúdo(s)

AN_m: Agregado(s) Natural(is) miúdo(s)

AR: Agregado(s) Reciclado(s)

ARCI: Agregado Reciclado Cimentício

ARCO: Agregado Reciclado de Concreto

ARCO_g: Agregado(s) Reciclado(s) de Concreto graúdo(s)

AR_g: Agregado(s) Reciclado(s) graúdo(s)

ARM: Agregado Reciclado Misto

AR_m: Agregado(s) Reciclado(s) miúdo(s)

ARM_g: Agregado(s) Reciclado(s) Misto(s) graúdo(s)

ARM_m: Agregado(s) Reciclado(s) Misto(s) miúdo(s)

C_{24h - média} = Absorção de água por capilaridade média - 24h

C_{24h} = Absorção de água por capilaridade - 24h

C_{3h - média} = Absorção de água por capilaridade média - 3h

C_{3h} = Absorção de água por capilaridade - 3h

C_{6h - média} = Absorção de água por capilaridade média - 6h

C_{6h} = Absorção de água por capilaridade - 6h

CDW: “*Construction and Demolition Waste*” = Resíduos de Construção e Demolição

CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente

CV (C_{24h}) = Coeficiente de variação (C_{24h})

CV ($f_{ct,sp}$) = Coeficiente de Variação ($f_{ct,sp}$)

CV: Coeficiente de Variação em porcentagem (%)

CV_{esquerda-direita} = Coeficiente de variação (esquerda - direita)

d = Diâmetro do corpo de prova

DP (C_{24h}) = Desvio padrão (C_{24h})

DP ($f_{ct,sp}$) = Desvio Padrão ($f_{ct,sp}$)

DP_{esquerda-direita} = Desvio padrão (esquerda - direita)

Estat. F = Estatística F

F = Força Máxima

$f_{ct,sp}$ - média = Resistência à compressão diametral média

$f_{ct,sp}$ = Resistência à compressão diametral

G.L. = Graus de liberdade

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ℓ = Comprimento do corpo de prova

Lab = Laboratório

MK: “*Metakaolin*” = Metacaulim

MMA: Ministério do Meio Ambiente

MR: “*Mixed Recycled*” = Reciclado Misto

MRA: “*Mixed Recycled Aggregates*” = Agregado(s) Reciclado(s) Misto(s)

MRA_c: “*Coarse Mixed Recycled Aggregates*” = Agregado(s) Reciclado(s) Misto(s) graúdo

MRAC-0,30: “*Coarse Mixed Recycled Aggregates with w/c-0,30*” = Agregado(s) Reciclado(s) Misto(s) Graúdo(s) com a/c-0,30

MRAC-0,36: “*Coarse Mixed Recycled Aggregates with w/c-0,36*” = Agregado(s) Reciclado(s) Misto(s) Graúdo(s) com a/c-0,36

MRAC-0,42: “*Coarse Mixed Recycled Aggregates with w/c-0,42*” = Agregado(s) Reciclado(s) Misto(s) Graúdo(s) com a/c-0,42

MRAC-0,50: “*Coarse Mixed Recycled Aggregates with w/c-0,50*” = Agregado(s) Reciclado(s) Misto(s) Graúdo(s) com a/c-0,50

m_s = massa seca

m_{sat-24h} = Massa saturada - 24h

m_{sat-3h} = Massa saturada - 3h

m_{sat-6h} = Massa saturada - 6h

NA_c: “*Coarse Natural Aggregate*” = Agregado(s) Natural(is) Graúdo(s)

NAC-0,30: "*Coarse Natural Aggregates with w/c-0,30*" = Agregado(s) Natural(is) Graúdo(s) com a/c-0,30

NAC-0,36: "*Coarse Natural Aggregates with w/c-0,36*" = Agregado(s) Natural(is) Graúdo(s) com a/c-0,36

NAC-0,42: "*Coarse Natural Aggregates with w/c-0,42*" = Agregado(s) Natural(is) Graúdo(s) com a/c-0,42

NAC-0,50: "*Coarse Natural Aggregates with w/c-0,50*" = Agregado(s) Natural(is) Graúdo(s) com a/c-0,50

NBR: Norma Brasileira

PLANARES: Plano Nacional de Resíduos Sólidos

PNAM: Política Nacional do Meio Ambiente

PNRS: Política Nacional de Resíduos Sólidos

RCD: Resíduos de Construção e Demolição

RSU: Resíduo Sólido Urbano

S = Seção transversal

UFAL: Universidade Federal de Alagoas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	22
1.1 Justificativa	30
1.2 Objetivo	31
1.2.1 Objetivo Geral	31
1.2.2 Objetivos Específicos	31
2 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	32
2.1 Composição e variabilidade dos RCD	35
3 AGREGADOS RECICLADOS	37
3.1 Beneficiamento dos agregados reciclados	37
3.1.1 Britagem	38
3.2 Recomendações Normativas referentes aos agregados reciclados	38
3.3 Propriedades características do ARM	41
3.3.1 Variabilidade	41
3.3.2 Contaminação e impurezas	49
3.3.3 Composição granulométrica	50
3.3.4 Teor de material pulverulento	50
3.3.5 Massa específica, massa unitária e absorção de água	56
4 CONCRETO COM UTILIZAÇÃO DE AGREGADO RECICLADO	77
4.1 Propriedades dos concretos com ARM no estado fresco	78
4.1.1 Abatimento	78
4.1.2 Massa específica e teor de ar	79
4.2 Propriedades dos concretos com ARM no estado endurecido	81
4.2.1 Correlação entre absorção de água e porosidade	81
4.2.2 Massa específica	81
4.2.3 Resistência à compressão	82
4.3 Panorama atual dos concretos desenvolvidos com ARM	92
5 METODOLOGIA	103
5.1 Planejamento de experimentos	106
5.1.1 Fatores de controle	106
5.1.2 Variáveis de análise	109
5.2 Materiais utilizados e suas caracterizações	110
5.2.1 Cimento CP V – ARI	110
5.2.2 Metacaulim HP ULTRA	111
5.2.3 Agregados Naturais (AN)	112
5.2.4 Agregado Reciclado Misto Graúdo (ARM _g)	112
5.2.5 Ensaio de caracterização dos agregados	113
5.2.6 Agregado Natural Miúdo (AN _m)	114
5.2.7 Agregado Natural Graúdo (AN _g)	116
5.2.8 Agregado Reciclado Misto Graúdo (ARM _g)	118
5.3 Produção dos concretos	124
5.3.1 Estudo de dosagem	124
5.3.2 Procedimento de mistura	130
5.4 Cura do concreto	131
5.4.1 Concretos curados no LEMA	131
5.4.2 Concretos curados no campo	132
5.5 Propriedades dos concretos no estado fresco	133
5.5.1 Slump test	133

5.5.2 Massa específica	134
5.6 Propriedades dos concretos no estado endurecido.....	134
5.6.1 Resistência à compressão	134
5.6.2 Absorção de água por capilaridade	135
5.7 Análises estatísticas.....	135
5.7.1 Teste de normalidade	135
5.7.2 Teste de Homocedasticidade	136
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	137
6.1 Concretos curados no LEMA.....	138
6.1.1 Propriedades no estado fresco	138
6.1.2 Propriedades no estado endurecido	139
6.1.3 Comparativo cura úmida <i>versus</i> cura ao ar	153
6.2 Concretos curados no campo	160
6.2.1 Propriedades no estado fresco	160
6.2.2 Propriedades no estado endurecido	161
6.3 Concretos curados no laboratório <i>versus</i> curados no campo	166
6.3.1 Cura ao Ar e Cura Úmida <i>versus</i> Obra	166
7 CONCLUSÃO	173
7.1 Consideração finais	173
7.2 Sugestão para trabalhos futuros	176
REFERÊNCIAS.....	177
APÊNDICE A – Resultados dos ensaios no estado endurecido dos concretos e a estatística desses resultados do laboratório.....	213
APÊNDICE B – Resultados dos ensaios no estado endurecido dos concretos e a estatística desses resultados do campo.....	236
APÊNDICE C – Resultados dos ensaios no estado endurecido dos concretos e a estatística desses resultados do laboratório <i>versus</i> campo.....	241

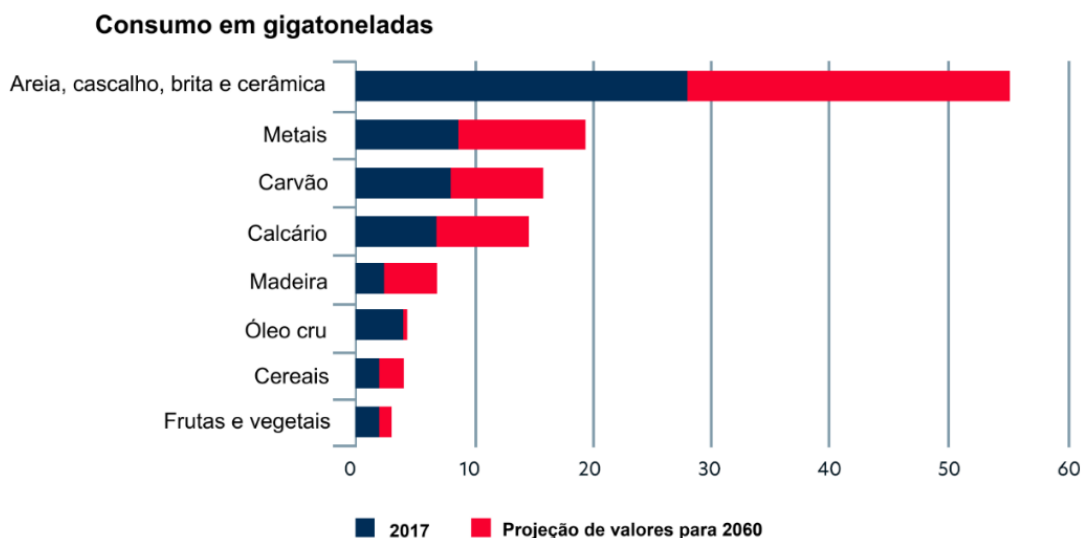
1 INTRODUÇÃO

A Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente – ABREMA (2024) comenta que 44,47 milhões de toneladas de RCD foram coletadas no ano de 2023 (ABREMA, 2024). Considerando os últimos dados do censo demográfico de 2022 que demonstraram que o Brasil possui 207.750.291 habitantes (IBGE, 2022), cada habitante brasileiro produz aproximadamente 214 kg de RCD anualmente.

No Brasil, a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON) estima que, entre 18 e 20 milhões de toneladas de agregado reciclado de RCD são produzidos anualmente no Brasil (Torres, 2023; ABRELPE, 2022). Entretanto, essa quantidade produzida é pequena comparada à quantidade de RCD gerada anualmente (Torres, 2023).

Dada a grande quantidade de resíduos de construção e demolição gerados no setor da construção civil (Torres, 2023; ABREMA, 2024; Mousavinejad *et al.*, 2023; Summit72, 2023; Lopoukhine, 2024; Obas *et al.*, 2024; Rafiq; Khandaker, 2024; Reig-Cerdá; Colomer-Mendoza, 2023; Amiri; Asadbeig, 2024; CIA, 2024; Rondinel-Oviedo, 2023; Requejo, 2023; EPA, 2023; Shamsaei; Carter; Vaillancourt, 2024; Yoon; Choi; Jeon, 2024; Villiers *et al.*, 2024; Nunes; Mahler, 2024), como mostrado no Quadro 1, é evidente que é necessário investir em alternativas eficientemente sustentáveis. Mediante a projeção dos consumos de matérias primas mundial para construção civil até 2060, como mostrado na Figura 1, a reutilização de alguns desses subprodutos na produção de concreto, com substituição parcial do agregado natural, é vantajosa para minimizar potenciais impactos ambientais na produção das misturas (Torres, 2023; Obas *et al.*, 2024; OECD, 2019; Rahla; Mateus; Bragança, 2021).

Figura 1 – Projeção de crescimento global em matérias-primas de construção por tipos



Fonte: Adaptado de Obas *et al.*, 2024; OECD, 2019

Um ponto importante quanto ao uso dos agregados reciclados está relacionado ao desempenho mecânico do concreto obtido, bem como sua durabilidade. Parâmetros como interferência da granulometria e as propriedades no estado fresco são também relevantes para serem analisados, o que poderá viabilizar o uso dos agregados reciclados, obedecendo as recomendações normativas brasileiras (Silva, 2023). Existem diversas pesquisas em andamento que visam entender melhor o comportamento dos agregados reciclados, visando sua inclusão saudável na construção civil (Vintimilla; Etxeberria, 2025; Shamsaei; Carter; Vaillancourt, 2024; Lima, 2024; Uchoa *et al.*, 2024a; Uchoa *et al.*, 2024b).

Quadro 1 – Estimativa da quantidade de RCD gerados em todo o mundo

País	Milhões toneladas/ ano	Materiais cimentícios, cerâmicos e rochas naturais (%)	Substâncias tóxicas (%)	Têxteis (%)	Vidros (%)	Metais (%)	Plásticos (%)	Papel/Papelão (%)	Madeira (%)	Areia/solo (%)	Drywall e/ou gesso (%)	Asfalto (%)	Azulejos/blocos/telhas (%)	Materiais não identificados (%)	Taxa de geração de RCD (kg/m²)	Taxa de reciclagem (%)
China	2360,00	64,84	SD	SD	SD	3,33	SD	12,50	4,33	SD	SD	SD	SD	15,00	41,00	10,00
Estados Unidos	600,00	69,50	SD	SD	SD	0,90	SD	SD	6,80	SD	2,50	20,30	SD	SD	44-47	75,00
Índia	530,00	54,00	SD	SD	SD	5,00	SD	SD	SD	38,00	SD	SD	SD	3,00	SD	10,00
França	246,70	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	70,00
Alemanha	201,00	59,00	1,00	1,00	0,33	4,00	0,33	2,00	0,33	SD	SD	SD	SD	22,00	SD	80,00
Reino Unido	100,23	64,00	2,00	0,00	2,00	4,00	1,00	0,00	SD	SD	SD	SD	SD	27,00	SD	97,00
Holanda	81,00	43,00	0,00	1,00	3,00	9,00	2,00	1,00	5,00	SD	SD	SD	SD	29,00	SD	80,00
Japão	77,00	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	96,00
Coreia do Sul	70,38	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
Taiwan	63,00	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	91,00
Rússia	62,57	60,00	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	40,00	SD	8,00
Brasil	44,47	65,00	SD	SD	SD	SD	8,00	SD	13,00	SD	SD	SD	SD	14,00	SD	7,20
Itália	40,00	44,00	2,00	2,00	1,00	7,00	1,00	2,00	2,00	SD	SD	SD	SD	25,00	SD	96,00
Áustria	35,00	72,00	1,00	0,00	1,00	5,00	2,00	2,00	3,00	SD	SD	SD	SD	12,00	SD	92,00
Colômbia ^a	35,00	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	2,00
Malásia ^b	30,27	44,81	SD	SD	0,35	4,48	0,14	1,27	49,23	SD	SD	SD	0,81	SD	SD	5,00
Espanha	30,00	66,00	1,00	0,00	1,00	4,00	1,00	1,00	2,00	SD	SD	SD	SD	21,00	46-120	68,00
Austrália	27,00	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	62,20

continua

continuação

País	Milhões toneladas/ ano	Materiais cimentícios, cerâmicos e rochas naturais (%)	Substâncias tóxicas (%)	Têxteis (%)	Vidros (%)	Metais (%)	Plásticos (%)	Papel/Papelão (%)	Madeira (%)	Areia/solo (%)	Drywall e/ou gesso (%)	Asfalto (%)	Azulejos/blocos/telhas (%)	Materiais não identificados (%)	Taxa de geração de RCD (kg/m²)	Taxa de reciclagem (%)
Países Baixos	25,71	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	99,80
África do Sul	24,30	69,00	SD	SD	SD	2,10	1,10	SD	2,70	SD	0,30	16,30	SD	8,50	SD	16,00
Hong Kong	24,30	58,67	SD	SD	0,38	3,89	SD	SD	8,84	22,80	SD	0,87	SD	4,43	SD	28,00
Portugal	23,00	71,00	SD	SD	0,33	3,00	0,33	1,00	0,33	SD	SD	SD	SD	17,00	SD	74,00
Bélgica ^c	22,50	41,29	SD	SD	SD	0,13	0,08	SD	1,17	0,80	0,19	11,59	SD	44,75	SD	86,00
Arábia Saudita	22,35	79,50	0,10	SD	12,00	0,10	SD	SD	SD	6,00	0,30	2,00	SD	SD	SD	45,00
Irã ^d	18,99	67,00	SD	SD	1,00	0,70	0,50	1,00	0,50	11,00	4,20	1,30	9,80	3,00	SD	25,08
Finlândia	16,00	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	12,00
Nigéria	15,00	80,00	1,00	0,00	0,00	1,00	1,00	0,00	9,00	SD	SD	SD	SD	7,00	SD	3,12
Kuwait	14,00	35,40	SD	SD	7,40	14,20	8,40	SD	SD	6,80	SD	SD	19,60	8,20	SD	SD
República Checa	13,80	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	60,00
Tailândia	10,00	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	32,00
Canadá	9,00	60,00	SD	SD	SD	6,00	SD	SD	18,00	4,00	5,00	SD	SD	8,00	SD	9,00
Líbano ^e	8,59	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	38-42	SD
Suécia	7,70	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	79,00
Nova Zelândia	7,40	24,00	1,00	2,00	1,00	7,00	4,00	4,00	27,00	SD	SD	SD	SD	30,00	SD	21,06
Iraque	7,25	76,95	0,31	SD	SD	4,67	0,58	0,43	2,37	SD	4,88	SD	6,68	3,13	SD	SD
Suíça	7,00	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	28,00
Egito ^f	5,80	50,00	SD	SD	SD	6,00	SD	SD	20,00	8,00	SD	SD	10,00	6,00	SD	7,00
Cuba ^g	4,06	93,69	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	6,31	SD	SD	SD	SD	SD	SD

continuação

[illegible]

continuação

País	Milhões toneladas/ ano	Materiais cimentícios, cerâmicos e rochas naturais (%)	Substâncias tóxicas (%)	Têxteis (%)	Vidros (%)	Metais (%)	Plásticos (%)	Papel/Papelão (%)	Madeira (%)	Areia/solo (%)	Drywall e/ou gesso (%)	Asfalto (%)	Azulejos/blocos/telhas (%)	Materiais não identificados (%)	Taxa de geração de RCD (kg/m²)	Taxa de reciclagem (%)
Bolívia ^j	0,35	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
Palestina ^k	0,21	63,90	SD	SD	SD	3,50	4,00	2,60	14,20	SD	2,10	3,10	1,20	1,60	SD	SD
Chipre	0,14	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	59,00
Uruguai ^l	0,10	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
RCD total	4954,86	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Outros países ^m	5045,14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Quantidade de dados	62	32	13	9	18	27	19	16	25	10	10	7	6	27	-	53
Mínimo	0,10	24,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,08	0,00	0,05	0,80	0,19	0,87	0,81	1,60	-	0,40
Média	79,98	60,85	1,18	0,67	2,18	4,65	1,99	2,26	8,60	12,44	2,25	7,92	8,02	17,15	-	50,33
Mediana	8,80	63,95	1,00	0,00	1,00	4,00	1,00	1,20	4,33	7,40	2,30	3,10	8,24	12,00	-	60,00
Máximo	2360,00	93,69	3,00	2,00	12,00	16,00	8,40	12,50	49,23	38,00	5,00	20,30	19,60	66,01	-	99,80
Amplitude	2359,90	69,69	3,00	2,00	12,00	15,90	8,32	12,50	49,18	37,20	4,81	19,43	18,79	64,41	-	99,40
Desvio Padrão	310,17	15,49	0,83	0,82	3,26	3,69	2,40	2,90	10,91	10,81	1,86	7,45	6,34	14,76	-	34,32
CV (%)	387,81	25,45	69,94	122,47	149,57	79,39	120,72	128,12	126,90	86,88	82,57	94,06	79,15	86,05	-	68,19

País	Milhões toneladas/ ano	Materiais cimentícios, cerâmicos e rochas naturais (%)	Substâncias tóxicas (%)	Têxteis (%)	Vídras (%)	Metais (%)	Plásticos (%)	Papel/Papelão (%)	Madeira (%)	Areia/solo (%)	Drywall e/ou gesso (%)	Asfalto (%)	Azulejos/blocos/telhas (%)	Materiais não identificados (%)	Taxa de geração de RCD (kg/m²)	Taxa de reciclagem (%)

^a Esse resultado foi adquirido através de uma análise quantitativa dos detritos produzidos pelo setor privado na Colômbia em 2017, sendo esse valor derivado dos censos prediais acessíveis através do Departamento Administrativo Nacional de Estatística (DANE) e da Câmara Colombiana de Construção (CAMACOL).

^b A caracterização do RCD da Malásia foi determinada através da média de quatro projetos de construção em locais diferentes do país.

^c A caracterização do RCD da Bélgica foi determinada através dos dados de caracterização das três principais cidades geradoras desses materiais no país, sendo: Flandres, Valônia e Bruxelas (capital do país).

^d O resultado de RCD gerado é fruto do somatório das cidades iranianas de Teerã (capital do país), Tabriz e Shahroud.

^e O resultado de RCD gerado é fruto do somatório das cidades libanesas de Beirute (capital do país), Bekaa e Monte Líbano.

^f O valor de 7% de reciclagem é de uma mistura de resíduo de construção e demolição com resíduo municipal das prefeituras do Egito.

^g O resultado de RCD em Cuba foi calculado através dos dados de geração de RCD de 370kg/pessoa/ano de ONEI (2011), em conjunto da estimativa da população do país, em 2024, de 10,966038 milhões de pessoas de acordo com Central Intelligence Agency (2024). A caracterização do RCD foi estimada através dos dados de NU (2004), onde foi detalhada a evolução da produção dos materiais de construção no país.

^h Equivalente a capital do Peru, "Lima".

ⁱ Equivalente a capital do México, a "Cidade do México".

^j Equivalente a capital da Bolívia, "La Paz".

^k De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU), a Palestina não é reconhecida como um país e sim como um "Estado observador não membro" desde o final de 2012. Os resultados apresentados de RCD anual são equivalentes a Palestina, parte de Jerusalém (Jerusalém Oriental) e a Faixa de Gaza.

^l Equivalente a capital do Uruguai, "Montevidéu".

^m É estimado que mais de 10 bilhões de toneladas de RCD são gerados anualmente (Dias *et al.*, 2022; Mola *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2019; Huang *et al.*, 2018; Elhakam; Mohamed; Awad, 2012; McGinnis *et al.*, 2017; Jain; Powell; Tolaymat, 2015). Considerando os dados levantados, a quantidade de RCD gerada nos outros países não detalhados (sem quantificação da quantidade de RCD, sem dados de caracterização e sem taxa de reciclagem detalhada) foi feita subtraindo esse valor do total encontrado (RCD Total).

SD = sem dados.

conclusão

País	Milhões toneladas/ ano	Materiais cimentícios, cerâmicos e rochas naturais (%)	Substâncias tóxicas (%)	Têxteis (%)	Vidros (%)	Metais (%)	Plásticos (%)	Papel/Papelão (%)	Madeira (%)	Areia/solo (%)	Drywall e/ou gesso (%)	Asfalto (%)	Azulejos/blocos/telhas (%)	Materiais não identificados (%)	Taxa de geração de RCD (kg/m²)	Taxa de reciclagem (%)
<p>Fontes utilizadas na elaboração desse quadro: Torres, 2023; ABREMA, 2024; Mousavinejad <i>et al.</i>, 2023; Özalp <i>et al.</i>, 2016; Rosado <i>et al.</i>, 2019; Singh <i>et al.</i>, 2023; Haider <i>et al.</i>, 2022; Soto-paz <i>et al.</i>, 2023; CCME, 2019; Dillon Consulting; Metabolic; Summit72, 2023; Lopoukhine, 2024; Obas <i>et al.</i>, 2024; Rahla; Mateus; Bragança, 2021; Islam <i>et al.</i>, 2019; Chowdhury <i>et al.</i>, 2016; Fatemi, 2012; Rafiq; Khandaker, 2024; Deloitte, 2017; Menegaki; Damigos, 2018; Auckland Council, 2017; Ministry for the Environment, 2019; Seadon; Aladwan; Golding, 2022; Daoud, 2022; El-Desouky; Ibrahim; Eldieb, 2018; EMOE, 2017; Huang <i>et al.</i>, 2022; UNAM, 2017; Araiza-Aguilar <i>et al.</i>, 2019; Srour <i>et al.</i> 2013; Ferronato <i>et al.</i>, 2023; Colorado; Muñoz; Monteiro, 2022; CAMACOL, 2017; CSB, 2021; Al-Raqeb <i>et al.</i>, 2023; Almusawi; Karim; Ethaib, 2022; John <i>et al.</i>, 2004; BBC, 2023; MoLG-JICA, 2017; Thöni; Matar, 2019; Stake, 2013; Afroz; Masud, 2011; Umar; Shafiq; Ahmad, 2021; Mah; Fujiwara; Ho, 2016; Umar; Shafiq; Isa, 2018; Ginga; Ongpeng; Daly, 2020; Huang <i>et al.</i>, 2018; Aslam; Huang; Cui, 2020; Kofoworola; Gheewala, 2009; IMP, 2020; Atabi; Reig-Cerdá; Colomer-Mendoza, 2023; Taghipour <i>et al.</i>, 2019; Hafezi, 2010; Past <i>et al.</i>, 2023; Bigdelo <i>et al.</i>, 2020; Broujeni <i>et al.</i>, 2016; Nghiem <i>et al.</i>, 2020; Monre, 2011; Hoang <i>et al.</i>, 2019; Nguyen, 2019; Nguyen <i>et al.</i>, 2021; Duan <i>et al.</i>, 2019; Jin <i>et al.</i>, 2017; Umar <i>et al.</i>, 2017; Poon; Yu; NG, 2001; Liu <i>et al.</i>, 2015; DE, 2015; Zhang <i>et al.</i>, 2020; Haider <i>et al.</i>, 2022; Rosado <i>et al.</i>, 2019; USEPA, 2020; Hao <i>et al.</i>, 2020; Amiri; Asadbeig, 2024; Asgari <i>et al.</i>, 2017; Rouhi Broujeni <i>et al.</i>, 2016; Bergsdal; Böhne; Brattebø, 2007; Minprirody of Russia, 2018; Trubnikova, 2020; Pavón; Martínez; Etxeberria, 2014; Onei, 2011; Fernandez, 2012; CIA, 2024; NU, 2004; Rondinel-Oviedo, 2023; INEI, 2021; Guillot, 2022; Requejo, 2023; EPA, 2023; Wang; Xie; Lin, 2022; Zhang <i>et al.</i>, 2022; Shooshtarian <i>et al.</i>, 2022; Molla <i>et al.</i>, 2021; Shamsaei; Carter; Vaillancourt, 2024; Zheng <i>et al.</i>, 2017; Yoon; Choi; Jeon, 2024; Wu <i>et al.</i>, 2021; Yazdani <i>et al.</i>, 2021; Korea Ministry of Environment, 2019; EPA, 2018; Adams; Thornback, 2022; European Union, 2022; Abera, 2022; EPA, 2020; Villiers <i>et al.</i>, 2024; EC, 2011; SAWIC, 2018; Hubert; Michel; Courard, 2022; Wang <i>et al.</i>, 2021; Nunes; Mahler, 2024</p>																

Fonte: Autor, 2025

1.1 Justificativa

É reconhecido mundialmente que a busca por soluções sustentáveis ativa e motiva a comunidade científica internacional (Oliveira, 2023a). A procura de métodos para reduzir a acumulação de resíduos descartados e diminuir a extração de recursos naturais é urgente e deve ser ativamente encorajada pela indústria da construção civil (Oliveira, 2023a). Portanto, a reciclagem de resíduos da construção civil em novas edificações é uma forma eficaz de descartá-los adequadamente, e minimizar a extração de recursos naturais (Oliveira, 2023a; Silva, 2023).

A atualização da norma NBR 15116 (ABNT, 2021b) permitiu a utilização de agregados reciclados de concreto (ARCO) para fins estruturais. Entretanto, ainda são necessários estudos para compreender e absorver a heterogeneidade presente nos AR, que é considerada o principal obstáculo à sua utilização para fins estruturais (Gomes, 2021). Essa heterogeneidade é maior nos agregados reciclados mistos (ARM), que é a forma como muitas vezes os resíduos são encontrados, sem separação de componentes de concreto e cerâmicos, por exemplo.

Estudos já comprovam a viabilidade técnica e econômica do emprego de agregados reciclados em projetos de pavimentação rodoviária, bem como em outras aplicações que não requeiram função estrutural (Silva, 2023). O mesmo autor comenta que para utilizar esses materiais em maior escala, é necessária a sua incorporação em estruturas.

Dessa forma, uma das justificativas para a realização deste estudo é a notável escassez de pesquisas que explorem o uso de ARM, com foco em desempenho em aplicações estruturais, tanto no Brasil quanto no mundo. Esta lacuna é especialmente crítica dada a heterogeneidade significativa nas propriedades dos agregados reciclados mistos, um aspecto que coloca desafios à sua viabilidade estrutural (Meng *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2022; Yang; Du; Bao, 2011; Bazaz; Khayati, 2012; Salles *et al.*, 2021).

A segunda justificativa para a realização deste estudo é devido ao cenário local dos bairros da cidade de Maceió/AL atingidos pelo afundamento do solo. Nestas áreas, existe uma necessidade premente de encontrar formas de aproveitar os detritos resultantes da demolição das casas, que são predominantemente constituídos por materiais cerâmicos e cimentícios (Vassileva *et al.*, 2021). É fundamental explorar o

potencial destes materiais para fins sustentáveis dentro da construção civil, pois a sua adequada gestão e reintegração no processo construtivo pode contribuir para a recuperação e revitalização dos bairros afetados (Bulhões, 2022).

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho é avaliar o desempenho de concretos produzidos com agregado reciclado misto graúdo (ARM_g).

1.2.2 Objetivos Específicos

- Verificar a influência do tipo de cura no comportamento mecânico do concreto;
- Verificar a influência das condições climáticas no comportamento mecânico do concreto;
- Analisar a influência do metacaulim no comportamento mecânico do concreto.

2 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Os resíduos de construção e demolição (RCD), vulgarmente designados por entulho, calcário ou estilhaços, são o produto do processo de construção, demolição, desconstrução, renovação, reparação, pavimentação, correção e até alteração dos materiais originários da construção (ABRECON, 2023a). Oliveira *et al.* (2011) comenta que no Brasil, estima-se que a maior parte (65%) do RCD seja composto por componentes minerais, 13% composto por madeira, 8% por plástico e 14% por outros materiais, sendo essas variações podendo ser atribuídas a fatores regionais, sazonais e ocupacionais.

Fadiya, Georgakis e Chinyio (2014) comentam outras possíveis fontes e causas originárias de RCD, como mostradas no Quadro 2. Já no Quadro 3, ABRELP (2022) separa os resíduos encontrados predominantemente no entulho em três grupos, dos quais, são recicláveis para a produção dos agregados de RCD os grupos 1 e 2.

Quadro 2 – Aspectos originários da geração de RCD

Fontes de resíduos	Causas
Erro na aquisição dos materiais	Erro de pedido, erro de fornecedor
Projeto	Mudanças no projeto, erro na documentação
Manuseio dos materiais	Perdas no transporte e na descarga, armazenamento inadequado
Operação	Retrabalho
Condições climáticas	Umidade, temperatura
Vandalismo	Segurança insuficiente
Extravio	Material perdido, abandonado
Demolição, residual, restos	Cortes de diversos tamanhos de materiais
Outros	Falta de um plano para gestão dos resíduos

Fonte: Adaptado de Fadiya, Georgakis e Chinyio (2014)

Quadro 3 – Classificação dos RCD quanto aos entulhos

Entulhos	
Grupo 1	Materiais compostos de cimento, cal, areia e brita: concretos, argamassa, blocos de concreto
Grupo 2	Materiais cerâmicos: telhas, manilhas, tijolos, azulejos
Grupo 3	Materiais não-recicláveis: solo, gesso, metal, madeira, papel, plástico, matéria orgânica, vidro e isopor. Desses materiais, alguns são passíveis de serem selecionados e encaminhados para outros usos. Assim, embalagens de papel e papelão, madeira e mesmo vidro e metal podem ser recolhidos para reutilização ou reciclagem

Fonte: Adaptado de ABRELP, 2022

Os RCD são definidos pela Resolução CONAMA nº 307 (BRASIL, 2002) como emergentes de projetos de construção, reformas, demolições de obras de engenharia civil e preparo e escavação de solo, classificando-os em quatro categorias, como mostrado na Quadro 4 (ABRECON, 2023b).

Quadro 4 – Classificação dos resíduos de construção e demolição por Resoluções CONAMA

CLASSE	CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL	EMPREENDIMENTO(S) QUALIFICADO(A) A RECEBER
A	São os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto; c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fio etc.) produzidas nos canteiros de obras.	Usina de Reciclagem RCD NBR 15114 (ABNT, 2004c) Aterro de Inertes NBR 15113 (ABNT, 2004b) Área de Transbordo e Triagem - ATT NBR 15112 (ABNT, 2004a)
B	São os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso; (Redação Resolução nº 469/15).	Usina de Reciclagem RCD NBR 15114 (ABNT, 2004c) Área de Transbordo e Triagem - ATT NBR 15112 (ABNT, 2004a) Aterro Sanitário NBR 15849 (ABNT, 2010b)
C	São os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnológicas ou aplicações economicamente.	Aterro Sanitário NBR 15849 (ABNT, 2010b) Aterro de Resíduos Não Perigosos NBR 13896 (ABNT, 1997)
D	São resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetivos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde. (redação dada pela Resolução nº 431/11).	Aterro de Resíduos Perigosos NBR 10157 (ABNT, 1987)

Fonte: Adaptado de ABRECON, 2023b

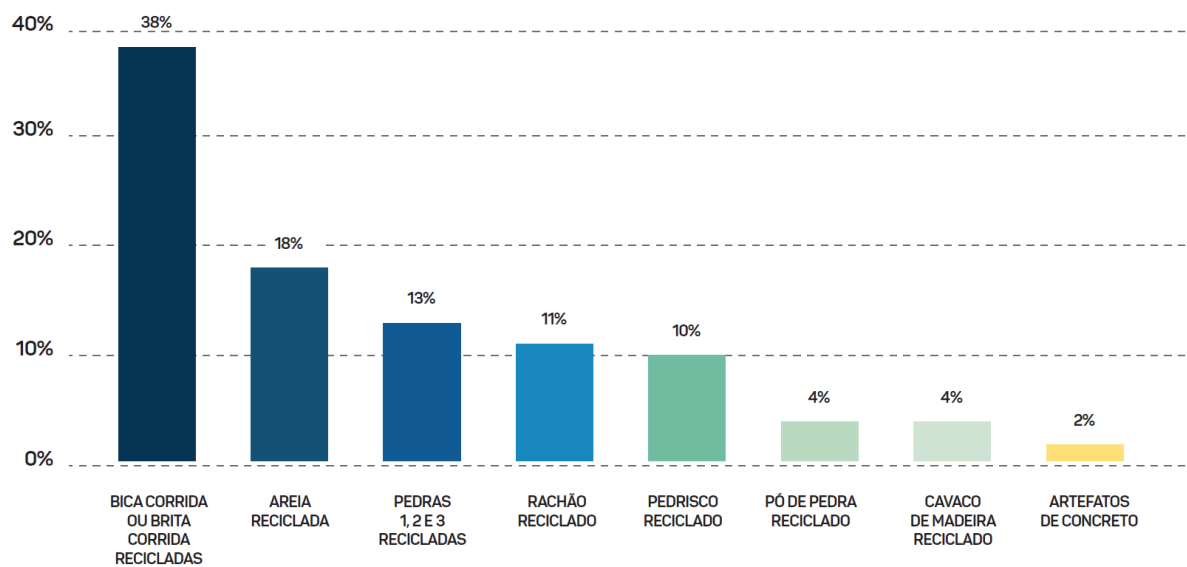
Além da classificação do RCD pela Resolução CONAMA nº 307 (BRASIL, 2002), em 2010 os RCD foram inclusos como Resíduo Sólido Urbano (RSU) pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (Brasil, 2020). A Lei Federal nº 12.305, de 2 de agosto de 2010 (Brasil, 2010) instituiu a Política Nacional do Meio Ambiente (PNAM), coordenada pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA), para planejar ações estratégicas relativas a esse setor.

2.1 Composição e variabilidade dos RCD

Os resíduos de construção e demolição são normalmente compostos por uma variedade de materiais e componentes, incluindo concreto, tijolo, azulejo, cerâmica, pedra, vidro, metal, plástico, madeira, materiais cimentícios, materiais de isolamento e substâncias perigosas (Suarez-Riera *et al.*, 2024; Papastamoulis *et al.*, 2021; Gonçalves, 2011). Estes resíduos apresentam um elevado grau de variabilidade nas suas características físicas, dependendo de tipologias regionais, de técnicas de construção e demolição, das condições climáticas, das atividades económicas e dos avanços tecnológicos na construção civil (Saéz; Osmani, 2019; Gonçalves, 2011). Dessa forma, eles são tipicamente densos e com difícil manuseio, tendo características variáveis, como teor de umidade, tamanho de partícula e composição.

O material mais abundante encontrado nos resíduos de construção e demolição (RCD) no Brasil é a argamassa, principalmente a argamassa de concreto utilizada na construção de estruturas (SINIR, 2023; PLANARES, 2022). Com isso, o maior percentual de material reciclável gerado nas unidades de reciclagem de RCD é a bica, que é brita reciclada, entretanto, outros materiais também são encontrados (PLANARES, 2020). As porcentagens dos materiais encontrados nos RCD produzidos no Brasil (ABRECON, 2015), são mostradas na Figura 2.

Figura 2 – Materiais produzidos pelas unidades de reciclagem de RCD no Brasil



Fonte: ABRECON, 2015

3 AGREGADOS RECICLADOS

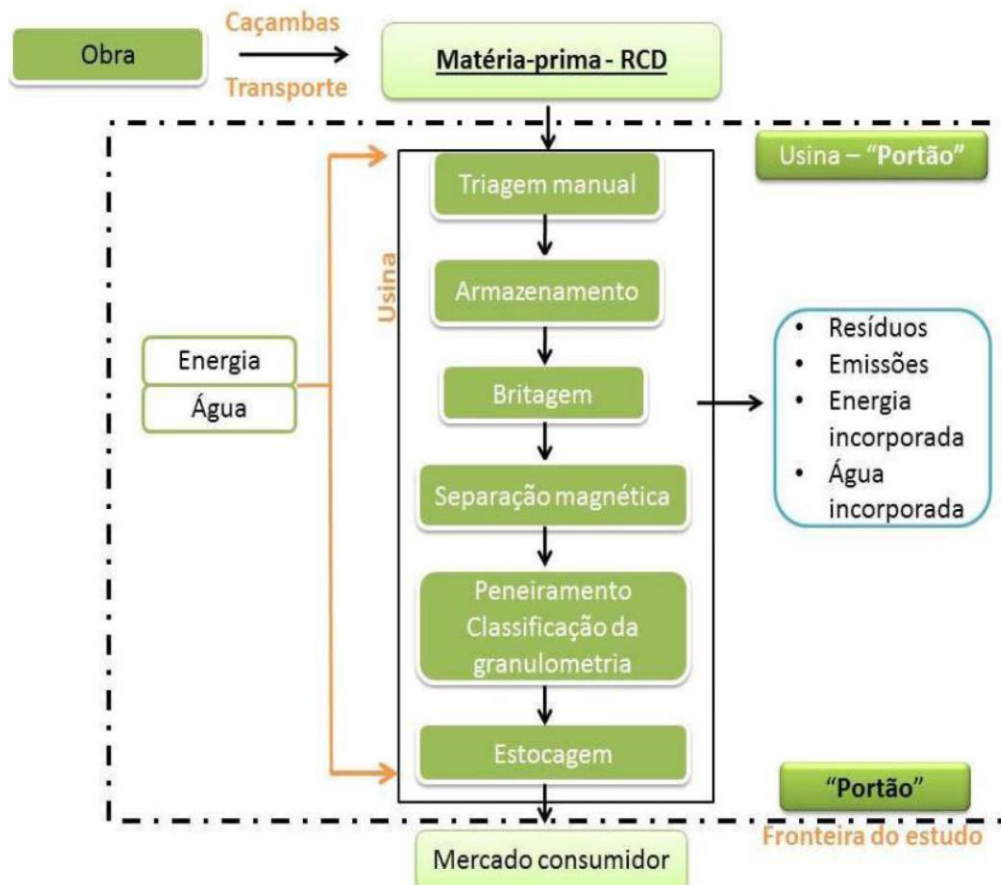
A acumulação de resíduos gerados por diversas indústrias, particularmente a de construção, que também conduz a um elevado consumo de matérias-primas, fez com que o conceito de sustentabilidade através da reciclagem se tornasse cada vez mais proeminente ao longo do tempo (Silva, 2023).

Os principais aspectos quanto ao âmbito dos agregados reciclados são: beneficiamento, britagem, recomendações normativas e principais características quanto a caracterização.

3.1 Beneficiamento dos agregados reciclados

As etapas do processo de beneficiamento dos resíduos de construção e demolição começam desde a coleta da matéria prima RCD, tendo sua finalização quando os agregados reciclados são gerados e entregues ao mercado consumidor (Paz; Possan; Punhagui, 2023), como mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma do processo de produção de agregado reciclado de RCD



Fonte: Paz, Possan, Punhagui, 2023

3.1.1 Britagem

A etapa de britagem é de grande importância e ocorre em equipamentos chamados britadores, que são máquinas usadas para quebrar ou fragmentar materiais em pedaços menores (Santos, 2016a). A atividade desempenhada na britagem é a cominuição, sendo essa a quebra/fragmentação de partículas por compressão ou impacto de um determinado material, com objetivo de atingir uma granulometria compatível para utilização ou para posterior beneficiamento (Santos, 2016a; Pinto; Taborda, 2023; Angulo; Ulsen, 2023). De acordo com Ângulo e Ulsen (2023), o processo mecânico de fragmentação de partículas pode ser executado em um ou mais estágios da britagem, sendo comumente utilizadas a britagem primária e a secundária para o processamento do RCD.

A britagem, quando utilizada em RCD, não apenas terá a função de redução do tamanho do resíduo para adequação à granulometria definida para os agregados reciclados, como também servirá para melhor separação do concreto, ou seja, separar o agregado natural da pasta de cimento porosa endurecida presente no resíduo (Angulo; Ulsen, 2023). Quattrone, Angulo e John (2014) comentam que quanto mais sucessivos processos de britagem forem executados nos agregados reciclados cimentícios, maior poderá ser a redução da quantidade de pasta de cimento aderida nos mesmos, o que resulta em agregados reciclados mais aproximados aos naturais quanto às suas características. Os autores justificam esse fenômeno devido à liberação de grande quantidade dos agregados naturais (virgens) antigos que estavam presentes no resíduo cimentício.

3.2 Recomendações Normativas referentes aos agregados reciclados

A norma NBR 15116 (ABNT, 2021b), atualizada conforme resolução CONAMA 469 (BRASIL, 2015), permite a utilização de agregados reciclados Classe A tanto para fins estruturais quanto não estruturais. De acordo com a norma, os agregados reciclados podem ser classificados em quatro tipos para utilização em argamassas e concretos de cimento Portland:

- Agregado reciclado de concreto (ARCO): constituído por resíduos de concreto;
- Agregado reciclado cimentício (ARCI): constituído por materiais cimentícios diversos (concretos, argamassas, blocos pré-moldados de concreto etc.), podendo incluir teores reduzidos de cerâmica vermelha;

- Agregado reciclado misto (ARM): constituído por uma mistura de materiais cimentícios e materiais cerâmicos.

Com a atualização da NBR 15116 (ABNT, 2021b) em 2021, mudanças significativas foram apresentadas, tais como:

- Calcular a quantidade de água necessária para a execução da pré-molhagem dos agregados reciclados de RCD;
- A utilização de agregados reciclados para dosagens de concreto para fins estruturais é possível, desde que cumpridas as devidas recomendações, como a restrição do uso de ARCO, a substituição de 20% dos agregados convencionais por agregados reciclados e os concretos serem das classes I e II de agressividade ambiental, de acordo com os requisitos do item 5.2 da NBR 15116 (ABNT, 2021b).

Considerando as regulamentações citadas na NBR 15116 (ABNT, 2021b), é perceptível uma limitação em relação ao percentual de substituição do agregado reciclado e do tipo específico para uso, pois essa norma frisa como uso único de 20% de ARCO para concretos com fins estruturais e não permite uso de ARM e ARCI. Porém, existem vários estudos que utilizaram ARM em suas composições, nos quais foram obtidos resultados satisfatórios com o mínimo de 20 MPa para a resistência à compressão aos 28 dias (Fernandes, 2015; Frotte *et al.*, 2017; Santos, 2018; Santana, 2018; Tomasi, 2021; Salgado; Silva, 2021; Gomes, 2021; Oliveira, 2023b; Oliveira, 2023c; Lovato, 2007; Frotte; Di Nubilla, 2015; Silva; Andrade, 2017; Leite, 2001; Carneiro, 2011; Gonzalez *et al.*, 2021; Joseph *et al.*, 2023; Joseph *et al.*, 2022; Meng *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2022; Meng *et al.*, 2021a; Cantero *et al.*, 2021b; Cantero *et al.*, 2020; Salles *et al.*, 2021; Rosales *et al.*, 2023; López-Uceda *et al.*, 2016a; Medina *et al.*, 2014; Viera, 2003; Silva *et al.*, 2024; Uchoa *et al.*, 2024b; Vintimilla; Etxeberria, 2025) requisitado pela NBR 8953 (ABNT, 2015), para que o concreto seja considerado estrutural.

Além de tudo, existe uma lacuna na norma NBR 15116 (ABNT, 2021b) acerca da dimensão do agregado reciclado que poderá ser utilizado para o uso em concreto, a qual não cita se seria miúdo ou graúdo, considerando apenas o agregado total reciclado, que deverá obedecer a critérios de ponderabilidade em massa entre os agregados graúdos e miúdos reciclados. Esta constatação é de extrema importância, pois a dimensão do material impacta diretamente nas propriedades do concreto,

sendo essa informação frisada pelos autores Costa (2021), Reis (2021), Silva (2023) e Rodrigues e Fuciles (2014).

A norma NBR 15116 (ABNT, 2021b) apresenta os requisitos para uso estrutural ou não estrutural dos agregados reciclados das subclasses ARCO, ARCI e ARM, e dos agregados totais e/ou compostos em produtos e compósitos cimentícios, como visto no Quadro 5, e também apresenta os limites recomendados de teor de cerâmica vermelha e granulometria, como mostrado no Quadro 6.

Quadro 5 – Requisitos específicos dos agregados totais reciclados e compostos para uso em produtos e compósitos cimentícios¹

Ensaaios		Limite %	Requisito	Método de ensaio
Materiais indesejáveis ² (G4)	Teor	< 1	Anexos A e B	Anexos A e B
Argila em torrões	Teor	< 3	NBR 7211 (ABNT, 2022a)	NBR 7218 (ABNT, 2010a)
Sulfatos	Teor	< 0,1	NBR 7211 (ABNT, 2022a)	NBR 9917 (ABNT, 2022b)
Cloretos	Teor para concreto simples	< 0,2	NBR 7211 (ABNT, 2022a)	NBR 9917 (ABNT, 2022b)
	Teor para concreto armado	< 0,1		
	Teor para concreto protendido	< 0,01		
Absorção de água	Classe ARCO	< 7	5.3	NBR 16917 (ABNT, 2021e) (gráudo)
	Classe ARCI ou ARM	< 12	5.3	NBR 16916 (ABNT, 2021d) (miúdo)
Finos (< 0,075 mm)	Teor para concretos protegidos de desgaste superficial	< 12	NBR 7211 (ABNT, 2022a)	NBR 16973 (ABNT, 2021g)
	Teor para concretos submetidos de desgaste superficial	< 10		

¹ Por exigência do consumidor, pode ser necessária a verificação da reação álcali-agregado, de acordo com a ABNT NBR 15577-1. A mesma exigência pode ser aplicada a outras propriedades do agregado reciclado, como massa unitária, massa específica, ciclagem etc.

² São considerados materiais indesejáveis os fragmentos de natureza orgânica, como madeiras, plástico, betume e materiais carbonizados, e de natureza inorgânica, como vidros, vidrados cerâmicos e gesso. Os Anexos A e B estabelecem os métodos para determinação desses materiais.

Fonte: Adaptado da NBR 15116 (ABNT, 2021b)

Quadro 6 – Recomendações dos agregados totais reciclados e compostos para uso em materiais cimentícios

Ensaio		Limite sugerido	Requisito	Método de ensaio
Teor de cerâmica vermelha ou branca não polida (G3)	Classe ARCO	0%	Anexos A e B	Anexos A e B
	Classe ARCI	< 10%		
	Classe ARM	< 40%		
Granulometria	Agregado graúdo	4,75/12,5 mm	NBR 7211 (ABNT, 2022a)	NBR 17054 (ABNT, 2022e)
		9,5/25 mm		
		19/31,5 mm		
		37,5/75 mm		
		25/50 mm		
	Agregado miúdo	Zona utilizável		
		Zona ótima		

Fonte: Adaptado da NBR 15116 (ABNT, 2021b)

3.3 Propriedades características do ARM

3.3.1 Variabilidade

Santana *et al.* (2001) constataram que a composição do RCD pode variar dependendo de diversos fatores, como o tipo da obra e sua localização regional, a época do ano, o tipo de técnica construtiva utilizada, dentre outros fatores. Essa variabilidade influencia ativamente nos agregados reciclados produzidos, podendo alterar as propriedades físicas, como granulometria, forma, textura, massa específica e absorção de água (Santana *et al.*, 2001; Angulo, 2000; Oliveira, 2015).

O Quadro 7 mostra a variabilidade dos ARM dentre a bibliografia recente, onde em média:

- 44,99% das composições de ARM equivalem a materiais cimentícios;
- 24,06% das composições de ARM equivalem a fragmentos de pedras naturais;
- 24,10% das composições de ARM equivalem a materiais cerâmicos;
- 7,02% das composições de ARM equivalem a materiais contaminantes e impurezas.

Quadro 7 – Informações da literatura quanto à variabilidade dos materiais que compõem os ARM

Autores	G1 Materiais Cimentícios (%)	G2 Fragmentos de rochas naturais (%)	G3 Materiais Cerâmicos (%)	G4 Contaminantes e impurezas (%)	G4 Limite normativo NBR 15116 (ABNT, 2021b) G4 < 1%	Local/País
Leite (2001)	43,44	29,84	26,33	0,39	SIM	Porto Alegre - RS (Brasil)
Viera (2003)	46,47	0,48	48,15	4,90	NÃO	Maceió - AL (Brasil)
Carneiro (2011)	73,00	0,60	25,60	0,90	SIM	Feira de Santana - BA (Brasil)
Lima; Leite (2012)	55,00	16,00	26,00	3,00	NÃO	Feira de Santana - BA (Brasil)
Jimenez <i>et al.</i> (2013)	40,00	0,00	54,00	6,00	NÃO	Córdoba (Espanha)
Medina <i>et al.</i> (2014)	45,64	28,06	5,30	21,00	NÃO	Glasgow (Escócia)

continua

continuação

Autores	G1 Materiais Cimentícios (%)	G2 Fragmentos de rochas naturais (%)	G3 Materiais Cerâmicos (%)	G4 Contaminantes e impurezas (%)	G4 Limite normativo NBR 15116 (ABNT, 2021b) G4 < 1%	Local/País
Rodríguez-Robles <i>et al.</i> (2014) ^a	49,14	29,47	16,51	4,89	NÃO	(Espanha)
	28,67	33,91	33,56	3,86	NÃO	
	33,07	37,65	28,43	0,86	SIM	
	46,69	20,02	31,41	1,89	NÃO	
	56,41	18,08	23,96	1,55	NÃO	
	14,03	45,44	38,08	2,45	NÃO	
	44,11	17,51	33,56	4,83	NÃO	
	32,01	42,69	21,42	3,88	NÃO	
	36,35	9,33	49,89	4,43	NÃO	
	12,76	21,38	64,75	1,12	NÃO	
	46,86	23,83	24,08	5,21	NÃO	
	34,62	38,72	21,91	4,75	NÃO	
Garach <i>et al.</i> (2015) ^b	42,10	48,50	0,30	9,10	NÃO	Granada (Espanha)
	31,50	36,50	23,70	8,30	NÃO	
Gómez-Meijide; Pérez; Pasandín, (2016)	69,90	25,10	0,20	4,80	NÃO	(Espanha)
López-Uceda <i>et al.</i> (2016a) ^c	49,00	34,90	13,90	2,20	NÃO	Córdoba (Espanha)
	44,60	24,00	30,20	1,20	NÃO	
López-Uceda <i>et al.</i> (2016b)	44,60	24,00	30,20	1,20	NÃO	Córdoba (Espanha)

continuação

Autores	G1 Materiais Cimentícios (%)	G2 Fragmentos de rochas naturais (%)	G3 Materiais Cerâmicos (%)	G4 Contaminantes e impurezas (%)	G4 Limite normativo NBR 15116 (ABNT, 2021b) G4 < 1%	Local/País
Martínez <i>et al.</i> , (2016) ^d	31,00	40,00	18,00	11,00	NÃO	Havana (Cuba)
	28,00	17,00	32,00	23,00	NÃO	
	20,00	63,00	11,00	6,00	NÃO	
	55,00	1,00	7,00	37,00	NÃO	
Silva; Andrade (2017)	43,20	48,00	7,20	1,60	NÃO	(Brasil)
Agrela <i>et al.</i> (2020)	25,20	46,90	25,60	6,10	NÃO	Porto de Huelva (Espanha)
Barbudo <i>et al.</i> (2020)	34,00	47,00	18,00	1,00	SIM	Córdoba (Espanha)
Cantero <i>et al.</i> (2020)	47,10	25,20	22,60	5,10	NÃO	Lisboa (Portugal)
Ferreira <i>et al.</i> (2020)	74,43	17,64	9,32	0,60	SIM	São José do Mipibú - RN (Brasil)
Roque <i>et al.</i> (2020)	48,90	21,90	17,30	12,00	NÃO	Figueira da Foz (Portugal)
Cantero <i>et al.</i> (2021a)	47,10	25,20	22,60	5,10	NÃO	Lisboa (Portugal)
Cantero <i>et al.</i> (2021b)	45,50	44,30	9,02	1,15	NÃO	Estremadura (Espanha)

continuação

Autores	G1 Materiais Cimentícios (%)	G2 Fragmentos de rochas naturais (%)	G3 Materiais Cerâmicos (%)	G4 Contaminantes e impurezas (%)	G4 Limite normativo NBR 15116 (ABNT, 2021b) G4 < 1%	Local/País
Gomes (2021)	93,72	2,51	2,51	1,26	NÃO	Varginha - MG (Brasil)
González <i>et al.</i> (2021)	43,98	43,94	10,93	1,25	NÃO	Cáceres (Espanha)
Jesus <i>et al.</i> (2021)	70,83	0,01	17,34	11,82	NÃO	(Portugal)
Meng <i>et al.</i> (2021b)	61,30	0,00	31,70	7,00	NÃO	Hangzhou (China)
Salgado; Silva (2021)	87,20	0,00	12,50	0,30	SIM	Rio de Janeiro - RJ (Brasil)
Joseph <i>et al.</i> (2022)	16,00	73,80	1,07	11,60	NÃO	Telangana (Índia)
Meng <i>et al.</i> (2022) ^e	70,00	0,00	30,00	0,00	SIM	Zhoushan (República Popular da China)
	40,00	0,00	60,00	0,00	SIM	
Rodriguez-Alvaro <i>et al.</i> (2022)	20,00	9,40	70,00	0,50	SIM	(Espanha)
Silva <i>et al.</i> (2022)	43,00	9,00	26,00	22,00	NÃO	Porto Alegre - RS (Brasil)
Barroso <i>et al.</i> (2023)	28,00	44,00	24,00	4,00	NÃO	Plasencia (Espanha)

continuação

Autores	G1 Materiais Cimentícios (%)	G2 Fragmentos de rochas naturais (%)	G3 Materiais Cerâmicos (%)	G4 Contaminantes e impurezas (%)	G4 Limite normativo NBR 15116 (ABNT, 2021b) G4 < 1%	Local/País
Bastos <i>et al.</i> (2023) ^f	42,50	27,50	21,70	10,60	NÃO	(Portugal)
	61,50	26,70	9,20	2,60	NÃO	(Portugal)
	37,40	16,30	26,60	19,80	NÃO	(Portugal)
Borges <i>et al.</i> (2023)	40,60	19,60	28,00	11,80	NÃO	(Brasil)
Chen <i>et al.</i> (2023)	58,00	21,00	17,00	4,00	NÃO	(Belgica)
Gratão (2023)	49,65	19,83	28,97	1,46	NÃO	Ribeirão Preto - SP (Brasil)
Oliveira (2023b)	42,45	28,45	28,86	0,24	SIM	Pato Branco - PR (Brasil)
Oliveira (2023c)	53,88	28,21	15,84	2,08	NÃO	Foz do Iguaçu - PR (Brasil)
Lima (2024)	42,34	10,34	44,83	2,59	NÃO	Maceió - AL (Brasil)
Naim <i>et al.</i> (2024)	17,00	50,00	0,44	32,75	NÃO	Casablanca (Marrocos)
Silva <i>et al.</i> (2024)	42,34	10,34	44,83	2,59	NÃO	Maceió - AL (Brasil)

continuação

Autores	G1 Materiais Cimentícios (%)	G2 Fragmentos de rochas naturais (%)	G3 Materiais Cerâmicos (%)	G4 Contaminantes e impurezas (%)	G4 Limite normativo NBR 15116 (ABNT, 2021b) G4 < 1%	Local/País
Suarez-Riera <i>et al.</i> (2024)	35,00	0,00	1,00	64,00	NÃO	(Itália)
Uchoa <i>et al.</i> (2024)	42,34	10,34	44,83	2,59	NÃO	Maceió - AL (Brasil)
Kepniak (2025)	88,50	4,70	0,20	6,60	NÃO	Warsaw (Polonia)
Rosales <i>et al.</i> (2025)	44,00	32,50	20,60	2,90	NÃO	Cordoba (Espanha)
Vintimilla; Etxeberria (2025)	43,43	24,31	28,38	3,88	NÃO	Barcelona (Espanha)

conclusão

Autores	G1 Materiais Cimentícios (%)	G2 Fragmentos de rochas naturais (%)	G3 Materiais Cerâmicos (%)	G4 Contaminantes e impurezas (%)	G4 Limite normativo NBR 15116 (ABNT, 2021b) G4 < 1%	Local/País
Quantidade de Dados	63	63	63	63	-	-
Mínimo	12,76	0,00	0,20	0,00	-	-
Média	44,99	24,06	24,10	7,02	-	-
Mediana	43,44	24,00	23,96	3,88	-	-
Máximo	93,72	73,80	70,00	64,00	-	-
Amplitude	80,96	73,80	69,80	64,00	-	-
Desvio padrão	17,00	17,02	15,74	10,38	-	-
CV (%)	37,78	70,72	65,32	147,82	-	-
<p>^a Os autores usaram RCD's de doze usinas de reciclagem diferentes presentes em diversas províncias na Espanha.</p> <p>^b Os dois agregados reciclados foram obtidos numa central de reciclagem (Inerts Aggregate Guhilar) situada em Granada, Espanha.</p> <p>^c Os autores utilizaram dois agregados reciclados mistos (MRA1 e MRA2) com diferentes percentagens de partículas cerâmicas recolhidas em dias diferentes numa estação de tratamento de RCD localizada em Córdoba (sul de Espanha).</p> <p>^d Os autores usaram RCD's de quatro habitações diferentes, de diferentes tipologias de construção, presentes na cidade de Havana em Cuba.</p> <p>^e Os autores caracterizaram dois agregados com teores diferentes de material cerâmico.</p> <p>^f Os autores usaram RCD's de três diferentes usinas de reciclagem presentes em Portugal.</p>						

Fonte: Autor, 2025

3.3.2 Contaminação e impurezas

Lima (1999) classifica como contaminantes em materiais reciclados, materiais inertes que possam estar presentes, como cloretos, sulfatos, matéria orgânica, produtos industrializados leves, como papel e plástico, além de vidro, ou materiais orgânicos, como betume, vegetação, terra, madeira e outros.

Miranda e Selmo (2003) relataram que as contaminações mais comuns encontradas na areia reciclada são quantidades excessivas de materiais pulverulentos, matéria orgânica e restos de construção, as quais devem ser eliminadas através da seleção prévia de RCD. Dentre as possíveis contaminações existentes nos RCD, o gesso é uma grande preocupação para os autores, pois pode contaminar as argamassas através dos sulfatos, onde, para reduzir os efeitos, é recomendado utilizar previamente cimentos mais resistentes aos sulfatos, como CP III RS e CP IV RS.

Levy (1997) relatou que pequenas quantidades de contaminação de aço ou arame em agregados reciclados podem causar manchas ou pequenos danos às superfícies de concreto, especialmente quando cloretos estão presentes. A remoção de metais provenientes de RCD pode ser executada antes do beneficiamento por separação magnética, para evitar danos aos equipamentos de britagem, ou durante o processo de beneficiamento, uma vez que, devido à característica dúctil, o aço não é fragmentado no processo (Oliveira, 2015). Além da constatação de que a presença de contaminantes reduz a resistência à compressão do concreto (Cordeiro, 2013), Lovato (2007) apresenta outros fatores contaminantes nos agregados reciclados de RCD, que causam problemáticas no concreto, os quais são mostrados no Quadro 8.

Quadro 8 – Possíveis contaminantes no RCD e sua influência sobre o produto à base de cimento obtido

Contaminante	Comportamento
Gesso	Formação de etringita secundária, altamente expansiva, que provoca tensões internas e podem causar fissuras no concreto.
Vidro	Podem causar reações álcali-sílica em meios aquosos.
Metais	Podem causar manchas ou pequenos danos à superfície dos concretos.
Cloretos	Podem provocar graves problemas de corrosão de armaduras.
Substâncias orgânicas	Madeira, tecidos têxteis, papéis e materiais poliméricos - São instáveis no concreto quando submetidos a ciclos de secagem e molhagem ou de gelo. Tintas - Podem causar incorporação de ar ao concreto.

Fonte: Lovato, 2007

3.3.3 Composição granulométrica

Lima (1999) comenta que, em função da variabilidade do RCD processado, de qual equipamento foi usado para o beneficiamento e a granulometria do RCD antes do beneficiamento, a granulometria final dos agregados reciclados irá variar. Segundo Malta (2012), os agregados reciclados, tanto miúdos quanto graúdos, apresentam distribuição granulométrica mais uniforme e maior quantidade de partículas finas em comparação aos agregados naturais.

Segundo Santos (2008), a granulometria dos agregados é um parâmetro importante para dosagem do concreto, pois influencia no abatimento e na resistência. Aspectos obtidos através do ensaio de granulometria, como o módulo de finura, teor de finos e dimensão máxima do agregado, são de grande influência na dosagem do concreto (Santos, 2016b).

3.3.4 Teor de material pulverulento

O teor de material pulverulento é um valor que representa o quantitativo das partículas minerais (finas) com diâmetros menores que 0,075 mm, presente nos agregados, cujo aparecimento é intensificado no processo de beneficiamento do RCD para geração dos agregados reciclados (Castro, 2007; Santos, 2016b; Silva, 2023).

Quando Silva (2011) fez a comparação entre o teor de finos de agregados graúdos naturais, reciclados mistos e reciclados de concreto, constatou que o agregado reciclado misto mostrou os maiores valores de teores de finos, o que demonstra a problemática dos agregados reciclados quanto à fragilidade durante o processo de beneficiamento do RCD. Segundo Pedrozo (2008), nos ARM, o teor de material pulverulento é cinco vezes maior que nos AN, superando os padrões normativos vigentes.

Partículas finas possuem grande área superficial e requerem mais água para manter o abatimento desejado na mistura, resultando na diminuição da resistência mecânica do concreto produzido (Santos, 2016b). Portanto, para o manutenção da resistência requerida haverá a necessidade de aumento no consumo de cimento (Katz; Baum, 2006). Além do mais, Jiménez (2011) comenta que a presença dos finos poderá agir como uma película sobre a superfície dos grãos dos agregados, reduzindo a sua aderência à pasta e prejudicando diretamente a resistência do concreto. O Quadro 9 mostra os resultados de teor de material pulverulento em ARM dentre a bibliografia recente.

Quadro 9 – Faixa de resultados de literatura quanto ao teor de material pulverulento dos ARM

Autores	Teor de material pulverulento (%)		Normas utilizadas		Limites normativos NBR 15116 (ABNT, 2021b) NBR 7211 (ABNT, 2022a)	
	Agregado miúdo reciclado	Agregado graúdo reciclado	Agregado miúdo reciclado	Agregado graúdo reciclado	Agregado miúdo reciclado ($\leq 10\%$)	Agregado graúdo reciclado ($\leq 10\%$)
Carneiro (2011) Feira de Santana - BA (Brasil)	8,60	2,21	NBR NM 46 (ABNT, 2003)		SIM	SIM
Herrera <i>et al.</i> (2012) ^a (Cuba)	11,30	-	Norma Cubana "NC 182 (2002)"	-	NÃO	-
	14,30				NÃO	
Lima; Leite (2012) Feira de Santana - BA (Brasil)	10,40	-	NBR NM 46 (ABNT, 2013)	-	NÃO	-
Pavón; Martínez; Etxeberria (2014) (Cuba)	11,00	-	Norma Cubana "NC 182 (2002)"	-	NÃO	-

continua

continuação

Autores	Teor de material pulverulento (%)		Normas utilizadas		Limites normativos NBR 15116 (ABNT, 2021b) NBR 7211 (ABNT, 2022a)	
	Agregado miúdo reciclado	Agregado graúdo reciclado	Agregado miúdo reciclado	Agregado graúdo reciclado	Agregado miúdo reciclado (≤10%)	Agregado graúdo reciclado (≤10%)
Rodríguez-Robles <i>et al.</i> , (2014) ^b (Espanha)	-	1,82	-	Norma espanhola "EHE-08 - 2008"	-	SIM
	-	2,84	-		-	SIM
	-	4,08	-		-	SIM
	-	1,28	-		-	SIM
	-	0,60	-		-	SIM
	-	7,09	-		-	SIM
	-	0,04	-		-	SIM
	-	0,78	-		-	SIM
	-	0,44	-		-	SIM
	-	0,28	-		-	SIM
	-	0,80	-		-	SIM
	-	1,42	-		-	SIM
	-	1,54	-		-	SIM
Frotte; Núbila (2015) (Brasil)	3,03	-	NBR NM 46 (ABNT, 2013)	-	SIM	-
Girardi (2016) ^c (Brasil)	6,58	-	NBR NM 46 (ABNT, 2003)	-	SIM	-
	13,96				NÃO	

continuação

Autores	Teor de material pulverulento (%)		Normas utilizadas		Limites normativos NBR 15116 (ABNT, 2021b) NBR 7211 (ABNT, 2022a)	
	Agregado miúdo reciclado	Agregado graúdo reciclado	Agregado miúdo reciclado	Agregado graúdo reciclado	Agregado miúdo reciclado (≤10%)	Agregado graúdo reciclado (≤10%)
Martínez <i>et al.</i> (2016) ^d (Cuba)	13,80	-	Norma Cubana "NC 182 (2002)"	-	NÃO	-
	12,70	-			NÃO	
	11,30	-			NÃO	
	7,60	-			SIM	
Frotte <i>et al.</i> (2017) (Brasil)	3,03	-	NBR NM 46 (ABNT, 2013)	-	SIM	-
Ferrández <i>et al.</i> (2019) (Espanha)	5,04	-	Norma espanhola "UNE EN 933-1"	-	SIM	-
Ferreira <i>et al.</i> (2020) São José do Mipibú - RN (Brasil)	8,30	-	NBR NM 46 (ABNT, 2003)	-	SIM	-
Gomes (2021) Varginha - MG (Brasil)	11,10	1,20	NBR NM 46 (ABNT, 2003)		NÃO	SIM
Salgado; Silva (2021) Rio de Janeiro - RJ (Brasil)	9,26	0,59	NBR NM 46 (ABNT, 2003)		SIM	SIM
Ferrández <i>et al.</i> (2023) (Espanha)	5,15	-	Norma espanhola "UNE-EN 933-1"	-	SIM	-

conclusão

Autores	Teor de material pulverulento (%)		Normas utilizadas		Limites normativos NBR 15116 (ABNT, 2021b) NBR 7211 (ABNT, 2022a)	
	Agregado miúdo reciclado	Agregado graúdo reciclado	Agregado miúdo reciclado	Agregado graúdo reciclado	Agregado miúdo reciclado (≤10%)	Agregado graúdo reciclado (≤10%)
Lima (2024) Maceió – AL (Brasil)	-	4,25	-	NBR 16973 (ABNT, 2021)	-	SIM
Silva <i>et al.</i> (2024) Maceió – AL(Brasil)	-	4,25	-	NBR 16973 (ABNT, 2021)	-	SIM
Uchoa <i>et al.</i> (2024) Maceió – AL (Brasil)	-	4,25	-	NBR 16973 (ABNT, 2021)	-	SIM
Quantidade de Dados	18	19	-	-	-	-
Mínimo	3,03	0,04	-	-	-	-
Média	9,25	2,09	-	-	-	-
Mediana	9,83	1,42	-	-	-	-
Máximo	14,30	7,09	-	-	-	-
Amplitude	11,27	7,05	-	-	-	-
Desvio padrão	3,49	1,83	-	-	-	-
CV (%)	37,77	87,61	-	-	-	-
<p>^a Os autores utilizaram dois agregados miúdos diferentes.</p> <p>^b Os autores usaram RCD's de treze usinas de reciclagem diferentes presentes em diversas províncias na Espanha.</p> <p>^c A autora utilizou dois agregados miúdos reciclados, sendo o primeiro com diâmetro máximo de 1,18 mm e o segundo com 3,00 mm.</p> <p>^d Os autores usaram RCD's de quatro habitações diferentes, de diferentes tipologias de construção, presentes na cidade de Havana em Cuba.</p>						

Fonte: Autor, 2024

3.3.5 Massa específica, massa unitária e absorção de água

a) Correlação entre as propriedades

O agregado reciclado geralmente tem massa específica e massa unitária menores do que o agregado natural, dentro da mesma faixa granulométrica, e também absorve mais água (Leite, 2001; Angulo, 2000; Tenório, 2007; Lovato, 2007; Cabral, 2007). Em consequência disso, Lima (1999) em sua pesquisa averiguou que as massas específicas das argamassas e concretos, produzidos com AR, são menores em comparativo com os produzidos com AN.

No levantamento bibliográfico dos valores de massa específica, comparando agregados reciclados com agregados naturais, os autores Hansen (1992), Shayan e Shu (2003) comentaram que a explicação para a massa específica dos AR ser menor do que a dos AN, é que os reciclados possuem argamassa antiga aderida às suas partículas, o que os torna mais porosos. Quanto à massa unitária dos AR ser menor que a dos AN, Santos (2016b) explica que os fatores influenciadores são:

- Densidades dos materiais constituintes do RCD menores que dos agregados naturais;
- Alta porosidade dos materiais do RCD;
- Forma irregular proveniente do beneficiamento do RCD.

De acordo com Ângulo (2000), na maioria dos casos, existe uma relação inversa entre a absorção e massa específica do agregado, portanto, se o agregado tiver maior taxa de absorção de água, possuirá menor massa específica. A explicação para esse fenômeno acontecer nos AR é que o RCD, com foco nos ARM em sua composição, possui diversos materiais constituintes com porosidades elevadas (Cabral, 2007).

Conforme mostrado nos Quadro 10, a variabilidade dos valores de massa específica e de massa unitária encontrados na bibliografia é grandiosa. Leite (2001) e Santos (2016b) atribuíram como explicação para esses resultados a composição do material, o tipo de beneficiamento realizado, a granulometria e também o método de ensaio utilizado.

Quadro 10 – Faixa de resultados de literatura para massa específica e massa unitária dos ARM

Autores	Massa específica (1) (g/cm³), Massa específica Saturada Superfície Seca (2) (g/cm³)								Massa unitária (kg/m³)				
	Agregado miúdo reciclado		Agregado graúdo reciclado		Agregado total reciclado		Agregado composto		Agregado miúdo reciclado		Agregado graúdo reciclado		Agregado total reciclado
	1	2	1	2	1	2	1	2	Solto	Compactado	Solto	Compactado	Compactado
Leite (2001) ^a Porto Alegre - RS (Brasil)	2,53	-	2,51	-	-	-	-	-	-	1210	-	1120	-
Viera (2003) Maceió - AL (Brasil)	2,51	-	2,52	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lovato (2007) Porto Alegre – RS (Brasil)	2,41	-	2,48	-	-	-	-	-	-	1300	-	1070	-
Carneiro (2011) Feira de Santana - BA (Brasil)	2,16	-	2,28	-	-	-	-	-	-	1330	-	1120	-
Herrera <i>et al.</i> (2012) ^b (Cuba)	2,11	-	-	-	-	-	-	-	-	1159	-	-	-
	2,02									1092			
Lima; Leite (2012) Feira de Santana - BA (Brasil)	2,55	-	-	-	-	-	-	-	-	1270	-	-	-
Medina <i>et al.</i> (2014) ^c Glasgow (Escócia)	-	-	-	-	-	2,54	-	-	-	-	-	-	-
						2,56							
Pavón; Martínez; Etxeberria (2014) Habana (Cuba)	1,94	-	-	-	-	-	-	-	1160	-	-	-	-

continua

continuação

Autores	Massa específica (1) (g/cm³), Massa específica Saturada Superfície Seca (2) (g/cm³)								Massa unitária (kg/m³)				
	Agregado miúdo reciclado		Agregado graúdo reciclado		Agregado total reciclado		Agregado composto		Agregado miúdo reciclado		Agregado graúdo reciclado		Agregado total reciclado
	1	2	1	2	1	2	1	2	Solto	Compactado	Solto	Compactado	Compactado
Rodríguez-Robles <i>et al.</i> (2014) ^d (Espanha)	-	-	2,57	-	-	-	-	-	-	-	-	2140	-
	-	-	2,60	-	-	-	-	-	-	-	-	2280	-
	-	-	2,65	-	-	-	-	-	-	-	-	2290	-
	-	-	2,56	-	-	-	-	-	-	-	-	2070	-
	-	-	2,58	-	-	-	-	-	-	-	-	2130	-
	-	-	2,58	-	-	-	-	-	-	-	-	1910	-
	-	-	2,59	-	-	-	-	-	-	-	-	2000	-
	-	-	2,64	-	-	-	-	-	-	-	-	2320	-
	-	-	2,56	-	-	-	-	-	-	-	-	2160	-
	-	-	2,58	-	-	-	-	-	-	-	-	1970	-
	-	-	2,62	-	-	-	-	-	-	-	-	2070	-
	-	-	2,66	-	-	-	-	-	-	-	-	2160	-
-	-	2,68	-	-	-	-	-	-	-	-	2090	-	
Silva <i>et al.</i> (2014) Lisboa (Portugal)	-	2,29	-	2,33	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Frotte; Núbila (2015) (Brasil)	2,54	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Garach <i>et al.</i> (2015) ^e Granada (Espanha)	-	2,68	-	2,63	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2,54		2,47									

continuação

Autores	Massa específica (1) (g/cm ³), Massa específica Saturada Superfície Seca (2) (g/cm ³)								Massa unitária (kg/m ³)				
	Agregado miúdo reciclado		Agregado graúdo reciclado		Agregado total reciclado		Agregado composto		Agregado miúdo reciclado		Agregado graúdo reciclado		Agregado total reciclado
	1	2	1	2	1	2	1	2	Solto	Compactado	Solto	Compactado	Compactado
Castañó-Cardoza <i>et al.</i> (2016) Medellín (Colômbia)	2,34	-	2,54	-	-	-	-	-	-	1249	-	1229	-
Figueiredo; Vargas (2016) Criciúma – SC (Brasil)	2,51	-	1,88	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Girardi (2016) ^f Goiás – GO (Brasil)	2,68	-	-	-	-	-	-	-	-	1210	-	-	-
	2,69	-	-	-	-	-	-	-	-	1460	-	-	-
López-Uceda <i>et al.</i> (2016a) ^g Córdoba (Espanha)	-	-	-	-	2,24	2,38	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	2,08	2,27	-	-	-	-	-	-	-
López-Uceda <i>et al.</i> (2016b) Córdoba (Espanha)	-	-	-	-	2,08	2,27	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-			-	-	-	-	-	-	-
Martínez <i>et al.</i> (2016) ^h Havana (Cuba)	2,23	-	-	-	-	-	-	-	-	1280	-	-	-
	1,90	-	-	-	-	-	-	-	-	1150	-	-	-
	1,94	-	-	-	-	-	-	-	-	1160	-	-	-
	2,06	-	-	-	-	-	-	-	-	1310	-	-	-
Frotte <i>et al.</i> (2017) (Brasil)	2,54	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kumar <i>et al.</i> (2017) Nova Delhi (Índia)	2,08	-	-	-	-	-	-	-	-	1290	-	-	-
Silva; Andrade (2017) (Brasil)	-	-	2,50	-	-	-	-	-	-	-	-	1220	-

continuação

Autores	Massa específica (1) (g/cm ³), Massa específica Saturada Superfície Seca (2) (g/cm ³)								Massa unitária (kg/m ³)				
	Agregado miúdo reciclado		Agregado graúdo reciclado		Agregado total reciclado		Agregado composto		Agregado miúdo reciclado		Agregado graúdo reciclado		Agregado total reciclado
	1	2	1	2	1	2	1	2	Solto	Compactado	Solto	Compactado	Compactado
Andrade <i>et al.</i> (2018) Rio Grande do Sul (Brasil)	2,40	-	-	-	-	-	-	-	-	1170	-	-	-
Carasek <i>et al.</i> (2018) ⁱ (Brasil)	2,68	-	-	-	-	-	-	-	-	1210	-	-	-
	2,69	-	-	-	-	-	-	-	-	1460	-	-	-
Ferrández <i>et al.</i> (2019) Madrid (Espanha)	2,14	-	-	-	-	-	-	-	-	1232	-	-	-
Ferreira <i>et al.</i> (2019) (Brasil)	2,53	-	-	-	-	-	-	-	-	1300			
Agrela <i>et al.</i> (2020) Porto de Huelva (Espanha)	-	2,37	-	2,30	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Barbudo <i>et al.</i> (2020) Córdoba (Espanha)	2,57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cantero <i>et al.</i> (2020) Lisboa (Portugal)	-	-	2,07	2,26	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ferreira <i>et al.</i> (2020) São José do Mipibú - RN (Brasil)	2,52	-	-	-	-	-	-	-	-	1300	-	-	-
Roque <i>et al.</i> (2020) Figueira da Foz (Portugal)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1162	-	-	-
Cantero <i>et al.</i> (2021a) Lisboa (Portugal)	-	-	2,07	2,26	-	-	-	-	-	-	-	-	-

continuação

Autores	Massa específica (1) (g/cm³), Massa específica Saturada Superfície Seca (2) (g/cm³)								Massa unitária (kg/m³)				
	Agregado miúdo reciclado		Agregado graúdo reciclado		Agregado total reciclado		Agregado composto		Agregado miúdo reciclado		Agregado graúdo reciclado		Agregado total reciclado
	1	2	1	2	1	2	1	2	Solto	Compactado	Solto	Compactado	Compactado
Cantero <i>et al.</i> (2021b) ^j Estremadura (Espanha)	-	-	2,28	2,42	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	2,32	2,45	-	-	-	-	-	-	-	-	
Gomes (2021) Varginha - MG (Brasil)	2,69	-	2,31	-	-	-	-	-	-	1460	-	1200	-
González <i>et al.</i> (2021) Cáceres (Espanha)	2,70	-	2,42	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Jesus <i>et al.</i> (2021) (Portugal)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	810	-	-	-
Meng <i>et al.</i> (2021a) ^k Zhejiang (China)	-	-	2,50	-	2,41	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	2,48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Meng <i>et al.</i> (2021b) ^l Hangzhou (China)	-	-	2,47	-	2,56	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Salgado; Silva (2021) Rio de Janeiro - RJ (Brasil)	-	-	2,63	2,35	-	-	-	-	-	-	-	1262	-
Salles <i>et al.</i> (2021) (Brasil)	-	-	2,55	2,22	-	-	-	-	-	-	-	1120	-
Schiller; Paliga; Torres (2021) Pelotas – RS (Brasil)	2,51	-	-	-	-	-	-	-	1460	-	-	-	-
Batista <i>et al.</i> (2022) Porto Velho – RO (Brasil)	2,36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
												-	

continuação

Autores	Massa específica (1) (g/cm³), Massa específica Saturada Superfície Seca (2) (g/cm³)								Massa unitária (kg/m³)				
	Agregado miúdo reciclado		Agregado graúdo reciclado		Agregado total reciclado		Agregado composto		Agregado miúdo reciclado		Agregado graúdo reciclado		Agregado total reciclado
	1	2	1	2	1	2	1	2	Solto	Compactado	Solto	Compactado	Compactado
Joseph <i>et al.</i> (2022) ^m Telangana (Índia)	-	-	2,30	-	-	-	-	-	-	-	1319	1452	-
			2,41								1186	1381	
Meng <i>et al.</i> (2022) Zhoushan (República Popular da China)	-	-	2,50	-	2,41	-	-	-	-	-	-	-	-
Rodriguez-Alvaro <i>et al.</i> (2022) (Espanha)	1,92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Shmlls <i>et al.</i> (2022) ⁿ Győr (Hungria)	-	-	-	-	-	-	2,50	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	2,52	-	-	-	-	-	
Silva <i>et al.</i> (2022) Porto Alegre - RS (Brasil)	-	-	2,23	-	-	-	-	-	-	-	-	1240	-
Yan <i>et al.</i> (2022) (China)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1169	-
Agrela <i>et al.</i> (2023) Córdoba (Espanha)	-	2,91	-	-	-	2,37	-	-	-	-	-	-	-
Barroso <i>et al.</i> (2023) Plasencia (Espanha)	-	-	2,66	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Borges <i>et al.</i> (2023) (Brasil)	2,38	-	-	-	-	-	-	-	-	1340	-	-	-
Chen <i>et al.</i> (2023) (Bélgica)	-	-	2,54	2,28	-	-	-	-	-	-	-	-	-

continuação

Autores	Massa específica (1) (g/cm ³), Massa específica Saturada Superfície Seca (2) (g/cm ³)								Massa unitária (kg/m ³)				
	Agregado miúdo reciclado		Agregado graúdo reciclado		Agregado total reciclado		Agregado composto		Agregado miúdo reciclado		Agregado graúdo reciclado		Agregado total reciclado
	1	2	1	2	1	2	1	2	Solto	Compactado	Solto	Compactado	Compactado
Ferrández <i>et al.</i> (2023) (Espanha)	2,13	-	-	-	-	-	-	-	-	1241	-	-	-
Gratão (2023) ^o Ribeirão Preto - SP (Brasil)	-	-	2,60	-	-	-	-	-	-	-	1113	1150	-
Joseph <i>et al.</i> (2023) ^p (Chile)	2,35	-	2,30	-	-	-	-	-	1459	-	1319	-	-
	-	-	2,41	-	-	-				-	1186	-	
Martinez <i>et al.</i> (2023) Madrid (Espanha)	2,14	-	-	-	-	-	-	-	-	1238	-	-	-
Merino-Lechuga <i>et al.</i> (2023) Córdoba (Espanha)	-	-	-	-	2,17	-	-	-	-	-	-	-	-
Oliveira (2023b) Pato Branco - PR (Brasil)	-	-	2,88	-	-	-	-	-	-	-	-	1240	-
Oliveira (2023c) Foz do Iguaçu - PR (Brasil)	-	-	2,50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rosales <i>et al.</i> (2023) Córdoba (Espanha)	-	2,37	-	2,32	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kheirbek; Hassan; Aslan (2024) Latakia (Síria)	-	-	2,47	-	-	-	-	-	-	-	-	1300	-
Lima (2024) Maceió – AL (Brasil)	-	-	1,91	2,16	-	-	-	-	-	-	1100	1160	-

continuação

Autores	Massa específica (1) (g/cm ³), Massa específica Saturada Superfície Seca (2) (g/cm ³)								Massa unitária (kg/m ³)				
	Agregado miúdo reciclado		Agregado graúdo reciclado		Agregado total reciclado		Agregado composto		Agregado miúdo reciclado		Agregado graúdo reciclado		Agregado total reciclado
	1	2	1	2	1	2	1	2	Solto	Compactado	Solto	Compactado	Compactado
Moreno <i>et al.</i> (2024) Barcelona (Espanha)	2,59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nesa <i>et al.</i> (2024) (Bangladesh)	-	-	-	2,54	-	-	-	-	-	-	-	1076	-
Naim <i>et al.</i> (2024) Casablanca (Marrocos)	-	-	-	-	2,50	-	-	-	-	-	-	-	1700
Peixoto <i>et al.</i> (2024) Natal – RN (Brasil)	2,49	-	2,55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Silva <i>et al.</i> (2024) Maceió - AL (Brasil)	-	-	1,91	2,16	-	-	-	-	-	-	1100	1160	-
Tabsh; Tamimi; El-Emam (2024) (Emirados Árabes Unidos)	-	-	2,77	-	-	-	-	-	-	-	-	2460	-
Uchoa <i>et al.</i> (2024) Maceió - AL (Brasil)	-	-	1,91	2,16	-	-	-	-	-	-	1100	1160	-
Vlieger <i>et al.</i> (2024) ^q Leuven (Bélgica)	-	-	-	-	2,65	-	-	-	-	-	-	-	2299
	-	-	-	-	2,69	-	-	-	-	-	-	-	2191
	-	-	-	-	2,62	-	-	-	-	-	-	-	2212
Kepniak (2025) Warsaw (Polónia)	-	-	2,53	2,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-

continuação

Autores	Massa específica (1) (g/cm³), Massa específica Saturada Superfície Seca (2) (g/cm³)								Massa unitária (kg/m³)				
	Agregado miúdo reciclado		Agregado graúdo reciclado		Agregado total reciclado		Agregado composto		Agregado miúdo reciclado		Agregado graúdo reciclado		Agregado total reciclado
	1	2	1	2	1	2	1	2	Solto	Compactado	Solto	Compactado	Compactado
Rosales <i>et al.</i> (2025) Córdoba (Espanha)	-	2,34	-	2,32	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	2,31	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vintimilla; Etxeberria (2025) Barcelona (Espanha)	2,28	-	2,08	-	2,15	-	-	-	-	-	-	-	-
Quantidade de Dados	38	7	50	19	12	6	2	-	3	26	8	33	4
Mínimo	1,90	2,29	1,88	2,16	2,08	2,27	2,50	-	1160	810	1100	1070	1700
Média	2,36	2,50	2,44	2,33	2,38	2,40	2,51	-	1360	1246	1178	1602	2101
Mediana	2,41	2,37	2,51	2,31	2,41	2,38	2,51	-	1459	1245	1150	1300	2202
Máximo	2,70	2,91	2,88	2,63	2,69	2,56	2,52	-	1460	1460	1319	2460	2299
Amplitude	0,80	0,62	1,00	0,47	0,61	0,29	0,02	-	300	650	219	1390	599
Desvio padrão	0,33	0,21	0,23	0,12	0,22	0,12	0,01	-	141	128	88	482	235
CV	13,79	8,35	9,33	5,36	9,17	4,82	0,40	-	10	10	7	30	11

conclusão

Autores	Massa específica (1) (g/cm³), Massa específica Saturada Superfície Seca (2) (g/cm³)								Massa unitária (kg/m³)				
	Agregado miúdo reciclado		Agregado graúdo reciclado		Agregado total reciclado		Agregado composto		Agregado miúdo reciclado		Agregado graúdo reciclado		Agregado total reciclado
	1	2	1	2	1	2	1	2	Solto	Compactado	Solto	Compactado	Compactado
<p>^a O autor realizou sua caracterização em três amostras, portanto, os valores mostrados para massa específica e massa unitária são as médias dos resultados. ^b Os autores utilizaram dois agregados miúdos diferentes. ^c Os autores utilizaram dois agregados totais reciclados diferentes, sendo um com partículas flutuantes e outro sem. ^d Os autores usaram agregados reciclados graúdos (4-40 mm) de treze usinas de reciclagem diferentes presentes em diversas províncias na Espanha. ^e Os autores caracterizaram dois agregados miúdos e dois graúdos. ^f A autora utilizou dois agregados miúdos reciclados, sendo o primeiro com diâmetro máximo de 1,18 mm e o segundo com 3,00 mm. ^g Os autores utilizaram dois agregados reciclados mistos (MRA1 e MRA2) com diferentes percentagens de partículas cerâmicas recolhidas em dias diferentes numa estação de tratamento de RCD localizada em Córdoba (sul de Espanha). ^h Os autores usaram RCD's de quatro habitações diferentes, de diferentes tipologias de construção, presentes na cidade de Havana em Cuba. ⁱ Os autores caracterizaram dois agregados miúdos. ^j Os autores caracterizaram duas frações de agregado, sendo as ambas agregados graúdos, onde a primeira fração "MRA-M" tem dimensão aproximada de 6-12 mm e a segunda fração "MRA-G" tem dimensão aproximada de 4-22 mm. ^k Os autores caracterizaram três frações de agregado, onde a primeira e segunda fração são agregados graúdos, e a terceira fração é agregado total reciclado. A primeira fração "MR1" tem dimensão aproximada de 18-32 mm, a segunda fração "MR2" com dimensão aproximada de 10-18 mm, a terceira fração "MR3" com dimensão aproximada de 0-10 mm. ^l Os autores caracterizaram dois agregados diferentes, sendo o primeiro agregado total reciclado (0-9,5 mm) e o segundo agregado graúdo reciclado (9,5-31,5). ^m Os autores caracterizaram duas frações granulométricas de agregados graúdos, sendo a primeira 20 mm e a segunda 12,5 mm. ⁿ Os autores realizaram duas caracterização de agregados graúdos, sendo a primeira "MRA30" que contem 30% proveniente de agregado natural, e a segunda "MRA70" que contem 70% proveniente de agregado natural. ^o O autor realizou sua caracterização em treze amostras, portanto, os valores mostrados de massa específica e massa unitária são a média dos resultados. ^p Os autores caracterizaram dois agregados graúdos com dimensões diferentes. Quanto aos resultados de massa específica, o menor valor é corresponde ao agregado de 20 mm e o maior é corresponde ao agregado de 12 mm. Quanto aos resultados de massa unitária no estado solto, o maior é corresponde ao agregado de 20 mm e o menor é corresponde ao agregado de 12 mm. ^q Os autores caracterizaram três agregados totais reciclados, cada um deles provenientes de usinas de reciclagens diferentes.</p>													

Fonte: Autor, 2025

Os agregados naturais apresentam baixa porosidade e a taxa de absorção tem impacto mínimo nas misturas de concreto convencional (Carneiro, 2011). Todavia, em detrimento dos agregados reciclados possuírem alta porosidade e baixa massa específica, a absorção de água neles será maior em comparação aos agregados naturais normalmente empregados na mistura, o que acaba prejudicando a durabilidade e a resistência do concreto (Carneiro, 2011; Lima, 1999; Silva, 2023; Santos, 2016b; Hansen, 1986a; Lamond *et al.*, 2002; Kobayashi; Kawano, 1988; Chen; Yen; Chen, 2003; Mehta; Monteiro, 1994; Yacoub; Djerbi; Fen-Chong, 2018; Figueiredo, 2020; Tenorio, 2007; Tomasi, 2021; Vieira, 2003; Silva; De Brito; Veiga, 2010; Lucas *et al.* 2016; Rao Chakradhara; Bhattacharyya; Barai, 2011; Pedro; De Brito; Evangelista, 2017; Juan; Gutierrez, 2009; De Brito; Agrela; Silva, 2018; Rao; Jha; Misra, 2007; Gonçalves, 2011; Suescum-Morales *et al.*, 2021; Reddy; Dinakar; Rao, 2018; Ng; Foster, 2013; Bondar *et al.*, 2019). No Quadro 11 é mostrado o levantamento bibliográfico quando a absorção de ARM.

Quadro 11 – Faixa de resultados de literatura para absorção de água dos ARM

Autores	Absorção de água (%)				Limite normativo NBR 15116 (ABNT, 2021b) ARM < 12%			
	Agregado miúdo reciclado	Agregado gráúdo reciclado	Agregado total reciclado	Agregado composto	Agregado miúdo reciclado	Agregado gráúdo reciclado	Agregado total reciclado	Agregado composto
Leite (2001) Porto Alegre - RS (Brasil)	8,60	4,95	-	-	SIM	SIM	-	-
Viera (2003) Maceió - AL (Brasil)	11,08	6,04	-	-	SIM	SIM	-	-
Lovato (2007) ^a Porto Alegre – RS (Brasil)	8,37	6,47	-	-	SIM	SIM	-	-
Carneiro (2011) Feira de Santana - BA (Brasil)	13,32	6,59	-	-	NÃO	SIM	-	-
Herrera <i>et al.</i> (2012) ^b (Cuba)	10,60	-	-	-	SIM	-	-	-
	13,00				NÃO			
Lima; Leite (2012) Feira de Santana - BA (Brasil)	19,30	-	-	-	NÃO	-	-	-
Medina <i>et al.</i> (2014) ^c Glasgow (Escócia)	-	-	4,49	-	-	SIM	-	-
			4,36					
Pavón; Martínez; Etxeberria, (2014) (Cuba)	11,80	-	-	-	SIM	-	-	-

continua

continuação

Autores	Absorção de água (%)				Limite normativo NBR 15116 (ABNT, 2021b) ARM < 12%			
	Agregado miúdo reciclado	Agregado graúdo reciclado	Agregado total reciclado	Agregado composto	Agregado miúdo reciclado	Agregado graúdo reciclado	Agregado total reciclado	Agregado composto
Rodríguez-Robles <i>et al.</i> (2014) ^d (Espanha)	-	7,84	-	-	-	SIM	-	-
	-	9,40	-	-	-	SIM	-	-
	-	5,96	-	-	-	SIM	-	-
	-	9,11	-	-	-	SIM	-	-
	-	8,14	-	-	-	SIM	-	-
	-	13,46	-	-	-	NÃO	-	-
	-	11,31	-	-	-	SIM	-	-
	-	5,21	-	-	-	SIM	-	-
	-	7,27	-	-	-	SIM	-	-
	-	12,09	-	-	-	NÃO	-	-
	-	10,27	-	-	-	SIM	-	-
	-	8,65	-	-	-	SIM	-	-
	-	10,42	-	-	-	SIM	-	-
Silva <i>et al.</i> (2014) Lisboa (Portugal)	9,30	7,20	-	-	SIM	SIM	-	-
Frotte; Núbila (2015) (Brasil)	12,35	-	-	-	NÃO	-	-	-
Garach <i>et al.</i> (2015) ^e Granada (Espanha)	2,45	2,37	-	-	SIM	SIM	-	-
	5,83	5,83			SIM	SIM		
Castañó-Cardoza <i>et al.</i> (2016) Medellín (Colômbia)	4,75	5,34	-	-	SIM	SIM	-	-

continuação

Autores	Absorção de água (%)				Limite normativo NBR 15116 (ABNT, 2021b) ARM < 12%			
	Agregado miúdo reciclado	Agregado graúdo reciclado	Agregado total reciclado	Agregado composto	Agregado miúdo reciclado	Agregado graúdo reciclado	Agregado total reciclado	Agregado composto
Figueiredo; Vargas (2016) Criciúma – SC (Brasil)	25,60	15,50	-	-	NÃO	NÃO	-	-
Girardi (2016) ^f Goiás – GO (Brasil)	6,11	-	-	-	SIM	-	-	-
	12,01				NÃO			
López-Uceda <i>et al.</i> (2016a) ^g Córdoba (Espanha)	-	-	6,10	-	-	-	SIM	-
			9,00				SIM	
López-Uceda <i>et al.</i> (2016b) Córdoba (Espanha)	-	-	9,00	-	-	-	SIM	-
Martínez <i>et al.</i> , (2016) ^h Havana (Cuba)	7,50	-	-	-	SIM	-	-	-
	4,76	-	-	-	SIM	-	-	-
	6,79	-	-	-	SIM	-	-	-
	9,03	-	-	-	SIM	-	-	-
Frotte <i>et al.</i> (2017) (Brasil)	12,35	-	-	-	NÃO	-	-	-
Kumar <i>et al.</i> (2017) Nova Delhi (Índia)	11,91	-	-	-	SIM	-	-	-
Andrade <i>et al.</i> (2018) Rio Grande do Sul (Brasil)	5,23	-	-	-	SIM	-	-	-
Etxeberria; Gonzalez- Corominas (2018) Barcelona (Espanha)	16,00	17,82	-	-	NÃO	-	-	-

continuação

Autores	Absorção de água (%)				Limite normativo NBR 15116 (ABNT, 2021b) ARM < 12%			
	Agregado miúdo reciclado	Agregado graúdo reciclado	Agregado total reciclado	Agregado composto	Agregado miúdo reciclado	Agregado graúdo reciclado	Agregado total reciclado	Agregado composto
Ozbakkaloglu; Gholampour; Xie (2018) ⁱ (China)	-	-	6,12	-	-	-	-	-
			4,08					
Cantero <i>et al.</i> (2019) ^j (Espanha)	-	6,28	-	-	-	SIM	-	-
		5,27				SIM		
Ferrández <i>et al.</i> (2019) Madrid (Espanha)	6,61	-	-	-	SIM	-	-	-
Agrela <i>et al.</i> (2020) Porto de Huelva (Espanha)	9,09	10,79	-	-	SIM	SIM	-	-
Barbudo <i>et al.</i> (2020) Córdoba (Espanha)	3,15	-	-	-	SIM	-	-	-
Cantero <i>et al.</i> (2020) Lisboa (Portugal)	-	9,10	-	-	-	SIM	-	-
Ferreira <i>et al.</i> (2020) São José do Mipibú - RN (Brasil)	6,09	-	-	-	SIM	-	-	-
Cantero <i>et al.</i> (2021a) Lisboa (Portugal)	-	9,10	-	-	-	SIM	-	-
Cantero <i>et al.</i> (2021b) ^k Estremadura (Espanha)	-	6,28	-	-	-	SIM	-	-
		5,27				SIM		
González <i>et al.</i> (2021) Cáceres (Espanha)	5,39	6,28	-	-	SIM	SIM	-	-
Meng <i>et al.</i> (2021a) ^l Zhejiang (China)	-	8,70	13,20	-	-	SIM	NÃO	-
		9,10				SIM		

continuação

Autores	Absorção de água (%)				Limite normativo NBR 15116 (ABNT, 2021b) ARM < 12%			
	Agregado miúdo reciclado	Agregado gráudo reciclado	Agregado total reciclado	Agregado composto	Agregado miúdo reciclado	Agregado gráudo reciclado	Agregado total reciclado	Agregado composto
Meng <i>et al.</i> (2021b) Hangzhou (China)	-	8,50	21,00	-	-	SIM	NÃO	-
Salgado; Silva (2021) Rio de Janeiro - RJ (Brasil)	-	7,80	-	-	-	SIM	-	-
Salles <i>et al.</i> (2021) (Brasil)	-	10,65	-	-	-	SIM	-	-
Schiller; Paliga; Torres (2021) Pelotas – RS (Brasil)	8,00	-	-	-	SIM	-	-	-
Joseph <i>et al.</i> (2022) ^m Telangana (Índia)	-	2,30	-	-	-	SIM	-	-
	-	1,95	-	-	-	SIM	-	-
Meng <i>et al.</i> (2022) Zhoushan (República Popular da China)	-	8,80	13,20	-	-	SIM	NÃO	-
Rodriguez-Alvaro <i>et al.</i> (2022) (Espanha)	15,40	-	-	-	NÃO	-	-	-
Shmlls <i>et al.</i> (2022) ⁿ Győr (Hungria)	-	-	-	5,80	-	-	-	SIM
				6,20				
Silva <i>et al.</i> (2022) Porto Alegre - RS (Brasil)	-	5,80	-	-	-	SIM	-	-
Yan <i>et al.</i> (2022) (China)	-	3,02	-	-	-	SIM	-	-
Agrela <i>et al.</i> (2023) Córdoba (Espanha)	9,01	-	6,49	-	SIM	-	SIM	-

continuação

Autores	Absorção de água (%)				Limite normativo NBR 15116 (ABNT, 2021b) ARM < 12%			
	Agregado miúdo reciclado	Agregado graúdo reciclado	Agregado total reciclado	Agregado composto	Agregado miúdo reciclado	Agregado graúdo reciclado	Agregado total reciclado	Agregado composto
Barroso <i>et al.</i> (2023) Plasencia (Espanha)	-	7,69	-	-	-	SIM	-	-
Borges <i>et al.</i> (2023) (Brasil)	8,10	-	-	-	SIM	-	-	-
Chen <i>et al.</i> (2023) (Bélgica)	-	1,30	-	-	-	SIM	-	-
Ferrández <i>et al.</i> (2023) (Espanha)	7,18	-	-	-	SIM	-	-	-
Gratão (2023) ^o Ribeirão Preto - SP (Brasil)	-	9,02	-	-	-	SIM	-	-
Joseph <i>et al.</i> (2023) ^p (Chile)	3,92	1,95 2,30	-	-	SIM	SIM SIM	-	-
Martinez <i>et al.</i> (2023) Madrid (Espanha)	6,35	-	-	-	SIM	-	-	-
Merino-Lechuga <i>et al.</i> (2023) Córdoba (Espanha)	-	-	9,03	-	-	-	SIM	-
Oliveira (2023b) Pato Branco - PR (Brasil)	-	7,35	-	-	-	SIM	-	-
Oliveira (2023c) Foz do Iguaçu - PR (Brasil)	-	7,29	-	-	-	SIM	-	-
Rosales <i>et al.</i> (2023) Córdoba (Espanha)	9,42	6,49	-	-	SIM	SIM	-	-

continuação

Autores	Absorção de água (%)				Limite normativo NBR 15116 (ABNT, 2021b) ARM < 12%			
	Agregado miúdo reciclado	Agregado graúdo reciclado	Agregado total reciclado	Agregado composto	Agregado miúdo reciclado	Agregado graúdo reciclado	Agregado total reciclado	Agregado composto
Kheirbek; Hassan; Aslan (2024) Latakia (Síria)	-	9,00	-	-	-	SIM	-	-
Lima (2024) Maceió – AL (Brasil)	-	12,50	-	-	-	NÃO	-	-
Naim <i>et al.</i> (2024) Casablanca (Marrocos)	-	-	5,20	-	-	-	SIM	-
Nesa <i>et al.</i> (2024) (Bangladesh)	-	15,00	-	-	-	NÃO	-	-
Peixoto <i>et al.</i> (2024) Natal – RN (Brasil)	14,00	11,00	-	-	NÃO	SIM	-	-
Silva <i>et al.</i> (2024) Maceió – AL (Brasil)	-	12,50	-	-	-	NÃO	-	-
Uchoa <i>et al.</i> (2024) Maceió – AL (Brasil)	-	12,50	-	-	-	NÃO	-	-
Vlieger <i>et al.</i> (2024) ^q Leuven (Bélgica)	-	-	5,78	-	-	-	SIM	-
			8,41				SIM	
			7,01				SIM	
Yu <i>et al.</i> (2024) Xinyu, Provincia de Jiangxi, (China)	11,63	-	-	-	SIM	-	-	-

continuação

Autores	Absorção de água (%)				Limite normativo NBR 15116 (ABNT, 2021b) ARM < 12%			
	Agregado miúdo reciclado	Agregado graúdo reciclado	Agregado total reciclado	Agregado composto	Agregado miúdo reciclado	Agregado graúdo reciclado	Agregado total reciclado	Agregado composto
Kepniak (2025) Warsaw (Polônia)	-	4,80	-	-	-	SIM	-	-
Rosales <i>et al.</i> (2025) Córdoba (Espanha)	8,16	6,34	-	-	SIM	SIM	-	-
		6,51				SIM		
Vintimilla; Etxeberria (2025) Barcelona (Espanha)	6,67	9,00	8,75	-	SIM	SIM	SIM	-
Quantidade de Dados	41	59	17	2	-	-	-	-
Mínimo	2,45	1,30	4,08	5,80	-	-	-	-
Média	9,42	7,88	8,31	6,00	-	-	-	-
Mediana	8,60	7,69	7,01	6,00	-	-	-	-
Máximo	25,60	17,82	21,00	6,20	-	-	-	-
Amplitude	23,15	16,52	16,92	0,40	-	-	-	-
Desvio padrão	4,45	3,43	4,13	0,20	-	-	-	-
CV	47,21	43,56	49,67	3,33	-	-	-	-

conclusão

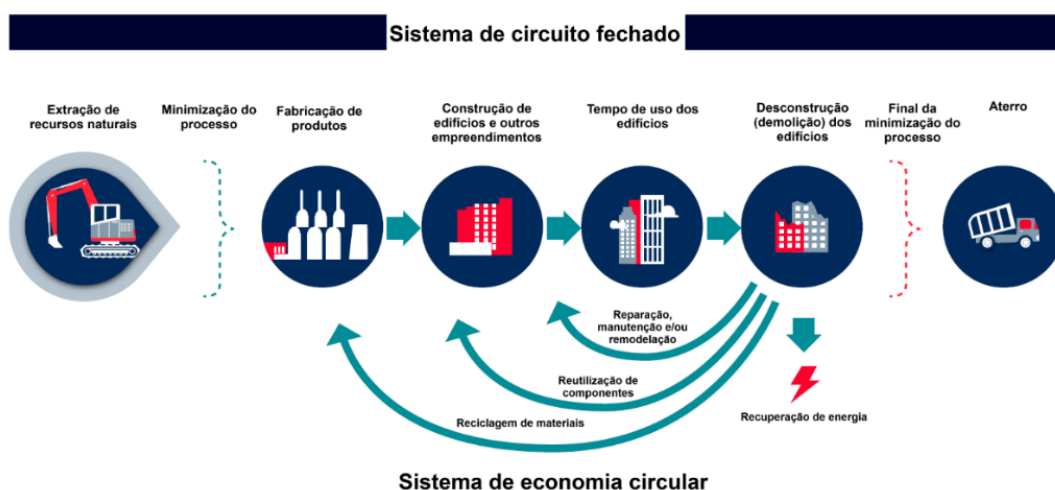
Autores	Absorção de água (%)				Limite normativo NBR 15116 (ABNT, 2021b) ARM < 12%			
	Agregado miúdo reciclado	Agregado graúdo reciclado	Agregado total reciclado	Agregado composto	Agregado miúdo reciclado	Agregado graúdo reciclado	Agregado total reciclado	Agregado composto
<p>^a O autor realizou o ensaio de absorção de água em três amostras de agregados graúdos e miúdos, portanto, o valor mostrado é a média entre os três.</p> <p>^b Os autores utilizaram dois agregados miúdos diferentes.</p> <p>^c Os autores utilizaram dois agregados totais reciclados diferentes, sendo um com partículas flutuantes e outro sem.</p> <p>^d Os autores usaram agregados reciclados graúdos (4-40 mm) de treze usinas de reciclagem diferentes presentes em diversas províncias na Espanha.</p> <p>^e Os autores caracterizaram dois agregados miúdos e dois graúdos.</p> <p>^f A autora utilizou dois agregados miúdos reciclados, sendo o primeiro com diâmetro máximo de 1,18 mm e o segundo com 3,00 mm.</p> <p>^g Os autores utilizaram dois agregados reciclados mistos (MRA1 e MRA2) com diferentes percentagens de partículas cerâmicas recolhidas em dias diferentes numa estação de tratamento de RCD localizada em Córdoba (sul de Espanha).</p> <p>^h Os autores usaram RCD's de quatro habitações diferentes, de diferentes tipologias de construção, presentes na cidade de Havana em Cuba.</p> <p>ⁱ Os autores caracterizaram dois agregados totais reciclados de locais diferentes do sul da Austrália, sendo o primeiro de 0-12 mm e o segundo 0-7 mm.</p> <p>^j Os autores caracterizaram duas faixas granulométricas de agregado graúdos, sendo de 6-12 mm e 12-22 mm. Os valores de 6,28% e 5,27% equivalem a absorção nos intervalos granulométrico de 6-12 mm e 12-22 mm, respectivamente.</p> <p>^k Os autores caracterizaram duas frações de agregado, sendo os ambos agregados graúdos, onde a primeira fração "MRA-M" tem dimensão aproximada de 6-12 mm e a segunda fração "MRA-G" tem dimensão aproximada de 4-22 mm.</p> <p>^l Os autores caracterizaram três frações de agregado, onde a primeira e segunda fração são agregados graúdos, e a terceira fração é agregado total reciclado. A primeira fração "MR1" tem dimensão aproximada de 18-32 mm, a segunda fração "MR2" com dimensão aproximada de 10-18 mm, a terceira fração "MR3" com dimensão aproximada de 0-10 mm.</p> <p>^m Os autores caracterizaram duas frações granulométricas de agregados graúdos, sendo a primeira 20 mm e a segunda 12,5 mm.</p> <p>ⁿ Os autores realizaram duas caracterizações de agregados graúdos, sendo a primeira "MRA30" que contem 30% proveniente de agregado natural, e a segunda "MRA70" que contem 70% proveniente de agregado natural.</p> <p>^o O autor realizou sua caracterização em treze amostras, portanto, o valor mostrado de absorção é a média dos resultados.</p> <p>^p Os autores caracterizaram dois agregados graúdos diferentes, sendo um dimensão máxima de 12 mm e outro de 20 mm. Os valores de 1,95% e 2,3% equivalem a absorção dos mesmos, respectivamente.</p> <p>^q Os autores caracterizaram três agregados totais reciclados, cada um deles provenientes de usinas de reciclagens diferentes.</p>								

Fonte: Autor, 2025

4 CONCRETO COM UTILIZAÇÃO DE AGREGADO RECICLADO

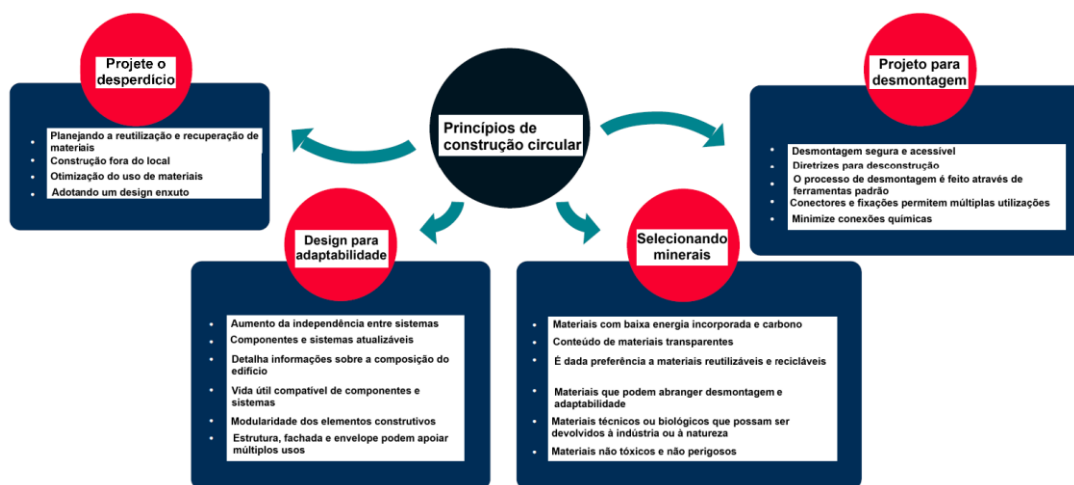
A utilização de agregados reciclados de RCD é uma das estratégias mais difundidas para cumprir simultaneamente o duplo objetivo de introduzir o conceito de economia circular (uso e reuso) através da logística reversa e de sustentabilidade na construção civil através do Marketing Verde (Gonzalez *et al.*, 2021; Merino-Lechuga *et al.*, 2023; Cantero *et al.*, 2021b; Rahla; Mateus; Bragança, 2021; Uchoa *et al.*, 2024c; Uchoa; Carvalho, 2024), como visto na Figura 4 e na Figura 5. Entretanto, para possibilitar o uso de AR em concreto, é necessário considerar as propriedades deles, a exemplo do teor de finos, da taxa de absorção da água, da massa específica, da textura e da forma, para aplicação de um sistema coerente de dosagem, devido a essas propriedades influenciarem tanto no estado fresco quanto no endurecido do concreto (Figueiredo Filho, 2011; Hansen, 1992; Leite, 2001).

Figura 4 – Economia circular x circuito fechado



Fonte: Adaptado de Rahla; Mateus; Bragança, 2021

Figura 5 – Esquematização da sustentabilidade na construção civil através da economia circular



Fonte: Adaptado de Rahla; Mateus; Bragança, 2021

Quanto ao emprego de ARM, o controle deverá ser mais rígido em decorrência da variabilidade dos materiais, em destaque os materiais cimentícios, onde sua quantidade demasiada prejudica as propriedades físicas e mecânicas do concreto (Tomasi, 2021; Hu *et al.*, 2020; Padovan, 2013).

4.1 Propriedades dos concretos com ARM no estado fresco

4.1.1 Abatimento

A incorporação dos agregados reciclados acaba diminuindo o abatimento durante o estado fresco do concreto, comparativamente aos concretos convencionais, podendo essa perda variar de 4% a 64% (Gomes, 2021; Oliveira, 2023b; Matias *et al.*, 2014; Zhang; Zong, 2013). Essa diminuição ocorre devido aos AR possuírem maior teor de material pulverulento, maior porosidade e alta capacidade de absorção de água da dosagem, o que acaba resultando em uma mistura com menor fluidez, consistência seca e necessidade de maior consumo de cimento (Frotte *et al.*, 2017; Pelissari, 2016; Gerin; Sales; Nardin, 2019; Angulo, 2005; Leite; Molin, 2002; Salles *et al.*, 2021; Malesev; Radonjanin; Marinkovic, 2010; Hansen, 1986b; Zordan; Paulon, 2000; Topçu; Sengel, 2004; Katz, 2003).

A água que irá ser absorvida pelo agregado reciclado poderá ser adicionada à água de amassamento, ou executando a pré-molhagem do agregado reciclado para reduzir a perda de plasticidade no concreto fresco (Gerin; Sales; Nardin, 2019; Leite, 2001; Ferreira; Brito; Barra, 2011; Etxeberria *et al.*, 2007; Silva, 2023; Reis, 2015;

Silva; Brito; Dhir, 2019). Nos autores citados, a adição de água durante a etapa de pré-molhagem variou entre 50% e 100% do valor de absorção do agregado reciclado, entretanto, Reis (2015) não recomenda utilizar menos de 60%, pois em sua pesquisa constatou que os AR ainda estavam absorvendo muito a água da mistura, resultando em perdas no abatimento.

Gonzalez *et al.* (2021) tiveram resultados que mostraram que, ao adicionar ARM ao concreto convencional em conjunto com substituição de 6,5% de cimento por metacaulim, o abatimento foi reduzido de 45 para 20 mm. Os mesmos autores explicaram que a incorporação de materiais pozolânicos levou à diminuição do abatimento do concreto ainda mais, devido à sua capacidade de interferir nas redes de aderência do material.

Estudos realizados por Fonseca (2006) indicaram que a geometria do agregado reciclado misto graúdo e sua textura mais áspera que a natural contribuem para a diminuição do abatimento do tronco de cone, que se deve ao empacotamento e travamento das partículas de graúdo nas misturas de concreto com AR. Tomasi (2021) identificou esse efeito, de maneira significativa, na substituição de 40% do AN_g pelo ARM_g, sendo necessária a utilização de um aditivo superplastificante – para aumento do abatimento do tronco de cone – apenas nesse traço, pois essa foi a maior substituição de agregado reciclado utilizada na pesquisa do autor, enquanto nas demais substituições por serem menores, não houve necessidade. Salles *et al.* (2021), Oliveira (2023b), Cartuxo *et al.* (2015) e Matias *et al.* (2014) confirmam essa constatação acerca do uso de aditivos superplastificantes.

De acordo com Padovan (2013), os agregados reciclados mistos possuem composição variada, composta por argamassa, concreto, cerâmica e rocha. O mesmo autor comenta que a natureza heterogênea destes agregados apresenta propriedades que podem ser afetadas em cada processo de produção do concreto, seja no estado fresco ou endurecido. Entretanto, Tomasi (2021) não percebeu dissimilaridades substanciais na homogeneidade da composição do ARM nos mais baixos teores de substituição de ARM_g em sua pesquisa, sendo eles 10% e 20%.

4.1.2 Massa específica e teor de ar

Fonseca (2006) em seus estudos mostrou que a massa específica do concreto fresco, feito com agregado reciclado misto graúdo é inferior à do concreto feito com

agregado graúdo natural devido ao reciclado ter características mais porosas (Tomasi, 2021). Essa informação é corroborada pelos autores Cantero *et al.* (2018), Cantero *et al.* (2019) e Cantero *et al.* (2020), onde esse último teve um resultado de massa específica 5% menor que o concreto convencional comparado ao uso de 50% de ARM_g no concreto, tendo como explicação a porosidade elevador do ARM.

Na pesquisa de Gonzalez *et al.* (2021), os autores perceberam que o agregado reciclado misto miúdo também influencia na diminuição da massa específica do concreto no estado fresco, tanto isoladamente quanto em conjunto com o agregado reciclado misto graúdo na mistura, chegando até um valor 5,3% menor de massa específica na mistura com 50% ARM_m e 50% ARM_g, e 5,8% menor na mistura com 50% ARM_m e 25% ARM_g, comparativamente à massa específica do concreto convencional.

Quanto ao teor de ar, nos estudos de Gonzalez *et al.* (2021) foi mostrado que a adição de materiais finos e/ou grãos mistos ao concreto com composições diferentes, sendo 50% ARM_m (Mistura 1), 50% ARM_g (Mistura 2), 25% ARM_m + 50% ARM_g (Mistura 3) e 50% ARM_m + 50% ARM_g (Mistura 4), causou valores 1,9, 1,4, 2,1 e 2,79 vezes maior que o registrado para o concreto convencional, respectivamente. O aumento no teor de ar no estudo dos autores pode estar ligado a (Yaprak *et al.*, 2011; Brito; Agrela; Silva, 2019; Gonzalez-Corominas; Etxeberria, 2014): (i) maior absorção de água na mistura de concreto devido à presença de ARM, (ii) menor densidade da argamassa aderida presente no agregado reciclado devido à presença de bolhas de ar no seu interior, (ii) textura mais rugosa do ARM em comparação com AN e (iv) a presença de microfissuras no interior do ARM que não estão ligadas aos poros permeáveis do agregado. Esses resultados de Gonzalez *et al.* (2021) são consistentes com os de Cantero *et al.* (2018) e os de Cantero *et al.* (2020), que apresentaram aumento dessa propriedade ao usar 100% ARM e 50% ARM_g no concreto, respectivamente.

Cantero *et al.* (2020) e Cantero *et al.* (2019) em seus estudos constataram que, conforme o maior uso de ARM nas misturas de concreto, foram encontrados menor massa específica e maior teor de ar no estado fresco, a exemplo concretos com taxa de substituição de 100% de ARM, onde a massa específica foi 7% menor e o teor de ar 37% superior ao concreto de referência.

4.2 Propriedades dos concretos com ARM no estado endurecido

4.2.1 Correlação entre absorção de água e porosidade

A adição de agregado reciclado misto à mistura de concreto aumenta a sua absorção de água devido à presença de partículas mais finas e materiais cerâmicos (Frotte *et al.*, 2017; Salles *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2022). Medina *et al.* (2014) em seus estudos mostraram que o uso de ARM_g em concretos, com taxa de substituição de até 25%, não tem efeito na capacidade de absorção. Entretanto, quando a taxa de substituição de ARM_g chega a 50%, a capacidade de absorção do concreto é entre 10% e 20% superior à do concreto com uso de AN (Gonzalez *et al.*, 2021). Quanto maior a quantidade de resíduos no agregado reciclado, maior será a porosidade na interface do concreto endurecido, e esse fenômeno é mais evidenciado em idades mais jovens do concreto (Levy; Helene, 2004).

Quanto ao uso em conjunto de AR_m e AR_g no concreto, estudos comentam que com até 20% de AN substituído por AR é possível obter baixa porosidade e absorção de água, todavia, à medida que a porcentagem de substituição aumenta além deste nível, a porosidade e a absorção de água do concreto também aumentam (Salles *et al.*, 2021).

Silva e Andrade (2017) em seus trabalhos compararam concretos com ARCO_g e concretos com ARM_g com porcentagem de substituição de 50% e 100%, onde em ambas as composições foi percebido que à medida que a relação a/c aumenta, a absorção de água e a porosidade aumentam. Esses resultados são corroborados pelos autores Zong, Fei, Zhang (2014), Leite (2001) e Behera *et al.* (2014).

4.2.2 Massa específica

O uso de agregados reciclados mistos (miúdos e/ou graúdos) nos concretos, geralmente, leva a uma diminuição nos valores de massa específica da mistura à medida que a proporção de agregado reciclado aumenta em comparação com o agregado natural, devido ao agregado reciclado possuir menor massa específica frente ao natural (Gomes, 2021; Gonzalez *et al.*, 2021; Cantero *et al.*, 2020; Merino-Lechuga *et al.*, 2023; Silva *et al.*, 2022). Mediante levantamento bibliográfico, essa diminuição varia entre 0,95% e 13,79% (Frotte *et al.*, 2017; Frotte; Di Nubila, 2015; Rodrigues; Fucal, 2014; Cantero *et al.*, 2020; Oliveira, 2023b; Tomasi, 2021; Silva; Andrade, 2017; Leite, 2001; Merino-Lechuga, 2023; Cantero *et al.*, 2021b; Rosales *et*

al., 2023; Bravo *et al.*, 2015a; Cantero *et al.*, 2018; Medina *et al.*, 2014; Yaprak *et al.*, 2011).

De acordo com Rosales *et al.* (2023), a massa específica do concreto endurecido é inversamente proporcional à quantidade de poros acessíveis, portanto, misturas com uso de ARM possuem maior porosidade acessível e menor massa específica, devido à alta presença de poros nos agregados reciclados.

4.2.3 Resistência à compressão

O concreto com uso de agregado reciclado tende a ter uma resistência à compressão menor em relação ao uso de agregado natural dependendo da origem dos materiais reciclados – sendo os materiais cimentícios e cerâmicos as principais fontes –, da proporção de agregado reciclado em relação ao agregado convencional (parcialmente ou totalmente), da quantidade de finos, da argamassa aderida, da quantidade de impurezas e contaminantes, e da relação água/cimento (Gomes, 2021; Banthia; Chan, 2000; Leite, 2001; Limbachiya; Meddah; Ouchagour, 2012; Machado, 2020; Bahrami *et al.*, 2020; Zong; Fei; Zhang, 2014; Xiao *et al.*, 2012). Eckert e Oliveira (2017) sugerem que um processo de britagem intensivo poderia ser aplicado para diminuir a quantidade de argamassa aderida na superfície dos AR, melhorando sua qualidade e, conseqüentemente, aumentando a resistência à compressão de concretos com uso desse AR.

De acordo com Thomas, Thaickavil e Wilson (2018), a resistência do concreto contendo AR depende de fatores como o teor de cimento, a resistência original do AR e a zona de transição interfacial entre os agregados, pois esta zona é mais fraca quando se utilizam AR devido à presença de argamassa aderida. Bidabadi, Akbari e Panahi (2020), Rashid *et al.* (2020) e Pedro, Brito e Evangelista (2017) corroboram esta afirmação, pois constataram que a má qualidade da ligação entre a nova pasta de cimento e a argamassa anterior resulta em uma maior relação a/c necessária para a mistura e afeta negativamente a resistência à compressão do concreto.

De acordo com os resultados das pesquisas de Etxeberria *et al.* (2007), Lee e Choi (2013), Liu, Xiao e Sun (2011) e Xiao *et al.* (2012), existe maior propensão à ocorrência de fissuras na argamassa aderida na mistura de concreto com uso de agregados reciclados, devido a eles serem mais propensos a falhas (rupturas) quando comparados aos agregados naturais, em especial os agregados reciclados graúdos.

Os mesmos autores comentam que o mecanismo de falha (ruptura) do concreto em tais casos, normalmente, envolve a interface adesiva entre o agregado reciclado e a argamassa aderida.

Os resultados dos estudos de Mehta e Monteiro (2014) indicam que o concreto contendo AR_m desenvolve microfissuras em idades avançadas, que estão ligadas ao comportamento térmico do concreto. Por outro lado, os mesmos autores comentam que quando são utilizados AR_g , esse efeito de microfissuras não é observado.

A resistência à compressão do concreto com uso de ARM aumenta em conformidade com o acréscimo de ARM_m em substituição ao AN_m e diminui quando é aumentada a relação a/c (Rodrigues; Fucale, 2014; Gerin; Sales; Nardin, 2019; Frotte *et al.*, 2017; Leite, 2001; Viera, 2003). O efeito contrário (em associação ao aumento da relação a/c) é visto quando substitui-se AN_g por ARM_g onde a resistência à compressão do concreto diminui (Viera; Dal Molin; Lima, 2008; Leite, 2001; Vieira, 2003; Viana Neto; Sales; Sales, 2018; Xiao *et al.*, 2012; Limbachiya *et al.*, 2012).

Viera (2003), Leite (2001) e Lima (1999) justificam o aumento de resistência do concreto ao utilizar ARM_m em função de fatores como textura, granulometria contínua e grande quantidade de finos presentes nesses agregados, fatores esses que diminuem a segregação e possibilitam uma compactação melhor das misturas (fechamento dos vazios). Quanto ao uso de ARM_g , os mesmos autores comentam que esse comportamento de diminuição da resistência do concreto é explicado através da fragilidade (baixa resistência ao impacto), da alta porosidade e de possível efeito pozolânico desses agregados. Ademais, Piccinalli *et al.* (2022) comentam que durante o processo de mistura, os ARM_g têm tendência a decompor-se em partículas menores, resultando em um aumento da absorção de água e uma gradação mais fina da mistura de cimento. Este fenômeno, conforme observado nos estudos de Amorim Junior *et al.* (2019) e Guo *et al.* (2018), leva a uma redução ainda maior na resistência do concreto.

Outro aspecto que prejudica a resistência à compressão do concreto com uso de ARM é a alta porosidade dos agregados reciclados, resultando no aumento da porosidade total do concreto (Andrade Filho, 2021; Vieira; Figueiredo; John, 2020). Outrossim, a adição de água suplementar para neutralizar a elevada natureza higroscópica dos ARM pode influenciar negativamente as características estruturais de tais concretos (Andrade Filho, 2021). Este incremento de água pode aumentar a

porosidade dentro da matriz solidificada, prejudicando consequentemente a sua capacidade de resistência à compressão (Mehta; Monteiro, 2014).

De acordo com vários estudos de Poon, Kou e Lam (2007), Lotfi *et al.* (2015), Limbachiya *et al.* (2012), Lotfy e Al-Fayez (2015) e Xiao *et al.* (2012), o uso de AR em substituição parcial ao AN em até 30% em concretos, possui um desempenho satisfatório quanto à resistência à compressão em comparação ao concreto convencional. Entretanto, outros autores como Etxeberria *et al.* (2007) limitam essa substituição a 25% e, outros estudos como Salles *et al.* (2021), Bahrami *et al.* (2020) e Machado (2020) limitam essa substituição a 20%. No estudo realizado por Barhmaiah *et al.* (2021), observou-se que a resistência à compressão do concreto com uso de AR diminuiu menos de 20% quando a taxa de substituição foi inferior a 50%. No entanto, os mesmos autores comentaram que quando a taxa de substituição excedeu 50%, a redução da resistência foi significativa e o concreto não conseguiu atingir a resistência pretendida.

Com relação ao uso de ARM em concretos, seja ARM_m ou ARM_g, Andal *et al.* (2011) e Nepomuceno, Isidoro e Catarino (2018) confirmaram que quando esse agregado for de boa qualidade, poderá servir como substituição parcial de 30% de agregado natural no concreto, tendo como resultado uma resistência à compressão comparável à do concreto de referência. Porém, outros autores como Salgado e Silva (2021), Bektas, Wang e Ceylan (2009), Cachim (2009), Yang, Du e Bao (2011) e Joseph *et al.* (2023) são mais criteriosos nessa substituição limitando a 20%, tendo também os autores Cantero *et al.* (2018) que limitam a 25%. Além disso, o ARM_g não tratado (ou de baixa qualidade) apresenta desempenho satisfatório como substituto do AN_g até uma taxa de substituição máxima de 30% (Joseph *et al.*, 2023; Joseph *et al.*, 2022).

Para compensar desvantagens como alta variabilidade, baixa massa específica, alto índice de britagem e absorção significativa de água com o uso de ARM em concreto, geralmente é aconselhável limitar a proporção de materiais cerâmicos nele a não mais que 20%, podendo dessa forma chegar a resultados satisfatórios e aproximados de resistência à compressão quando comparados aos concretos com uso de AN (Bektas; Wang; Ceylan, 2009; Cachim, 2009; Yang; Du; Bao, 2011; Gonzalez *et al.*, 2021; Bravo *et al.*, 2015a). Contudo, Ozbakkaloglu, Gholampour e Xie

(2018) e Salgado e Silva (2021) são mais ponderados nessa porcentagem, limitando a 3% e 15% de materiais cerâmicos presentes em ARM, respectivamente

Na pesquisa realizada por Bravo *et al.* (2015a), observou-se que a utilização de ARM_g de várias regiões de Portugal, resultou num decréscimo de quase 5% na resistência à compressão do concreto quando a taxa de substituição foi de 20%.

Os autores Silva *et al.* (2022) constataram que, ao estudarem concretos confeccionados com 25% de ARM_g aos 28 dias de idade e relação água/cimento (a/c) de 0,50, observou-se um declínio de 8,7% na resistência à compressão em relação ao concreto de referência.

Os estudos de Mas *et al.* (2012) demonstraram que a substituição de 30% de AN_g por ARM_g resultou em um declínio substancial na resistência à compressão após 90 dias, exibindo uma diminuição de 23,8% para o concreto feito com cimento CEM II, e uma diminuição de 13,5% para concreto utilizando cimento CEM III/A. Em contrapartida, os mesmos autores constataram que quando o nível de substituição foi elevado para 50%, houve melhoria na resistência à compressão em 7,5%, onde sua explicação é proveniente do uso do cimento CEM V/A da Série 1-CEM V.

Gonzalez *et al.* (2021) constataram em seus estudos que a adição de ARM_g, em até 50% no concreto, registrou pequenas diminuições da resistência aos 28 dias (- 3,8% e - 5,6%) e ligeiros aumentos aos 90 dias (+ 3,5% e + 8,4%). Esse comportamento está de acordo com os achados de Cantero *et al.* (2018), Poon *et al.* (2004), Gomes, Brito e Bravo (2014) e Lotfy e Al-Fayez (2015), que relataram que quando o percentual de substituição do agregado graúdo reciclado é igual ou inferior a 50%, não há disparidades dignas de nota em relação aos concretos convencionais quanto a resistência à compressão (Bektas; Wang; Ceylan, 2009; Cachim, 2009; Yang; Du; Bao, 2011; Lotfi *et al.*, 2015).

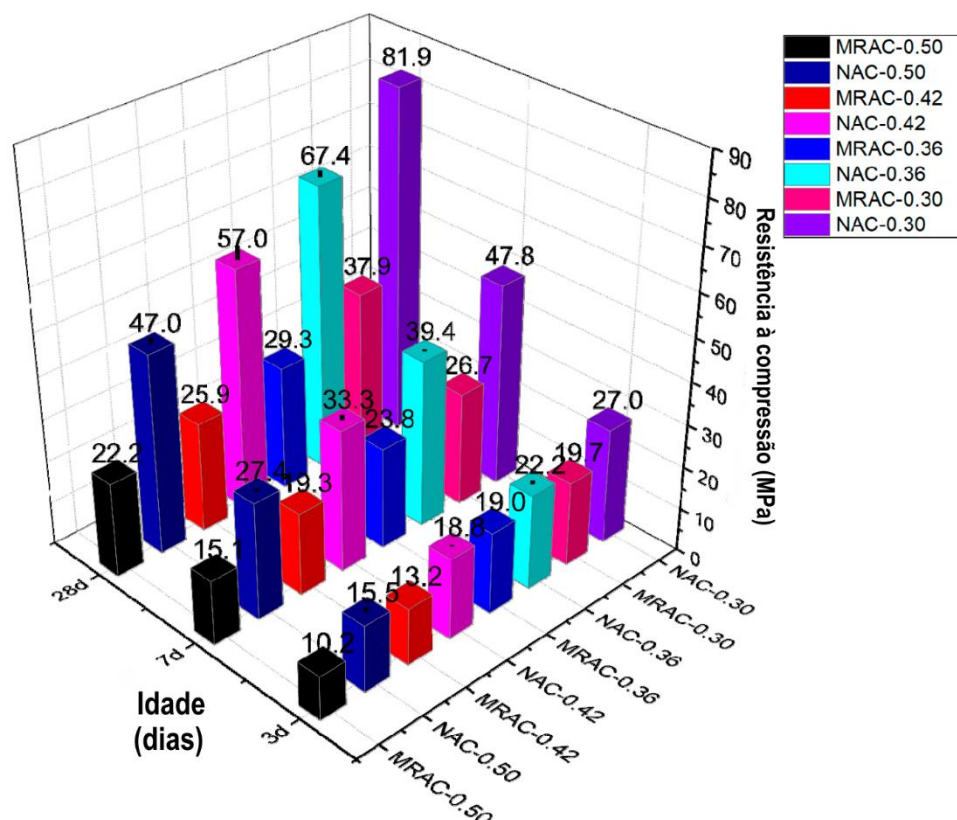
Segundo González *et al.* (2021), a incorporação de ARM_g e ARM_m simultaneamente em misturas de concreto teve efeitos diferentes em seu desempenho. As misturas estudadas pelos autores que incluíam proporções variadas (25% ARM_g e 25% ARM_m, 25% ARM_g e 50% ARM_m, 50% ARM_g e 25% ARM_m, 50% ARM_g e 50% ARM_m) mostraram uma diminuição na resistência à compressão após 28 dias em comparação ao concreto com uso de AN. Especificamente, houve queda de 5,5%, 5,0%, 8,0% e 10,7% nas misturas mencionadas, respectivamente (Gonzalez *et*

al., 2021). Porém, após 90 dias de cura, os autores perceberam que todas as misturas apresentaram melhor desempenho, sendo destaque a mistura 50% ARM_g e 50% ARM_m, pois esse atingiu um aumento máximo de 12,4% na resistência à compressão em relação ao concreto com uso de AN.

Como recomendação, Cantero *et al.* (2018) aconselham que, quando os concretos utilizarem mais de 50% de ARM (seja ARM_m e/ou ARM_g), eles precisarão ter entre 4% a 10% menos a/c e 5% a 10% mais cimento do que o concreto com uso de AN, para atingir a mesma resistência à compressão axial aos 28 dias. De acordo com os estudos de Piccinalli *et al.* (2022), onde os autores analisaram diversas pesquisas que utilizaram ARM em suas misturas, os resultados demonstram que numa proporção de substituição de 50%, há uma redução média na resistência à compressão do concreto de aproximadamente 15%.

De acordo com a Figura 6, os autores Meng *et al.* (2021a) indicaram que em comparação ao concreto de referência com diferentes a/c (NAC-0,30, NAC-0,36, NAC-0,42, NAC-0,50) a resistência à compressão de 3 dias dos quatro grupos de concreto que utilizaram 100% de ARM_g com os mesmos a/c (MRAC-0,30, MRAC-0,36, MRAC-0,42, MRAC-0,50) apresentaram diminuições, variando de 14% a 34%. Além disso, os mesmos autores comentam que as diminuições da resistência aos 7 dias e aos 28 dias foram ainda mais acentuadas, variando de 40% a 45% e 53% a 57%, respectivamente. Estas descobertas sugerem que a resistência das partículas mais fracas, presentes no ARM, influenciam significativamente a resistência global do concreto (Meng *et al.*, 2021a). Adicionalmente, os mesmos autores observaram que a variação de AN_g para ARM_g, teve impacto mais significativo na resistência do que a relação água/cimento (a/c). Isto indica indiretamente que, embora a redução do a/c possa melhorar até certo ponto a resistência à compressão, não poderá preencher totalmente a lacuna de desempenho entre o ARM e o AN (Meng *et al.*, 2021a).

Figura 6 – Comparação da resistência à compressão do ARM_g com valores de referência



Fonte: Adaptado de Meng *et al.*, 2021a

De acordo com estudo realizado por Martínez-Lage *et al.* (2012), constatou-se que em concretos com taxa de substituição de 100% de ARM_g, houve diminuição da resistência à compressão variando de 20% a 30%. Esse resultado é condizente com o dos autores Bravo *et al.* (2015a), onde eles utilizaram 100% de ARM_g no concreto e obtiveram uma redução na resistência à compressão de 26%.

Silva *et al.* (2022) constataram em suas pesquisas que o concreto constituído com 100% de ARM_g e com relação água/cimento (a/c) de 0,60 demonstrou uma diminuição na resistência à compressão de 60,6% aos 63 dias, em comparação ao concreto de referência.

Na pesquisa conduzida por Piccinali *et al.* (2022), que revisou estudos de diversos autores que utilizaram ARM_g na composição de seus concretos, foi constatado que quando a substituição de AN_g por ARM_g chega a 100%, a resistência à compressão do concreto possui uma tendência a diminuir cerca de 22% em comparação ao concreto de referência.

Quanto a resistência à compressão de concretos com ARM_g com substituição de cimento por metacaulim, Teixeira *et al.* (2020) fizeram concretos com uso de 25% e 50% de ARM_g em conjunto com 5% e 10% de metacaulim, além do concreto de referência com uso de AN. Os mesmos autores perceberam que na mistura que continha 25% de ARM_g e 5% de metacaulim, houve uma redução na resistência à compressão do concreto de 15,24% em comparação à mistura de referência, enquanto que na mistura que continha 25% de ARM_g e 10% de metacaulim houve grande aumento na resistência à compressão do concreto de 65,37% na mesma condição de comparação da mistura de 5%. Essa variação na resistência à compressão dos concretos, em decorrência da presença de metacaulim, se inverteu nos concretos com 50% de ARM_g pois, a mistura com 50% de ARM_g e 5% de metacaulim teve aumento de 30,7% na resistência à compressão, em contraponto, a mistura com 50% de ARM_g e 10% de metacaulim teve uma leve redução na resistência à compressão, sendo cerca de 4,89% (Teixeira *et al.*, 2020). Isso demonstra que com grandes porcentagens de substituição de AN por AR, é necessário teores maiores de substituição de cimento por metacaulim para compensar a perda de resistência à compressão do concreto (Younis *et al.*, 2020; Siddique; Klaus, 2009; Antoni *et al.*, 2012; Guneyisi *et al.*, 2012).

Devido a não haver outros trabalhos que utilizem ARM e metacaulim (seja como adição mineral e/ou como substituição do cimento) com o foco na resistência à compressão, será discutido o quanto o metacaulim aumenta essa propriedade em outros tipos de AR, onde a maioria dos poucos trabalhos internacionais que agregam esse tópico usaram ARCO_g (Kou; Poon; Agrela, 2011; Muduli; Mukharjee, 2019; Kapoor; Singh; Singh, 2017; Singh; Singh, 2016; Younis *et al.*, 2020).

Kou, Poon e Agrela (2011) conduziram um estudo sobre o efeito da adição de 15% de metacaulim ao concreto uso de 50% e 100% de ARCO_g. Os mesmos autores descobriram que essa adição melhorou a resistência à compressão em 10% no concreto com 100% de ARCO_g. Singh e Singh (2016) também relataram que a adição de 10% de metacaulim melhorou a resistência à compressão do concreto com uso de ARCO_g. Outros estudos realizados por Muduli e Mukharjee (2019) e por Kapoor, Singh e Singh (2017) demonstraram que a substituição de 10% do cimento por metacaulim resultaram em uma melhoria significativa na resistência à compressão. Além disso,

Kapoor, Singh e Singh (2017) relataram que o uso de 20% de metacaulim em concreto com 100% ARCO_g levou à melhoria da resistência.

Estudos de Siddique, Klaus (2009), Antoni *et al.* (2012) e Guneyisi *et al.* (2012) indicam que o grau de aumento de resistência à compressão é diretamente proporcional à quantidade de metacaulim utilizada na mistura do concreto. Observou-se que o teor ideal de metacaulim está na faixa de 5-20% de substituição da massa de cimento, em função do teor de agregado reciclado utilizado na mistura (Siddique, Klaus, 2009).

Younis *et al.* (2020) executaram um estudo onde foi utilizado 35%, 70% e 100% de ARCO_g em conjunto com 4%, 8%, 12%, 16% e 20% de substituição de cimento por metacaulim nas misturas de concreto. Os autores constataram que, independentemente do teor de ARCO_g, todas as misturas que continham metacaulim obtiveram melhorias na resistência à compressão, em todas as idades analisadas (7, 28 e 90 dias), chegando próximo ao concreto de referência. Porém, Younis *et al.* (2020) perceberam que a quantidade ideal de metacaulim que resultava em uma resistência à compressão igual ou comparável à da mistura de agregado natural (concreto de referência), variava dependendo da proporção de ARCO_g presente na mistura.

Younis *et al.* (2020) analisaram que, em misturas formuladas com 35% de ARCO_g, a incorporação de 12% de metacaulim foi suficiente para atingir a mesma resistência à compressão do concreto de referência após 28 dias. Isto implica que a substituição de 12% do cimento por metacaulim pode contrabalançar a diminuição de 12% na resistência à compressão observada quando 35% do AN_g foi substituído por ARCO_g (Younis *et al.*, 2020). Os mesmos autores comentaram que nos casos em que a mistura continha 70% de ARCO_g, foi necessária a substituição de 20% de cimento por metacaulim para obter uma resistência à compressão de 28 dias comparável à da mistura de referência (Younis *et al.*, 2020). Contudo, nas misturas com 100% de ARCO_g, a adição de 20% de metacaulim não resultou em uma resistência à compressão aos 28 dias em paridade à mistura de referência (Younis *et al.*, 2020). Em vez disso, a inclusão de 20% de metacaulim ocasionou a uma resistência à compressão 9,60% inferior à mistura de referência, embora esse valor fosse 22,47% maior que na mistura com 100% de ARCO_g e 0% de metacaulim (Younis *et al.*, 2020).

O impacto benéfico do metacaulim na resistência à compressão de misturas contendo ARCO_g pode ser racionalizada através de três mecanismos, conforme descrito por Younis *et al.* (2020), sendo o primeiro físico e os outros dois, químicos.

O mecanismo físico é explicado pela capacidade de preenchimento de partículas microscópicas de metacaulim, que podem preencher micro vazios e poros na superfície do ARCO_g e modificar a microestrutura do concreto para aumentar sua densidade (Antoni *et al.*, 2012; Younis; Mustafa, 2018; Younis *et al.*, 2020). Este aumento na densidade aumenta posteriormente a resistência à compressão do concreto (Antoni *et al.*, 2012; Younis *et al.*, 2020).

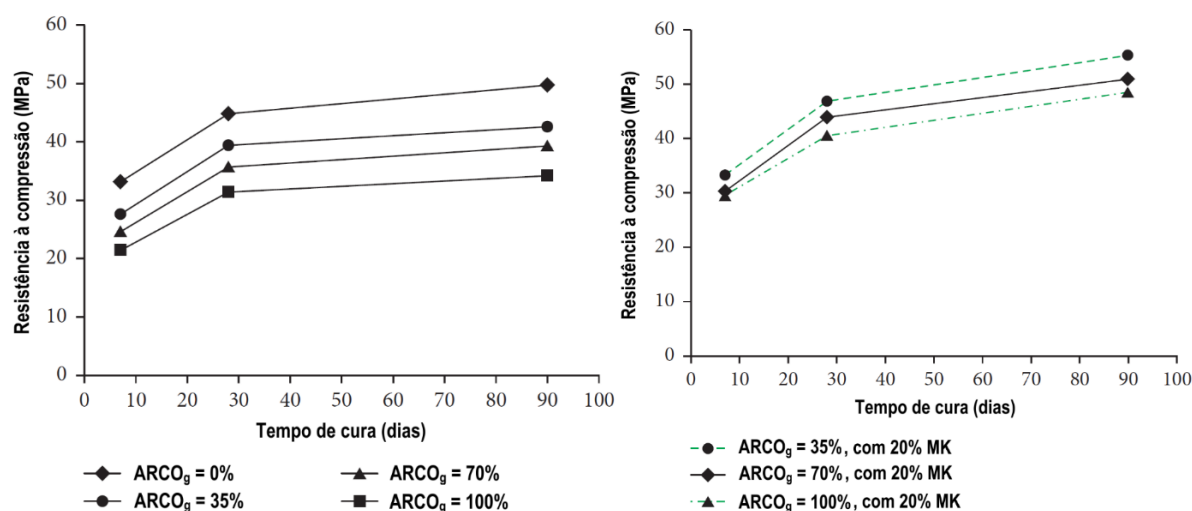
O primeiro mecanismo químico envolve a reação pozolânica do metacaulim, provocada pelo seu alto teor de dióxido de silício (Siddique; Klaus, 2009; Younis *et al.*, 2020). O dióxido de silício reage com o hidróxido de cálcio, um subproduto da hidratação do cimento, resultando em hidratos de silicato de cálcio adicionais (C – S – H), sendo esse um componente chave na melhoria da resistência do concreto (Tam; Tam; Le, 2007). Este processo químico também melhora a resistência à compressão das misturas que utilizam ARCO_g (Tam; Tam; Le, 2007; Younis *et al.*, 2020). Portanto, o grau de melhoria da resistência à compressão aumenta à medida que a porcentagem de metacaulim cresce na mistura de concreto, seja como adição mineral e/ou substituindo parcialmente o cimento (Younis *et al.*, 2020).

O segundo mecanismo químico envolve uma aceleração da hidratação do cimento (Younis *et al.*, 2020), que é atribuído à extensa área superficial das minúsculas partículas de metacaulim, atuando como catalisador da reação pozolânica, melhorando assim a resistência à compressão do concreto (Younis *et al.*, 2020; Siddique, Klaus, 2009).

A influência temporal de cura do concreto na evolução da resistência à compressão para diversas misturas, executadas pelos autores Younis *et al.* (2020), é detalhada nas Figura 7 (gráfico a esquerda), Figura 7 (gráfico a direita) e Figura 8 que delineiam a progressão da resistência para misturas com e sem incorporação de metacaulim ao longo do tempo. Em particular, na Figura 7 (gráfico a esquerda) os autores mostram a progressão da resistência das misturas sem metacaulim, enquanto a Figura 7 (gráfico a direita) ilustra a progressão da resistência das misturas contendo 20% de metacaulim. A partir destes números, pode-se discernir que a progressão da

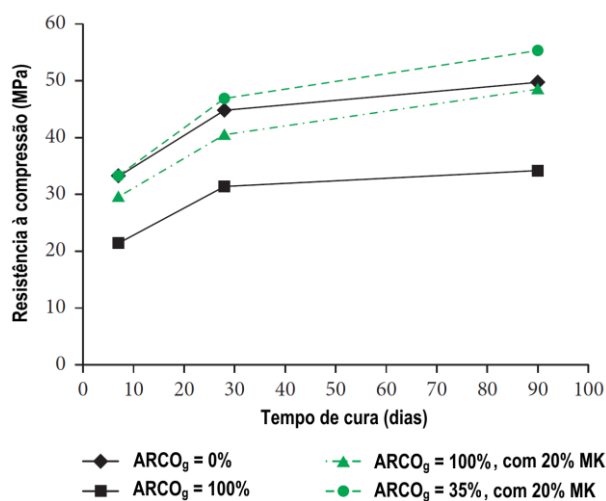
resistência para as misturas que incorporam metacaulim supera aquelas sem ele, particularmente após a marca de 28 dias e até 90 dias de cura do concreto (Younis *et al.*, 2020). Consequentemente, os autores notaram que o impacto do metacaulim na resistência à compressão das misturas com ARCO_g é mais pronunciado nos estágios iniciais de cura do que nos estágios posteriores. Esta diferença no impacto do metacaulim em conjunto com as idades do concreto fica evidente na Figura 8, que faz contraste da progressão de resistência em misturas com metacaulim versus aquelas sem ele (Younis *et al.*, 2020).

Figura 7 – Progressão da resistência à compressão com ARCO_g sem metacaulim (gráfico a esquerda), progressão da resistência à compressão com ARCO_g com metacaulim (gráfico a direita)



Fonte: Adaptado de Younis *et al.*, 2020

Figura 8 – Progressão da resistência à compressão com ARCO_g sem metacaulim x com ARCO_g com metacaulim



Fonte: Adaptado de Younis *et al.*, 2020

4.3 Panorama atual dos concretos desenvolvidos com ARM

Neste tópico são discutidas as descobertas de vários pesquisadores que incorporaram agregados reciclados mistos graúdo (ARM_g) ao concreto, examinando dosagens e características nos estados fresco e endurecido, conforme relatado na literatura existente.

O Quadro 12 descreve resumidamente os dados bibliográficos empregados pelos pesquisadores abaixo citados, incluindo variáveis como a porcentagem de substituição do agregado reciclado, o diâmetro máximo do agregado, o proporcionamento do traço em massa e o método de dosagem utilizado.

Quadro 12 – Dosagens em massa das pesquisas

Autores	Percentual de substituição (%)	Diâmetro máximo do agregado (mm)	Proporcionamento (em massa)	Método de dosagem
Leite (2001)	0, 11.5, 50, 88.5, 100	4,75 e 19	Vários	IPT/EPUSP
Viera (2003)	0, 50, 100	4,75 e 19	Vários	IPT/EPUSP
Lovato (2007)	0, 50, 100	4,75 e 25	Vários	IPT/EPUSP
Carneiro (2011)	0, 25	4,80 e 19	Vários	MEC
Medina <i>et al.</i> (2014)	0, 25 e 50	20	Vários	Método Britânico DOE "DOE British Method"
Frotte; Núbila (2015)	0, 25, 50	4,75 e 63	Vários	ABCP/"ACI"
Castano-Cardoza <i>et al.</i> , (2016)	0, 100	4 e 8	Vários	Método "optimized packing"
Figueiredo; Vargas (2016)	0, 30, 60, 100	4,75 e 25	Vários	Literatura
López-Uceda <i>et al.</i> (2016a)	0, 20, 40, 100	25	Vários	Literatura
López-Uceda <i>et al.</i> (2016b)	0, 20, 40, 100	25	Vários	Literatura
Frotte <i>et al.</i> (2017)	0, 25, 50	4,75 e 63	Vários	ABCP/"ACI"

continua

continuação

Autores	Percentual de substituição (%)	Diâmetro máximo do agregado (mm)	Proporcionamento (em massa)	Método de dosagem
Silva; Andrade (2017)	0, 50, 100	19	Vários	IPT/EPUSP
Cantero <i>et al.</i> (2020)	0, 50	22	Vários	Norma Europeia "EN 206-1"
Ferreira <i>et al.</i> (2020)	0, 25, 50, 75, 100	4,75	Vários	Norma Europeia "EN 206-1"
Cantero <i>et al.</i> (2021a)	0, 50	22	Vários	Norma Europeia "EN 206-1"
Cantero <i>et al.</i> (2021b)	0, 25, 50	12, 22	Vários	Método de Mistura Britânico " <i>British mix approach</i> "
Gomes (2021)	0, 80, 100	19	1: 1,55: 2,78, 0,50	ABCP/"ACI"
González <i>et al.</i> (2021)	0, 25, 50	12	Vários	Norma Europeia "EN 206-1"
Meng <i>et al.</i> (2021a)	100	10, 18, 32	Vários	Método " <i>closest packing</i> "
Salgado; Silva (2021)	0, 20	19	1: 2,02: 3,03: 0,5	ACI
Salles <i>et al.</i> (2021)	0, 25, 50, 100	19	1: 2,16: 2,73: 0,55	ACI
Joseph <i>et al.</i> (2022)	0, 30, 60, 100	20	Vários	Norma indiana "IS 10262"
Meng <i>et al.</i> (2022)	100	9,75 e 31,5	Vários	Método " <i>closest packing</i> "
Rodriguez-Alvaro <i>et al.</i> (2022)	0, 30, 50	4	Vários	Norma Europeia "EN 206-1"
Silva <i>et al.</i> (2022)	0, 25, 50, 75, 100	19	Vários	ACI
Barroso <i>et al.</i> (2023)	0, 50, 75	12	Vários	Método " <i>Fauy</i> "
Joseph <i>et al.</i> (2023)	0, 30, 60, 100	12,5 e 20	Vários	Norma Indiana "IS 10262"
Merino-Lechuga <i>et al.</i> (2023)	100	12,5	1: 2,08: 6,27: 0,4	Literatura
Oliveira (2023b)	0, 20, 40	19	Vários	Literatura

conclusão

Autores	Percentual de substituição (%)	Diâmetro máximo do agregado (mm)	Proporcionamento (em massa)	Método de dosagem
Oliveira (2023c)	0, 20, 30	19	Vários	EMV
Rosales <i>et al.</i> (2023)	0, 25, 50	4, 22	Vários	Literatura
Lima (2024)	0, 50	25	1:1,33:2,37:0,45	ABCP/"ACI"
Nesa <i>et al.</i> (2024)	40	20	Vários	ACI
Silva <i>et al.</i> (2024)	0, 20, 50	25	1:1,33:2,37:0,45	ABCP/"ACI"
Uchoa <i>et al.</i> (2024b)	0, 20, 50	25	1:1,33:2,37:0,45	ABCP/"ACI"
Rosales <i>et al.</i> (2025)	0, 50	12 e 22	Vários	Literatura
Vintimilla; Etxeberria (2025)	0, 20, 30, 50, 100	10 e 20	Vários	<i>Structural Concrete Code</i>

Fonte: Autor, 2025

A análise do Quadro 12 revela que a literatura emprega uma gama variada de porcentagens de substituição de agregados naturais graúdos (AN_g) por agregados reciclados mistos graúdos (ARM_g), frequentemente excedendo os limites especificados na NBR 15116 (2021b), entretanto, alcançando resultados satisfatórios e atendendo aos critérios estruturais. Observa-se também que, dentre os 36 trabalhos mostrados no Quadro 12, a maioria deles preferiu utilizar ARM_g com diâmetro máximo de 19 mm e de 25 mm.

A literatura mostrou diversas técnicas de dosagem para concreto com ARM_g, sem que um único método padronizado prevaleça, contudo, o método da ABCP e o método da norma europeia “EN 206-1” foram os mais utilizados dentre os 36 apresentados no Quadro 12, sendo ambos usados em 6 trabalhos.

O Quadro 13 exhibe os resultados da literatura sobre os concretos com ARM_g no estado fresco, enquanto o Quadro 14 mostra os resultados para o estado endurecido desses concretos com esses agregados.

Quadro 13 – Propriedades dos concretos com agregados reciclados mistos graúdos no estado fresco

Autores	Ensaio			
	Espalhamento (mm)		Massa específica (kg/m ³)	
	Menor	Maior	Menor	Maior
Leite (2001)	0,00	45,00	2139,00	2517,00
Lovato (2007)	80,00	120,00	1985,00	2432,00
Carneiro (2011)	65,00	95,00	-	-
Medina <i>et al.</i> (2014)	32,00	42,00	-	-
Frotte; Núbila (2015)	35,00	50,00	2120,00	2550,00
Castañó-Cardoza <i>et al.</i> (2016)	40,00	42,50	2192,00	2220,00
Frotte <i>et al.</i> (2017)	35,00	50,00	2120,00	2550,00
Silva; Andrade (2017)	-	-	2000,00	2160,00
Cantero <i>et al.</i> (2020)	71,90	78,10	2240,00	2262,00
Ferreira <i>et al.</i> (2020)	260,00	260,00	2009,92	2021,93
Cantero <i>et al.</i> (2021a)	71,90	78,10	2240,00	2262,00
Cantero <i>et al.</i> (2021b)	-	-	2290,00	2310,00
Gomes (2021)	19,00	19,00	2207,80	2207,80
González <i>et al.</i> (2021)	51,70	60,00	2275,41	2380,97
Meng <i>et al.</i> (2021)	120,00	180,00	-	-
Salles <i>et al.</i> (2021)	0,00	110,00	-	-
Joseph <i>et al.</i> (2022)	75,00	90,00	2386,67	2473,00
Silva <i>et al.</i> (2022)	80,00	100,00	-	-

continua

conclusão

Autores	Ensaio			
	Espalhamento (mm)		Massa específica (kg/m ³)	
	Menor	Maior	Menor	Maior
Barroso <i>et al.</i> (2023)	52,00	58,00	-	-
Oliveira (2023b)	85,00	90,00	2320,00	2390,00
Oliveira (2023c)	90,00	150,00	-	-
Lima (2024)	25,00	180,00	-	-
Nesa <i>et al.</i> (2024)	-	20,00	-	-
Silva <i>et al.</i> (2024)	70,00	220,00	2322,00	2499,00
Uchoa <i>et al.</i> (2024)	70,00	220,00	2322,00	2499,00
Rosales <i>et al.</i> (2025)	-	80,00	-	-
Quantidade de Dados	22	25	13	13
Mínimo	0,00	19,00	14,00	14,00
Máximo	260,00	260,00	2386,67	2550,00
Amplitude	260,00	241,00	2372,67	2536,00

Fonte: Autor, 2025

Ao analisar o Quadro 13 é perceptível a variação dos valores de abatimento. A explicação para isso é devido a inserção dos ARM_g influenciar diretamente no abatimento dos concretos, em função da alta absorção de água desses agregados. Para combater essa perda de abatimento, a maioria dos autores utilizaram aditivos superplastificantes e técnicas de compensação da absorção de água desses agregados, a exemplo da pré-molhagem. Quanto a massa específica, os concretos executados com ARM_g apresentaram valores distintos, abrangendo de 1985 kg/m³ a 2550 kg/m³.

Quadro 14 – Propriedade dos concretos com agregados reciclados mistos graúdos no estado endurecido

Autores	a/c	Resistência à compressão (MPa) aos 28 dias								
Substituição (%) Agregado graúdo	-	0	20	25	30	40	50	60	75	100
Leite (2001) ^a	0,40	43,42	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,45	37,08	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,60	21,95	-	-	-	-	23,85 (+8,66%)	-	-	-
	0,75	14,43	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,80	13,83	-	-	-	-	-	-	-	-
Viera (2003)	0,40	32,94	-	-	-	-	34,77 (+5,56%)	-	-	35,87 (+8,90%)
	0,60	22,17	-	-	-	-	23,14 (+4,38%)	-	-	24,58 (+10,87%)
	0,80	14,86	-	-	-	-	14,49 (-2,49%)	-	-	10,19 (-31,43%)
Lovato (2007) ^a	0,50	32,35	-	-	-	-	-	-	-	19,11 (-40,93%)
	0,60	-	-	-	-	-	18,22	-	-	-
	0,70	19,88	-	-	-	-	-	-	-	13,21 (-33,55%)
Carneiro (2011)	0,54	37,70	-	35,90 (-4,78%)	-	-	-	-	-	-

continua

continuação

Autores	a/c	Resistência à compressão (MPa) aos 28 dias								
Substituição (%) Agregado graúdo	-	0	20	25	30	40	50	60	75	100
Medina <i>et al.</i> (2014) ^b g	0,65	45,11	-	43,77 (- 2,97%)	-	-	37,59 (- 16,67%)	-	-	-
	0,65	45,11	-	38,31 (- 15,07%)	-	-	36,79 (- 18,44%)	-	-	-
	0,60	54,63	-	-	-	-	41,03 (- 24,90%)	-	-	-
	0,60	54,63	-	-	-	-	40,05 (- 26,69%)	-	-	-
López-Uceda <i>et al.</i> (2016a) ^{f b d}	0,65	24,36	19,99 (- 17,94%)	-	-	17,22 (- 29,31%)	-	-	-	17,22 (- 29,31%)
	0,65	20,18	19,01 (- 5,80%)	-	-	18,04 (- 10,61%)	-	-	-	18,43 (- 20,18%)
	0,65	29,06	27,47 (- 5,47%)	-	-	25,28 (- 13,01%)	-	-	-	23,18 (- 20,23%)
	0,65	25,03	24,06 (- 3,88%)	-	-	22,89 (- 8,55%)	-	-	-	22,70 (- 9,31%)
López-Uceda <i>et al.</i> (2016b) ^b	0,65	15,12	14,70 (- 2,78%)	-	-	14,78 (- 2,25%)	-	-	-	12,77 (- 15,54%)
Silva; Andrade (2017)	0,40	40,00	-	-	-	-	36,50 (- 8,75%)	-	-	29,00 (- 27,50%)
	0,50	26,25	-	-	-	-	23,50 (- 10,48%)	-	-	21,00 (- 20,00%)
	0,60	21,00	-	-	-	-	16,00 (-23,81%)	-	-	14,00 (- 33,33%)
Cantero <i>et al.</i> (2020) ^d	0,57	41,52	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,68	-	-	-	-	-	27,65	-	-	-

continuação

Autores	a/c	Resistência à compressão (MPa) aos 28 dias								
Substituição (%) Agregado graúdo	-	0	20	25	30	40	50	60	75	100
Silva <i>et al.</i> (2022)	0,40	40,00	-	37,00 (- 7,50%)	-	-	33,50 (- 16,25%)	-	31,50 (- 21,25%)	28,50 (- 28,75%)
	0,50	34,00	-	31,50 (- 7,35%)	-	-	28,50 (- 16,18%)	-	25,00 (- 26,47%)	22,50 (- 33,82%)
	0,60	28,00	-	25,50 (- 8,93%)	-	-	23,00 (- 17,86%)	-	19,50 (- 30,36%)	17,00 (- 39,29%)
Oliveira (2023b)	0,55	27,36	22,14 (- 19,08%)	-	-	19,73 (- 27,89%)	-	-	-	-
Oliveira (2023c)	0,45	46,00	36,60 (- 20,44%)	-	42,70 (- 7,17%)	-	-	-	-	-
	0,55	37,60	27,30 (- 27,39%)	-	33,10 (- 11,97%)	-	-	-	-	-
	0,65	28,10	20,80 (- 25,98%)	-	24,50 (- 12,81%)	-	-	-	-	-
Nesa <i>et al.</i> (2024) ^b	0,45	-	-	-	-	18,98	-	-	-	-
Silva <i>et al.</i> (2024)	0,45	55,00	33,20 (- 39,64%)	-	-	-	27,70 (- 49,64%)	-	-	-
Uchoa <i>et al.</i> (2024)	0,45	55,00	33,20 (- 39,64%)	-	-	-	27,70 (- 49,64%)	-	-	-
Rosales <i>et al.</i> (2025) ^d	0,41	47,53	-	-	-	-	45,11 (- 5,09%)	-	-	-
Vintimilla; Etxeberria (2025) ^b	0,48	54,01	51,74 (- 4,20%)	-	52,50 (- 2,80%)	-	48,22 (- 10,72%)	-	-	38,39 (- 28,92%)
	0,52	45,28	40,99 (- 9,47%)	-	40,32 (- 10,95%)	-	39,48 (- 12,81%)	-	-	39,31 (- 13,19%)

Conclusão

Autores	a/c	Resistência à compressão (MPa) aos 28 dias								
Substituição (%) Agregado graúdo	-	0	20	25	30	40	50	60	75	100
Quantidade de Dados	55	44	14	8	6	7	23	1	3	32
Mínimo	0,30	13,83	14,70	25,50	24,50	14,78	14,49	29,74	19,50	10,19
Máximo	0,80	68,80	51,74	43,77	52,50	25,28	48,22	29,74	31,50	39,31
Amplitude	0,50	54,97	37,04	18,27	28,00	10,50	33,73	0,00	12,00	29,12
<p>^a Referente a média dos resultados dos concretos.</p> <p>^b Devido aos corpos de prova serem cúbicos, para método de comparação, multiplicou-se por 0,84 para ter o resultado em corpos de prova cilíndricos 10x20 (Tran; Graubner, 2018).</p> <p>^c Devido ao uso de aditivo, a relação a/c aumentou.</p> <p>^d Devido aos corpos de prova serem cilíndricos 15x30, para método de comparação, multiplicou-se por 0,97 para ter o resultado em corpos de prova cilíndricos 10x20 (Tran; Graubner, 2018).</p> <p>^e A segunda mistura do autor utilizou um ARM_m com 6% de material pulverulento.</p> <p>^f O autor utilizou dois consumos de cimento diferentes, além de fazer espécimes de corpos de prova cilíndricos 15x30 e cúbicos 15x15x15.</p> <p>^g Com e sem aditivo, com partículas flutuantes e sem.</p> <p>^h Os autores utilizaram agregados com 30 e com 60% de material cerâmico.</p> <p>Observação: Os símbolos “+” e “-” significam o aumento ou a diminuição da resistência à compressão do concreto com ARM_g em comparação ao concreto convencional, sendo ambos do respectivo autor mostrado na linha em que é apresentado esse resultado.</p>										

Fonte: Autor, 2025

Ao examinar o Quadro 14, que compila dados de concretos no estado endurecido na literatura acadêmica, é evidente que os resultados de resistência à compressão são satisfatórios em várias taxas de substituição de AN_g para ARM_g . Isso resulta em valores de resistência excedendo 20 MPa, alinhando-se com as diretrizes da NBR 6118 (2023) e, consequentemente, estes agregados são considerados adequados para aplicações estruturais. Dentre as taxas de substituição mostradas, as de 20% e 25% demonstraram resultados de resistência à compressão mais próximos dos concretos convencionais. Todavia, o abatimento é afetado e vê-se a necessidade do uso de aditivos para compensá-lo nesses concretos.

5 METODOLOGIA

O presente trabalho se caracteriza como uma pesquisa experimental, sendo essa, por definição, projetada para avaliar hipóteses relacionadas às crenças do cientista, empregando grupos controlados, amostragem aleatória e manipulação de variáveis (Lazar; Feng; Hochheiser, 2010). Esse tipo de pesquisa busca derivar generalizações por meio de metodologias de amostragem específicas executadas ao longo do estudo (Rodrigues Junior, 2024). Visto isso, uma parte do presente trabalho foi desenvolvida no laboratório e outro foi desenvolvida em campo.

Quanto a parte desenvolvida no campo, escolheu-se a cidade de São Miguel dos Milagres, no estado de Alagoas. A escolha se deu pelo fato de essa cidade estar em pleno desenvolvimento, com novas construções em andamento. Além disso, havia acesso a um canteiro de obra localizado próximo ao mar, garantindo segurança quanto ao risco de furto dos corpos de prova, e a caracterização de um ambiente com condições climáticas específicas. Assim, seria possível testar o desempenho do concreto em um ambiente controlado (laboratório) e em um ambiente agressivo ao concreto (campo).

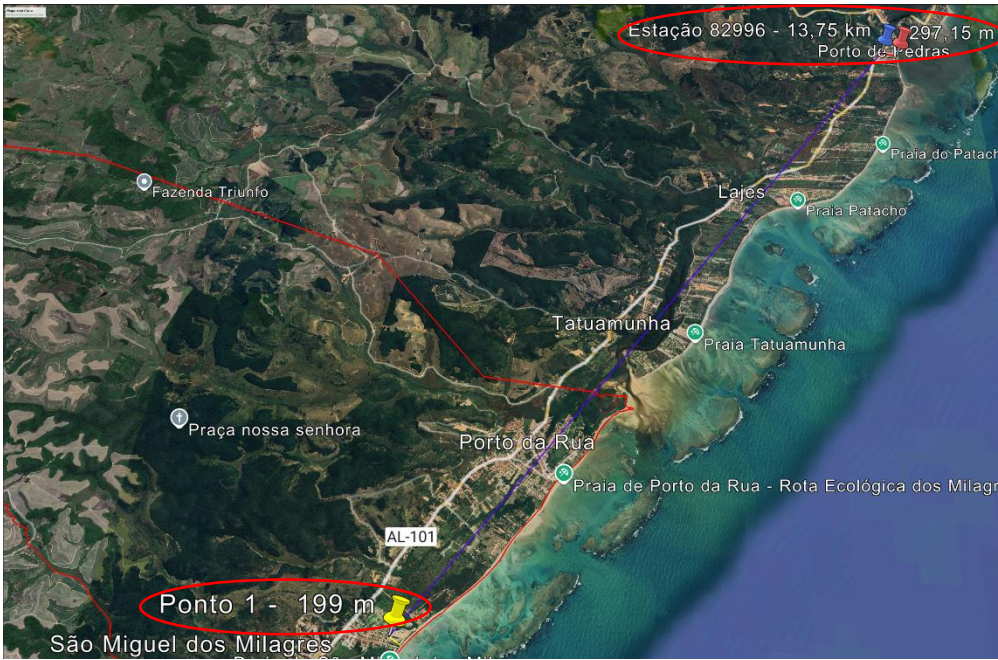
O canteiro de obras estava localizado a 199 m de distância da costa e 13,75 km de distância da estação meteorológica convencional 82996 – sendo essa a estação mais próxima da cidade e, devido a isso, foi utilizada para averiguação da temperatura e da umidade relativa no período de exposição no local. O detalhamento do ponto e da estação quanto ao endereço, latitude, longitude, coordenadas e distância para a costa é descrito no Quadro 15, sendo esses dados obtidos por meio do aplicativo GPS Tools® – Apps no Google Play e por meio do INMET (2010) como auxílio do programa Google Earth Pro, respectivamente. O ponto de análise pode ser visualizado no mapa da Figura 9. A localização da estação meteorológica foi retirada do mapa de estações do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), sendo esse mostrado na Figura 10 (INMET, 2025).

Quadro 15 – Detalhamento do ponto onde foi alocado os corpos de prova de concreto

Pontos de análise	Endereço aproximado	Latitude	Longitude	Coordenadas	Distância para a costa (m)
1	Proximidades da Rua Prefeito Augusto de Barros falcão, São Miguel dos Milagres, Alagoas - 57940-000, Brasil.	- 926.543.237	- 3.536.658.521	9°15'55.556" S 35°22'0.011" O	199
Estação meteorológica convencional "82996 - Porto de Pedras - AL "	Proximidades da Rua Doutor Sebastião da Hora, Porto de Pedras, Alagoas - 57945-000, Brasil.	- 918.000.000	- 3.543.000.000	9° 9'38.74"S 35°17'43.98"O	297,15

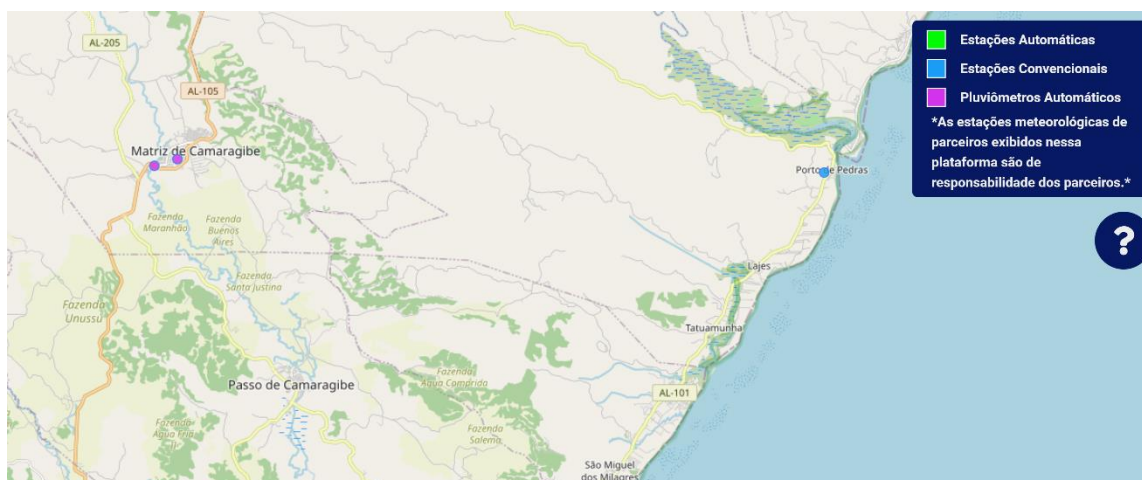
Fonte: Autor, 2025

Figura 9 – Localização dos pontos de análise



Fonte: Google Earth Pro, 2025

Figura 10 – Mapa de estações

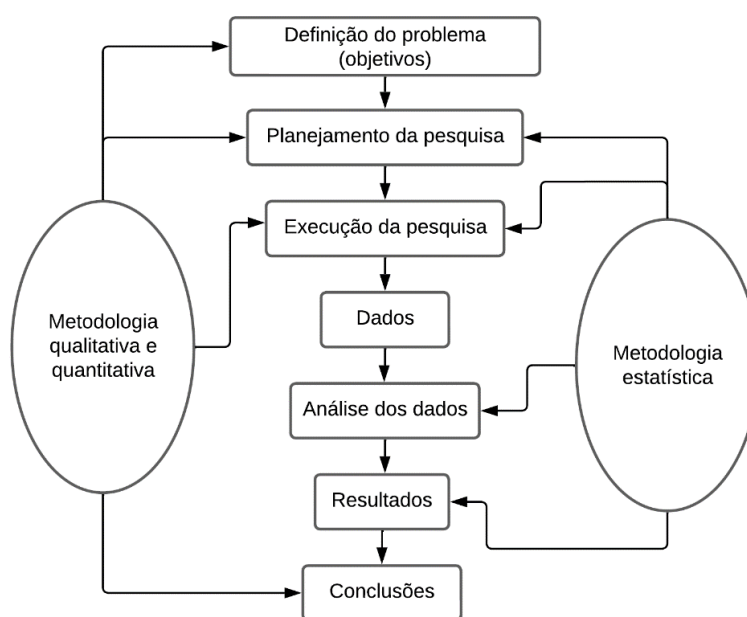


Fonte: INMET, 2025

De acordo com os objetivos propostos no presente estudo, foi elaborado e desenvolvido um planejamento experimental, estabelecendo-se os fatores de controle, as variáveis de análise, os materiais utilizados e suas caracterizações e os métodos de ensaio. Esse planejamento foi pensado considerando a disponibilidade dos recursos e seguindo um cronograma de execução.

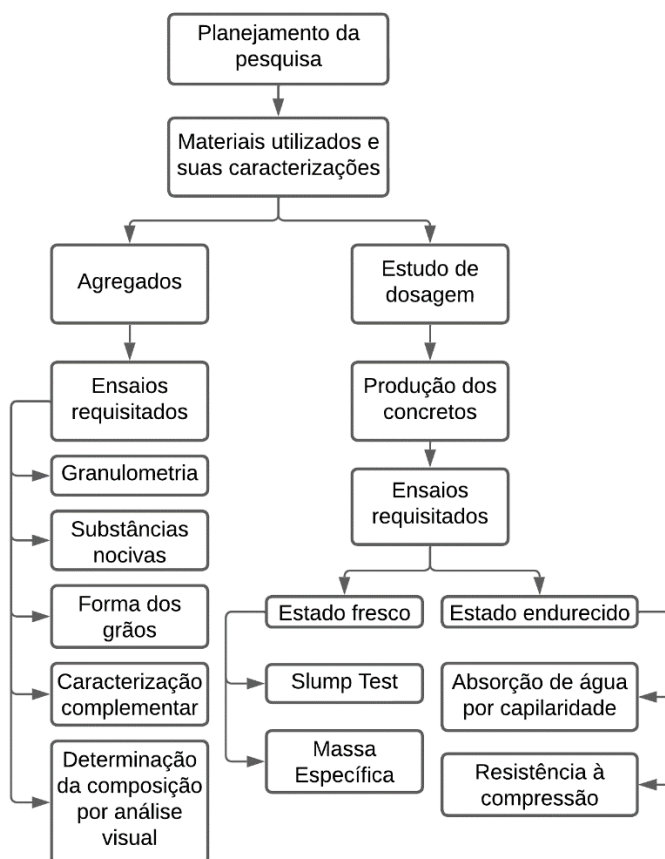
A Figura 11 demonstra as fases do método estatístico desta pesquisa e a Figura 12 demonstra as fases da execução da metodologia qualitativa e quantitativa. Nas duas figuras são estabelecidas as variáveis presentes em cada etapa.

Figura 11 – Fluxograma das fases do método estatístico da pesquisa



Fonte: Adaptado de Montgomery, 2020

Figura 12 – Fluxograma da metodologia qualitativa e quantitativa da pesquisa



Fonte: Autor, 2025

5.1 Planejamento de experimentos

Em concordância com Montgomery (2020), 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 n^k , onde “n” representa o número de níveis e “k” o número de fatores. A execução desse planejamento possibilitou a realização de análises estatísticas com maior significância.

5.1.1 Fatores de controle

Os fatores de controle foram planejados para o estado endurecido do concreto e estão descritos a seguir.

a) Tipos de concreto x idade do concreto

O ensaio realizado nessa categoria de fatores foi o ensaio de resistência à compressão.

Os fatores analisados para o ensaio comentado anteriormente são: tipos de concreto e idade do concreto. O fator “tipo de concreto” tem 6 níveis para todos os ensaios, sendo descritos no Quadro 16. E por fim, o fator “idade do concreto” tem 2 níveis, sendo 7 dias e 28 dias.

Quadro 16 – Fator tipos de concreto

Sigla	Detalhamento
FC	concreto convencional (CV)
FC2	CV + metacaulim (MK)
FC3	20% de Agregado Reciclado Misto Graúdo (ARM _g)
FC4	20% de ARM _g + 20% de MK
FC5	50% de ARM _g
FC6	50% de ARM _g + 20% de MK

Fonte: Autor, 2024

Quanto a variável resposta “ensaio de resistência à compressão”, utilizando a fórmula do planejamento fatorial n^k , é observado 1 fator com 6 níveis e 1 fatores com 2 níveis, além da consideração de 3 réplicas, portanto ao menos 36 espécimes foram necessários para realização das análises estatísticas, conforme o cálculo a seguir:

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

Na realização dos experimentos para o ensaio de resistência à compressão, as amostras foram colocadas no canteiro de obra, sendo 6 espécimes por tipo de concreto (3 amostras por data x 2 datas) multiplicado por 3 concretos, o que totaliza 36 espécimes. O Quadro 17 mostra o programa fatorial para o ensaio de resistência à compressão por ponto.

Quadro 17 – Programa fatorial para o ensaio de resistência à compressão no campo (canteiro de obras)

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

Fonte: Autor, 2025

b) Cura úmida x cura ao ar, cura ao ar em campo x cura ao ar em laboratório

Para comparação dos resultados que foram obtidos em campo foi necessário executar ensaios no laboratório. Devido à impossibilidade de executar a cura úmida em campo, a cura ao ar foi a utilizada, entretanto, foi necessário fazer ensaios no laboratório também utilizando a cura ao ar para poder haver uma comparação sobre os resultados. Entretanto, a cura ao ar não é tão utilizada em outros estudos em comparação com a cura úmida, portanto, para ampliar o entendimento das possíveis diferenças sobre a cura ao ar e a cura úmida nos resultados do presente estudo, foi necessário realizar um programa fatorial para esses ensaios em laboratório.

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

Os fatores analisados para estes ensaios comentados foram: tipos de concreto, tipos de curas e idades do concreto.

O fator “tipo de concreto” tem 6 níveis para todos os ensaios, os quais são mostrados no Quadro 16. O fator “tipos de curas” tem 2 níveis em todos os ensaios, sendo cura ao ar e cura úmida. Por fim, o fator “idades do concreto” tem 2 níveis para o ensaio de resistência à compressão, sendo 7 dias e 28 dias, e tem 1 nível para o ensaio de determinação da absorção de água por capilaridade, sendo 28 dias.

Quanto a variável resposta “ensaio de resistência à compressão”, utilizando a fórmula do planejamento fatorial n^k , é observado 1 fator com 6 níveis e 2 fatores com 2 níveis, além da consideração de 3 réplicas, portanto ao menos 72 espécimes são necessários para realização das análises estatísticas, conforme o cálculo a seguir:

$$\text{Tamanho da amostra} = 6^1 \cdot 2^2 \cdot 3 = 72 \text{ unidades}$$

Quanto a variável resposta “ensaio de determinação da absorção de água por capilaridade”, utilizando a fórmula do planejamento fatorial n^k , é observado 1 fator com 6 níveis e 1 fator com 2 níveis, além da consideração de 3 réplicas, portanto ao menos 36 espécimes são necessários para realização das análises estatísticas, conforme o cálculo a seguir:

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

O Quadro 18 mostra o programa fatorial para o ensaio de resistência à compressão.

Quadro 18 – Programa fatorial para o ensaio de resistência à compressão no laboratório

Tipos de concreto	Níveis de estudo					
	Tipos de Cura					
	Cura ao ar			Cura úmida		
	Quantidade de espécimes por idade		Total de espécimes por ponto	Quantidade de espécimes por idade		Total de espécimes por ponto
	7 dias	28 dias		7 dias	28 dias	
FC	3	3	36	3	3	36
FC2	3	3		3	3	
FC3	3	3		3	3	
FC4	3	3		3	3	
FC5	3	3		3	3	
FC6	3	3		3	3	

Fonte: Autor, 2024

O Quadro 19 mostra o programa fatorial para o ensaio de determinação da absorção de água por capilaridade.

Quadro 19 – Programa fatorial para o ensaio de determinação da absorção de água por capilaridade

Tipos de concreto	Níveis de estudo			
	Tipo de cura			
	Cura ao ar		Cura úmida	
	Quantidade de espécimes	Total de espécimes por ponto	Quantidade de espécimes	Total de espécimes por ponto
	aos 28 dias		aos 28 dias	
FC	3	18	3	18
FC2	3		3	
FC3	3		3	
FC4	3		3	
FC5	3		3	
FC6	3		3	

Fonte: Autor, 2024

5.1.2 Variáveis de análise

No estado fresco foram obtidos o abatimento do concreto através da norma NBR 16889 (ABNT, 2020b) e a massa específica aparente através da norma NBR 9833 (ABNT, 2009a).

No estado endurecido do concreto foram obtidos a resistência à compressão aos 7 e 28 dias através da norma NBR 5739 (ABNT, 2018a) e a porcentagem de absorção de água por capilaridade aos 28 dias através da norma NBR 9779 (ABNT, 2013).

5.2 Materiais utilizados e suas caracterizações

Os materiais utilizados estavam presentes no laboratório de estruturas e materiais (LEMA) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL).

5.2.1 Cimento CP V – ARI

Em conformidade com a NBR 16697 (ABNT, 2018b), o cimento CP V – ARI utilizado tem sua análise químicas mostrada na Tabela 1, suas propriedades físicas e mecânicas mostradas na Tabela 2 e, sua resistência à compressão na Tabela 3.

Tabela 1 – Análise química do cimento utilizado

Ensaio	Período	12/04/2023	02/05/2023	Limites NBR 16697 (ABNT, 2018b)
		28/04/2023	31/05/2023	
PF 950°C	NBR NM 18 (ABNT, 2012)	5,09	4,81	≤ 6,5
SO ₃	NBR 14656 (ABNT, 2001)	4	4,15	≤ 4,5
CaO		60,4	60,3	-
MgO		2,47	2,67	-

Fonte: Adaptada de CSN Cimentos, 2023

Tabela 2 – Propriedades físicas e mecânicas do cimento utilizado

Ensaio	Período	12/04/2023	02/05/2023	Limites NBR 16697 (ABNT, 2018b)
		28/04/2023	31/05/2023	
Blaine (cm²/g)	NBR NM 76 (ABNT, 1998)	4817	4859	-
# 200 (%)	NBR 11579 (ABNT, 2012)	3,8	3,6	≤ 6
Início de pega (min)	NBR NM 65 (ABNT, 2003)	150	141	≥ 60
Água de Consistência (%)	NBR NM 43 (ABNT, 2003)	29,6	30,1	-
Massa Específica (kg/m³)	NBR NM 23 (ABNT, 2001)	3040		-
Massa Unitária (kg/m³)		1070		-

Fonte: Adaptada de CSN Cimentos, 2023

Tabela 3 – Resistência à compressão do cimento utilizado

Ensaio	Período	12/04/2023	02/05/2023	Limites NBR 16697 (ABNT, 2018b)
		28/04/2023	31/05/2023	
Resis. Comp. 1 D	NBR 7215 (ABNT, 2019)	24,8	25,1	≥ 14,00
Resis. Comp. 3 D	NBR 7215 (ABNT, 2019)	35,5	35	≥ 24,00
Resis. Comp. 7 D	NBR 7215 (ABNT, 2019)	40,1	40	≥ 34,00
Resis. Comp. 28 D	NBR 7215 (ABNT, 2019)	48,6	48,7	-

Fonte: Adaptada de CSN Cimentos, 2023

5.2.2 Metacaulim HP ULTRA

Devido ao fato de a adição de metacaulim aumentar a resistência à compressão do concreto, foi delimitado 20% de substituição de cimento por

metacaulim, seguindo a recomendação da literatura (Siddique; Klaus, 2009; Antoni *et al.*, 2012; Guneyisi *et al.*, 2012). Em conformidade com a NBR 15894-1 (ABNT, 2010c), o Metacaulim HP-ULTRA tem sua ficha técnica mostrada na Tabela 4.

Tabela 4 – Ficha técnica do metacaulim utilizado

Coloração	Creme claro	
Propriedades Físico-Químicas	Valores típicos	Valores limites NBR 15894-1 (ABNT, 2010c)
SiO ₂	57%	44% a 65%
Al ₂ O ₃	34%	32% a 46%
CaO + MgO	< 0,1%	< 1,5%
SO ₃	< 0,1%	< 1,0%
Na ₂ O	< 0,1%	< 0,5%
Eq.Alcalino Na ₂ O	< 1,5%	< 1,5%
Fe ₂ O ₃	2%	-
TiO ₂	1,50%	-
Umidade	0,50%	< 2,0%
Perda ao Fogo	3%	< 4%
Resíduo #325	6%	< 10%
Desempenho com Cimento (7 dias)	115%	> 105%
Atividade Pozolânica Chapelle	880 mg Ca(OH) ₂ /g	> 750 mg Ca(OH) ₂ /g
Área Específica BET	230000 cm ² /g	> 150000 cm ² /g
Massa Específica	2560 kg/m ³	-

Fonte: Adaptado de Metacaulim do Brasil (2023)

5.2.3 Agregados Naturais (AN)

O agregado natural miúdo (AN_m) utilizado nesta pesquisa foi uma areia natural grossa, sendo essa proveniente de uma jazida no estado de Alagoas.

O agregado natural graúdo (AN_g) utilizado nesta pesquisa foi proveniente de uma jazida no estado de Alagoas.

5.2.4 Agregado Reciclado Misto Graúdo (ARM_g)

Os agregados reciclados mistos graúdos (ARM_g) utilizados são provenientes de resíduos de construção e demolição da cidade de Maceió, do estado de Alagoas. As amostras foram reduzidas para dimensão máxima de 25 mm no canteiro de obras,

sem tratamento prévio, e foram separadas no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEMA).

Após a separação das amostras de ARM_g, foi utilizado o método Chevron (Chaves, 2012) para realização de pilhas, com objetivo de homogeneizar as mesmas e retirar amostras representativas do lote.

Em seguida ocorreu o quarteamento em conformidade com a norma NBR 16915 (ABNT, 2021c) e utilizando o quarteador tipo Jones, para a separação das amostras destinadas aos ensaios de caracterização desses agregados.

5.2.5 Ensaios de caracterização dos agregados

As normas utilizadas na execução dos ensaios de todos os tipos de agregados utilizados na pesquisa estão descritas no Quadro 20.

Quadro 20 – Normas utilizadas

Ensaio	Normas		
	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo	Agregado Reciclado Graúdo
Granulometria	NBR 17054 (ABNT, 2022e)		
Teor de argila e materiais friáveis	NBR 7218 (ABNT, 2010a)	-	NBR 7218 (ABNT, 2010a)
Material pulverulento	NBR 16973 (ABNT, 2021g)	-	NBR 16973 (ABNT, 2021g)
Absorção de água	NBR 16916 (ABNT, 2021d)	NBR 16917 (ABNT, 2021e)	
Massa específica	NBR 16916 (ABNT, 2021d)	NBR 16917 (ABNT, 2021e)	
Massa unitária	NBR 16972 (ABNT, 2021f)		
Forma dos grãos	-		NBR 7809 (ABNT, 2019), NBR 5564 (ABNT, 2021a)
Resistência ao impacto e à abrasão <i>Los Angeles</i>	-	-	NBR 16974 (ABNT, 2022d)
Determinação da composição por análise visual	-	-	NBR 15116 (ABNT, 2021b)

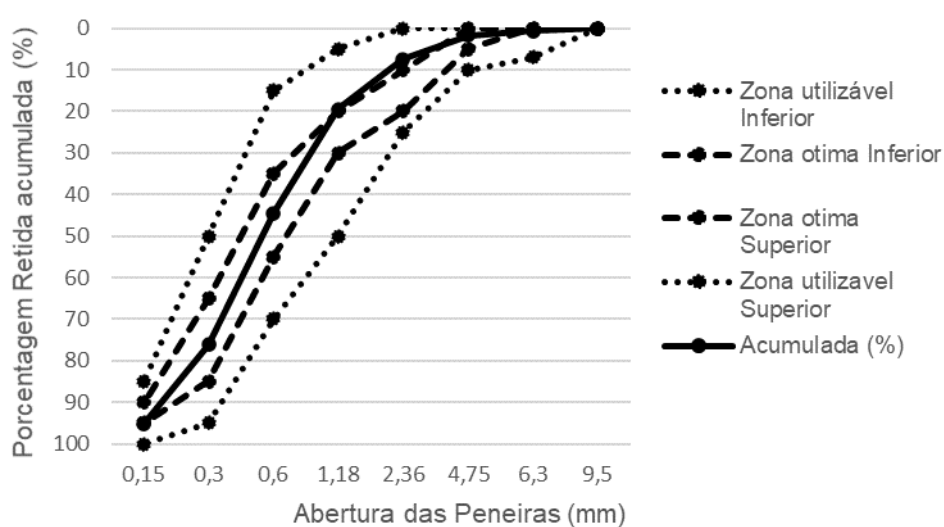
Fonte: Autor, 2025

5.2.6 Agregado Natural Miúdo (AN_m)

a) Granulometria

A distribuição granulométrica do AN_m esteve dentro dos limites da zona ótima, como mostrado na Figura 13, onde somente um ponto ficou fora da zona, sendo esse situado na peneira de 2,36 mm. O módulo de finura do agregado é 2,45 e diâmetro máximo é 4,75 mm.

Figura 13 – Distribuição granulométrica do agregado natural miúdo



b) Massa específica e absorção de água

A Tabela 5 mostra os resultados quanto ao ensaio de massa específica e absorção de água, onde o limite de 0,02 g/cm³ de diferença entre os resultados de massa específica e 0,2% de diferença entre os resultados de absorção, requisitados por norma, foram obedecidos.

Tabela 5 – Dados e resultados do ensaio de massa específica e absorção de água do agregado

Amostras	Volume de água (cm³)	Densidade na condição seca (g/cm³)	Densidade na condição saturada superfície seca (g/cm³)	Absorção de água (%)
1	302,26	2,52	2,53	0,5
2	301,05	2,5	2,51	0,7
Média	301,65	2,51	2,52	0,6
Desvio padrão	0,6	0,01	0,01	0,1
CV (%)	0,2	0,4	0,3	15,68

Fonte: Autor, 2024

c) Massa unitária

A Tabela 6 mostra os resultados de massa unitária quanto ao estado compactado e ao estado solto do agregado natural miúdo.

Tabela 6 – Resultados dos ensaios de massa unitária do agregado natural miúdo

Determinações	MÉTODO A		MÉTODO C	
	Massa unitária (kg/m³)	Massa unitária (kg/m³) com aproximação de 10 kg/m³	Massa unitária (kg/m³)	Massa unitária (kg/m³) com aproximação de 10 kg/m³
1	1611	1620	1490	1490
2	1611	1620	1490	1490
3	1611	1620	1503	1510
4	1597	1600	1496	1500
Média	1607	1620	1495	1500
Desvio padrão	6,74	10	6,45	9,57
CV (%)	0,42	0,62	0,43	0,64

Fonte: Autor, 2024

d) Teor de material pulverulento e teor de argila

A Tabela 7 e a Tabela 8 mostram os resultados de teor de material pulverulento e teor de argila do agregado natural miúdo.

Tabela 7 – Teor de material pulverulento do agregado natural miúdo

Amostras	Massa à temperatura ambiente (g)	Massa final da amostra após lavagem e secagem (g)	Material Pulverulento (%)
1	500	486,20	2,76
2	500	487,00	2,60
3	500	489,90	2,02
Média	500	486,60	2,68
Desvio padrão	0	1,59	0,32
CV (%)	0	0,33	11,86

Fonte: Autor, 2024

Tabela 8 – Teor de argila do agregado natural miúdo

Amostras	Massa inicial (g)	Massa do material retido (g)	Teor de argila (%)
1	540	520,0	3,7
2	540	535,0	0,9
3	540	530,0	1,9
Média	540	528,3	2,2
Desvio padrão	0	6,2	1,2
CV (%)	0	1,2	53,5

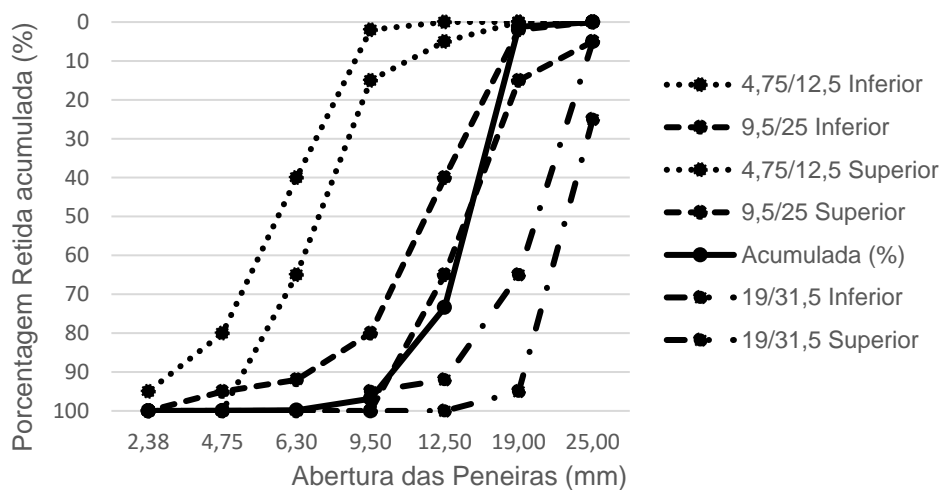
Fonte: Autor, 2024

5.2.7 Agregado Natural Graúdo (AN_g)

a) Granulometria

A distribuição granulométrica do AN_g tem 1 ponto na zona 4,75/12,5 superior, 1 ponto na zona 9,5/25 inferior e 3 pontos na zona 9,5/25 superior. Todas as zonas são mostradas na Figura 14. O módulo de finura do agregado é 4,71 e diâmetro máximo é 19 mm.

Figura 14 – Distribuição granulométrica do agregado natural graúdo



Fonte: Autor, 2023

a) Massa específica e absorção de água

A Tabela 9 mostra os resultados quanto ao ensaio de massa específica e absorção de água, onde a amostra 2 foi desconsiderada devido à discrepância, quanto aos resultados de absorção de água, em relação às outras amostras. O limite de $0,02 \text{ g/cm}^3$ de diferença entre os resultados de massa específica e $0,2\%$ de diferença entre os resultados de absorção, requisitados por norma, foram obedecidos entre as amostras 1 e 3.

Tabela 9 – Dados e resultados do ensaio de massa específica e de absorção de água do agregado

Amostras	Densidade na condição seca (g/cm^3)	Densidade na condição saturada superfície seca (g/cm^3)	Absorção de água (%)
1	2,67	2,68	0,3
2	2,65	2,67	1
3	2,67	2,68	0,4
Média dos dois resultados mais próximos	2,67	2,68	0,3

Fonte: Autor, 2023

b) Massa unitária

A Tabela 10 mostra os resultados de massa unitária quanto ao estado compactado e ao estado solto do agregado natural graúdo.

Tabela 10 – Resultados dos ensaios de massa unitária do agregado natural graúdo

Determinações	MÉTODO A		MÉTODO C	
	Massa unitária (kg/m ³)	Massa unitária (kg/m ³) com aproximação de 10 kg/m ³	Massa unitária (kg/m ³)	Massa unitária (kg/m ³) com aproximação de 10 kg/m ³
1	1530	1530	1409	1410
2	1523	1530	1442	1450
3	1523	1530	1449	1450
4	1510	1510	1469	1470
Média	1522	1530	1442	1450
Desvio padrão	8,48	10	25,22	25,17
CV (%)	0,56	0,65	1,75	1,74

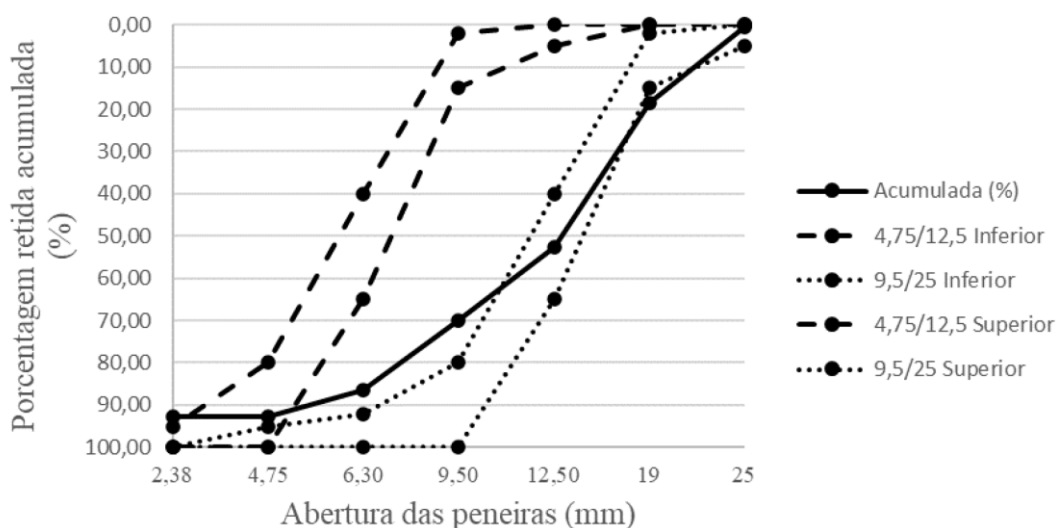
Fonte: Autor, 2024

5.2.8 Agregado Reciclado Misto Graúdo (ARM_g)

a) Granulometria

Atendendo aos limites de distribuição do agregado graúdo propostos pela norma NBR 7211 (ABNT, 2022a), foi elaborado o gráfico da Figura 15, que mostra que a granulometria do ARM_g chegou até uma abertura de 9,5 mm, presente entre a zona de transição de 4,75/12,5 a 9,25/25 e tendo uma abertura superior dentro da zona 9,25/25.

Figura 15 – Distribuição granulométrica do agregado reciclado misto graúdo



Fonte: Relatório, 2023a

a) Substâncias nocivas

Os resultados quanto ao teor de material pulverulento são mostrados na Tabela 11. O teor de finos das amostras se adequa as recomendações da norma NBR 15116 (ABNT, 2021b).

Tabela 11 – Ensaio do teor de material pulverulento do agregado reciclado misto graúdo

Amostras do Material Pulverulento	Massa (g)
Massa 1 (material inicial)	3773,36
Massa 2 (material inicial)	3768,48
Massa 1 (material seco na estufa)	3623,30
Massa 2 (material seco na estufa)	3599,61
m1 (teor de material pulverulento da amostra 1)	4,00%
m2 (teor de material pulverulento da amostra 2)	4,50%

Fonte: Relatório, 2023a

b) Forma dos grãos

Tomando como base a análise granulométrica, o ensaio de índice de forma foi executado em 5 frações granulométricas, sendo: 4,75 mm, 6,3 mm, 9,5 mm, 12,5 mm e 19 mm. Uma amostra de 10 kg foi submetida a peneiramento para determinar a distribuição das frações comentadas, resultando em uma contagem inicial de 200 grãos para realização do ensaio. Com a utilização do paquímetro foi possível obter as três dimensões dos agregados graúdos (largura, espessura e comprimento). A Tabela

12 detalha o número de grãos para todas as frações granulométricas analisadas, bem como o índice de forma de cada fração e o índice final do agregado.

Tabela 12 – Resumo do ensaio de índice de forma dos grãos pelo método do paquímetro

Frações granulométricas	Número de grãos	Índice de forma das frações	Índice de forma do agregado reciclado misto graúdo
#19	32	2,76	2,72
#12,5	79	2,72	
#9,5	33	2,72	
#6,3	42	2,67	
#4,75	14	2,8	

Fonte: Relatório, 2023a

Baseando-se nos critérios de classificação de forma dos grãos (cúbica, lamelar, alongada e alongada-lamelar) presentes no Anexo A da norma NBR 5564 (ABNT, 2021a), na Tabela 13 é mostrada a classificação dos grãos detalhada conforme as frações granulométricas e os formatos descritos na norma.

Tabela 13 – Resumo da classificação de forma dos grãos

Frações (mm)	Forma dos grãos								Total de grãos
	Cúbica		Lamelar		Alongada		Alongada - Lamelar		
	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%	
19	21	66	10	31	1	3	0	0	32
12,5	48	61	22	28	8	10	1	1	79
9,5	19	58	10	30	4	12	0	0	33
6,3	30	71	5	12	7	17	0	0	42

Fonte: Relatório, 2023a

c) Resistência ao impacto e à abrasão *Los Angeles*

Esse ensaio tem como objetivo a determinação a perda por abrasão que o ARM_g sofre, verificando se seu uso é adequado para concretos estruturais. Foi feito um quarteamento de uma amostra de 20 kg, até chegar aos 5 kg requeridos em norma para dimensão máxima de 25 mm, onde a graduação B foi a que mais se encaixou

nas frações granulométricas do ARM_g. A Tabela 14 mostra os parâmetros de execução do ensaio.

Tabela 14 – Parâmetros do ensaio de resistência ao impacto e à abrasão *Los Angeles*

Dados	
Graduação	B
Massa inicial da amostra	5000 g
Número de rotações do tambor	500
Quantidade de esferas de aço	11

Fonte: Relatório, 2023a

Antes da amostra ser introduzida no tambor de execução do ensaio, foi garantido a separação das classes granulométricas através da peneira quadrada, nos intervalos de #19,0 – 12,5 mm e #12,5 – 9,5 mm, de acordo com os parâmetros normativos da graduação B. Na Tabela 15 são mostrados os resultados de perda de massa por abrasão das duas amostras utilizadas.

Tabela 15 – Dados quanto ao ensaio de resistência ao impacto e à abrasão *Los Angeles*

Massas utilizadas	1ª Amostra	2ª Amostra
Massa (g) da amostra seca nas frações #12,5 mm e #9,5 mm	5000 g	5000 g
Massa (g) da amostra lavada e retida na peneira #1,7 mm após a execução do ensaio	2398,6 g	2290,2 g
Perda de massa por abrasão	52,03%	54,20%

Fonte: Relatório, 2023a

As amostras de ARM_g atingiram uma perda de massa por abrasão de 52,03% e 54,20%, respectivamente, para a amostra 1 e amostra 2. Esses resultados são esperados, já que os agregados reciclados costumam ter menor resistência ao desgaste. Entretanto, essas porcentagens ultrapassam o limite de 50% do índice de desgaste, em massa do ARM_g inicial, recomendado pela norma NBR 7211 (ABNT, 2022a) para uso em concreto estrutural, pois esta norma considera agregados naturais e não há parâmetro normativo específico para agregados reciclados.

d) Massa específica, absorção de água e massa unitária

Os ensaios complementares executados nos ARM_g são os de densidade e absorção de água, e o ensaio de massa unitária, respectivamente fundamentados,

nas normas NBR 16917 (ABNT, 2021e) e NBR 16972 (ABNT, 2021f). Os resultados acerca da massa específica e absorção de água são mostrados na Tabela 16.

Tabela 16 – Dados e resultados obtidos do ensaio de massa específica e de absorção de água

Amostras	Massa saturada (g)	Massa submersa (g)	Massa seca (g)	Densidade na condição seca (g/cm³)	Densidade na condição saturada superfície seca (g/cm³)	Absorção de água (%)
1	8538,3	4580	7616	1,92	2,16	12,1
2	8722	4661	7723	1,9	2,15	12,9
Média	8630,15	4620,5	7669	1,91	2,16	12,5
Desvio Padrão	91,85	40,5	53,35	0,01	0,01	0,4
CV (%)	1,06	0,88	0,7	0,52	0,23	3,2

Fonte: Adaptado de Relatório, 2023a

Quanto ao ensaio de massa unitária nos ARM_g, foram executados o Método A e o Método C da norma, obtendo resultados de massa unitária no estado compactado e no estado solto, respectivamente. Esses resultados são mostrados na Tabela 17 e na Tabela 18.

Tabela 17 – Procedimento de ensaio da massa unitária (Método A)

Amostras	Massa unitária no estado compactado (kg/m³)	Índice de vazios (%)
1	1140	100
2	1170	100
3	1170	100
Média	1160	100
Desvio padrão	14,14	0
CV (%)	1,22	0

Fonte: Adaptado de Relatório, 2023a

Tabela 18 – Procedimento de ensaio da massa unitária (Método C)

Amostras	Massa unitária no estado solto (kg/m³)	Índice de vazios (%)
1	1090	100
2	1100	100
3	1110	100
Média	1100	100
Desvio padrão	8,16	0
CV (%)	0,74	0

Fonte: Adaptado de Relatório, 2023a

e) Ensaio de determinação da composição por análise visual

O Anexo A da norma NBR 15116 (ABNT, 2021b) recomenda a realização da determinação da composição por análise visual dos ARM_g, por meio da qual é possível avaliar a qualidade do ARM_g, através das percentagens entre as massas de fragmentos de seus materiais constituintes e pela massa total de fragmentos. Diante dos requisitos normativos, duas amostras (cujas massas somadas totalizavam 11,6 kg) foram caracterizadas, com a média dos resultados mostrada na Tabela 19.

Tabela 19 – Resumo dos resultados do ensaio de determinação da composição por análise visual

Grupos	Massa (g)	Percentual (%)
G1 (fragmentos de massa de cimento)	4900	42,34
G2 (fragmentos de rocha)	1200	10,34
G3 (fragmentos de cerâmica vermelha)	5200	44,83
G4 (fragmentos de materiais indesejáveis)	300	2,59

Fonte: Relatório, 2023a

A norma NBR 15116 (ABNT, 2021b) não determina limites quanto a G1 e G2, os resultados de G3 classificam as amostras de agregado reciclado como “Classe ARM” (Classe Agregado Reciclado Misto) e por fim, o percentual de de G3 e G4 são superiores ao limite normativo de 40% e de 1%, respectivamente.

5.3 Produção dos concretos

5.3.1 Estudo de dosagem

Para o estudo de dosagem o método escolhido foi o preconizado pela ABCP – Associação Brasileira de Cimento, devido à facilidade para obtenção do concreto convencional e em concordância com diversos trabalhos encontrados na literatura que utilizaram esse mesmo método nas misturas com agregados reciclados (Silva, 2023; Frotte; Núbila, 2015; Frotte *et al.*, 2017; Gomes, 2021; Lima, 2024; Lima *et al.*, 2024a; Uchoa *et al.*, 2024a; Uchoa *et al.*, 2024b; Santos *et al.*, 2024a; Santos *et al.*, 2024b; Silva *et al.*, 2024).

Após a obtenção do traço usando o método da ABCP considerando os agregados convencionais, foram feitas substituições no traço quanto ao agregado reciclado graúdo, com classificação ARM.

O primeiro passo do método ABCP é o cálculo da resistência de dosagem de concreto à compressão (f_{cj}). Para tanto, optou-se por considerar uma resistência característica à compressão (f_{ck}) de 40 MPa, em função da diminuição esperada na resistência à compressão com a inserção dos agregados reciclados (conforme mostrado na revisão bibliográfica), garantindo que fossem obtidos concretos estruturais. Além disso, esse valor de resistência à compressão atende à pior situação em termos de durabilidade, conforme as classes de agressividades ambientais definidas na NBR 6118 (ABNT, 2023), mostradas no Quadro 21 e no Quadro 22, o que é significativo no presente trabalho, já que o concreto será exposto a um ambiente agressivo. Em conformidade com a norma NBR 1655 (ABNT, 2022c), sendo a condição de preparo A, para a qual utiliza-se um desvio padrão de 4 MPa (S_d), foi calculada a resistência de dosagem por meio da Equação (1).

$$\begin{aligned} f_{cj} &= f_{ck} + 1,65 \cdot S_d \\ f_{cj} &= 40 + 1,65 \cdot 4 = 46,6 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 1})$$

Quadro 21 – Classes de agressividade ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana	Pequena
III	Forte	Marinha	Grande
		Industrial	
IV	Muito Forte	Industrial	Elevado
		Respingo de maré	

Fonte: Adaptado da NBR 6118 (ABNT, 2023)

Quadro 22 – Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto

Concreto	Tipo	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV
Relação a/c em massa	CA	≤0,65	≤0,60	≤0,55	≤0,45
	CP	≤0,60	≤0,55	≤0,50	≤0,45
Classe de Concreto ABNT NBR 8953 (2015)	CA	≥C20	≥C25	≥C30	≥C40
	CP	≥C25	≥C30	≥C35	≥C40
CA: Concreto Armado CP: Concreto Protendido					

Fonte: Adaptado da NBR 6118 (ABNT, 2023)

O segundo passo do método de dosagem da ABCP é definir a relação água/cimento. No caso da presente pesquisa, devido às recomendações referentes à classe de agressividade IV, a relação a/c adotada foi de 0,45.

O terceiro passo do método ABCP é a determinação do consumo de água (Ca), onde será considerado um abatimento de tronco de cone na faixa de 80 a 100 mm, para uma dimensão máxima de 19 mm (encontrada no ensaio de granulometria). De acordo com o Quadro 23 do método ABCP, Ca é igual a 205 litros para cada metro cúbico de concreto.

Quadro 23 – Determinação aproximada do consumo de água

Consumo de água aproximada (l/m³ ou kg/m³)					
Abatimento (mm)	Diâmetro máximo do agregado graúdo (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	195	190

Fonte: Adaptado de ABCP ONLINE (2023)

O quarto passo do método ABCP é o cálculo do consumo do cimento, onde divide-se o consumo de água (Ca) pela relação a/c, como mostrado na Equação (2).

$$C_c = \frac{C_a}{a/c} \quad \text{Eq. 2}$$

$$C_c = \frac{205}{0,45} = 455,56 \text{ kg/m}^3$$

O quinto passo do método ABCP é a determinação do consumo de agregado graúdo (Cb), baseado na sua dimensão máxima e no módulo de finura do agregado miúdo. Para os dados dos agregados utilizados no presente trabalho, encontra-se por interpolação, por meio do Quadro 24, um valor de Vb de 0,7051, que corresponde ao volume de agregado graúdo. Com o valor de Vb encontrado, a Equação (3) demonstra como encontrar Cb.

Quadro 24 – Determinação do volume do agregado graúdo (Vb)

MF	Dimensão máxima (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
	(%) de agregado graúdo (Vb)				
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

Fonte: Adaptado de Abcp Online (2023)

$$C_b = V_b \cdot M_u = 0,7051 \cdot 1530 = 1078,80 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{Eq.3})$$

Onde:

V_b = Volume do agregado gráúdo seco por m^3 de concreto;

M_u = Massa unitária compactada do agregado gráúdo.

O sexto passo do método ABCP é a determinação do consumo do agregado miúdo (C_m), cuja obtenção é feita através dos consumos e das massas específicas dos materiais, conforme Equação (5). Entretanto, é necessário calcular primeiro o volume de areia (V_m), como mostrado na Equação (4).

$$V_m = 1 - \left(\frac{C_c}{\gamma_c} + \frac{C_b}{\gamma_b} + \frac{C_a}{\gamma_a} \right) \quad (\text{Eq.4})$$

$$C_m = \gamma_m \cdot V_m \quad (\text{Eq.5})$$

$$V_m = 1 - \left(\frac{455,56}{3040} + \frac{1078,80}{2670} + \frac{205}{997,5} \right) = 0,241 \text{ m}^3$$

$$C_m = 2510 \cdot 0,241 = 603,87 \text{ kg/m}^3$$

Onde:

V_m = volume de areia;

C_c = consumo de cimento;

γ_c = massa específica do cimento;

C_b = consumo de brita;

γ_b = massa específica do agregado gráúdo;

C_a = consumo de água;

γ_a = massa específica da água;

γ_m = massa específica da areia.

O traço em massa é calculado a partir das relações entre os materiais e o cimento, conforme Equação (6).

$$\frac{C_c}{C_c} : \frac{C_m}{C_c} : \frac{C_b}{C_c} : \frac{C_a}{C_c} \quad (\text{Eq.6})$$

$$\frac{455,56}{455,56} : \frac{603,87}{455,56} : \frac{1078,80}{455,56} : \frac{205}{455,56}$$

1:1,33:2,37:0,45

Com o traço encontrado, foi determinado o traço de referência e os demais traços de concreto, os quais estão mostrados a seguir:

- 1:1,33:2,37:0,45 (traço de referência – cimento, areia, brita, a/c);
- 0,8:0,2:1,33:2,37:0,45 (cimento, metacaulim, areia, brita, a/c);
- 1:1,33:1,9:0,47:0,45 (traço 20% de ARM_g – cimento, areia, brita, brita reciclada, a/c);
- 0,8:0,2:1,33:1,9:0,47:0,45 (traço 20% de ARM_g – cimento, metacaulim, areia, brita, brita reciclada, a/c);
- 1:1,33:1,19:1,19:0,45 (traço 50% de ARM_g – cimento, areia, brita, brita reciclada, a/c);
- 0,8:0,2:1,33:1,19:1,19:0,45 (traço 50% de ARM_g – cimento, metacaulim, areia, brita, brita reciclada, a/c).

A partir de um teste inicial de produção, percebeu-se um abatimento reduzido, que é comum em função do uso de ARM_g, sendo ainda mais prejudicada com a adição de metacaulim. Para corrigir isso, foi utilizado aditivo superplastificante em todas as misturas, no teor de 0,4% em massa de cimento e considerando-se o teor de sólidos de 45%. A proporção utilizada dos materiais está demonstrada no Quadro 25.

Quadro 25 – Composição dos concretos (kg/m³)

Legenda	Cimento	AN _m	AN _g	ARM _g	MK	Quantidade de água total	Teor de sólidos do aditivo (%)	Teor de aditivo (%)	Teor de aditivo	Aditivo (água + sólidos) (g)	Desconto de água do aditivo	Quantidade de água da pré-molhagem	Quantidade de água efetiva
FC	455,56	603,87	1078,80	-	-	205,00	0,45	0,40%	0,004	4049,42	2,23	-	202,77
FC2	364,45	603,87	1078,80	-	91,11	205,00	0,45	0,40%	0,004	3239,54	1,78	-	203,22
FC3	455,56	603,87	863,04	215,76	-	205,00	0,45	0,40%	0,004	4049,42	2,23	21,58	202,77
FC4	364,45	603,87	863,04	215,76	91,11	205,00	0,45	0,40%	0,004	3239,54	1,78	21,58	203,22
FC5	455,56	603,87	539,40	539,40	-	205,00	0,45	0,40%	0,004	4049,42	2,23	53,94	202,77
FC6	364,45	603,87	539,40	539,40	91,11	205,00	0,45	0,40%	0,004	3239,54	1,78	53,94	203,22

Fonte: Autor, 2024

5.3.2 Procedimento de mistura

Nas misturas produzidas com ARM, para efeito de mitigação da absorção de água gerada pelo agregado reciclado, foi calculada a água de absorção com objetivo de compensá-la. Portanto, todas as amostras de ARM_g foram submetidas a um procedimento de pré-molhagem, onde foram imersas em água por 15 minutos e, após esse tempo, foram introduzidas na betoneira durante a etapa de inserção do agregado. Na execução do procedimento de pré-molhagem, como mostrado na Figura 16, foi utilizado 80% da água de absorção em função de melhores resultados com o uso desse percentual em outras composições com uso de AR em concretos e argamassas (Lima, 2024; Uchoa *et al.*, 2024a; Uchoa *et al.*, 2024b; Lima *et al.*, 2024a; Silva *et al.*, 2024; Santos *et al.*, 2024a). Esse percentual foi aplicado em relação à massa de ARM_g utilizado na mistura.

Figura 16 – ARM_g após a pré-molhagem



Fonte: Autor, 2024

Os concretos foram produzidos utilizando uma betoneira com capacidade de 150 litros, com eixo inclinado e rotação de tambor de 34 rpm, tendo seu procedimento de mistura baseado no autor Silva (2023), onde:

- Coloca-se 100% do agregado gráudo, natural e/ou reciclado (após o período de pré-molhagem), no misturador parado;

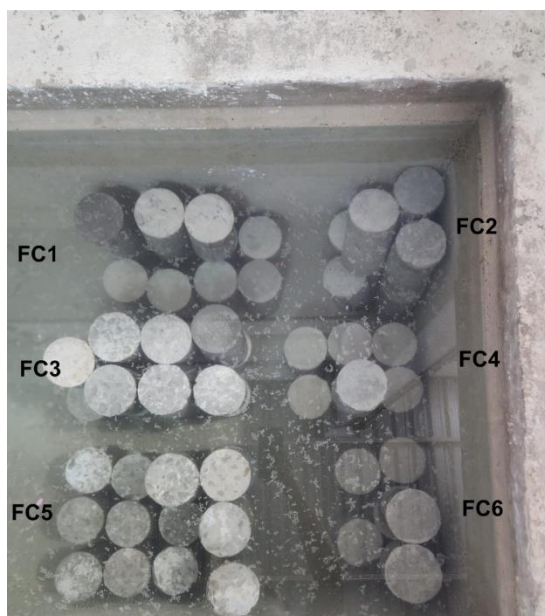
- Adiciona-se 50% da água da mistura, e liga o misturador por 1 minuto;
- Adiciona-se o cimento e/ou metacaulim e inicia a mistura por 2 minutos;
- Coloca-se o agregado miúdo, natural e/ou reciclado;
- Adiciona-se os 50% restante da água de mistura e o aditivo, depois é ligado o misturador por 3 minutos;
- Procede-se com a parada do misturador para limpeza por 2 minuto, com uma colher de pedreiro, removendo o material aderido nas paredes do misturador, caso seja necessário;
- Para finalizar, aciona-se o misturador por mais 1 minuto.

5.4 Cura do concreto

5.4.1 Concretos curados no LEMA

Os concretos foram executados entre fevereiro e março de 2024. Os concretos curados em meio úmido são mostrados na Figura 17, enquanto que os curados ao ar são mostrados na Figura 18.

Figura 17 – Concreto curados em meio úmido



Fonte: Autor, 2024

Figura 18 – Concreto curados ao ar (FC, FC2 e FC4)



Fonte: Autor, 2024

5.4.2 Concretos curados no campo

Os concretos foram executados entre abril e maio de 2024 e expostos na cidade de São Milagres em um ponto a 199 m distância para a costa para serem curados, respectivamente em uma obra (Figura 19). Os corpos de prova, após desmolde (1 dia) do laboratório, foram levados para a cidade em um recipiente adaptado com uso de plástico bolha, como mostrado na Figura 20. Ademais, os corpos de prova de concreto foram colocados em uma estrutura de madeira, para evitar contaminações com o solo.

Figura 19 – Concretos na obra



Fonte: Autor, 2024

Figura 20 – Recipiente adaptado em plástico bolha (esquerda); concreto protegido por plástico bolha (direita)



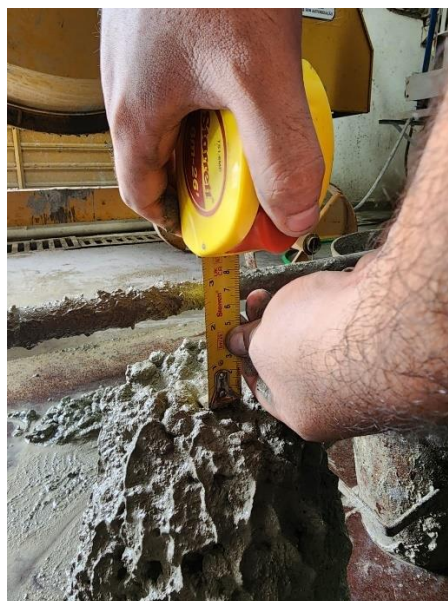
Fonte: Autor, 2024

5.5 Propriedades dos concretos no estado fresco

5.5.1 *Slump test*

O ensaio *Slump test* (consistência pelo abatimento do tronco de cone) é verificado através da NBR 16889 (ABNT, 2020b), como mostrado na Figura 21. O resultado desse ensaio é um parâmetro de medida para o estado fresco do concreto.

Figura 21 – Ensaio de abatimento do tronco de cone



Fonte: Autor, 2024

5.5.2 Massa específica

A massa específica no estado fresco do concreto foi encontrada seguindo as recomendações da NBR 9833 (ABNT, 2009a). As medidas do recipiente de ensaio são: 15 dm³ de volume, 260 mm de diâmetro e 283 mm de altura. Todas as medidas atendem os requisitos normativos.

5.6 Propriedades dos concretos no estado endurecido

5.6.1 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão seguiu as recomendações da norma NBR 5739 (ABNT, 2018a), tendo sua moldagem e adensamento executados conforme as prescrições da norma NBR 5738 (ABNT, 2016). Após o processo de cura dos corpos de prova, eles foram retificados para regularização da superfície e rompidos numa prensa existente no Laboratório de Estruturas e Materiais da UFAL, Figura 22, com capacidade de carga de 200 tf. É importante destacar que o ensaio se deu na máquina universal de ensaio, marca A. J. Amsler, modelo 50SZD223, tipo eletro-hidráulica, ocorreu de forma contínua, ajustado para a velocidade de ensaio, conforme as recomendações normativas, até que a ruptura ocorresse, a qual é indicada por uma queda abrupta da carga aplicada.

Figura 22 – Ensaio de resistência à compressão



Fonte: Autor, 2024

5.6.2 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade, Figura 23, foi executado conforme as instruções e recomendações da norma NBR 9779 (ABNT, 2013).

Figura 23 – Ensaio de absorção de água por capilaridade



Fonte: Autor, 2024

5.7 Análises estatísticas

Para avaliar o impacto do tratamento experimental na propriedade de resistência à compressão foram realizadas análises estatísticas utilizando os dados obtidos com os concretos aos 7 e 28 dias. Para a propriedade de absorção de água por capilaridade, as análises foram feitas aos 28 dias de cura. O objetivo destas análises foi determinar se existem diferenças significativas nos resultados médios entre os traços onde o agregado reciclado misto graúdo é utilizado, em comparação ao traço de referência, ambos com metacaulim. O nível de significância utilizado nas análises para testar a normalidade dos dados foi de 5%. Todas as análises estatísticas foram executadas no software ActionStat.

5.7.1 Teste de normalidade

Com os resultados dos ensaios em mãos, foi realizado o teste de *Shapiro Wilk* para testar se os dados são normais (o que significa utilizar testes de hipóteses

paramétricos para comparações, podendo ser ANOVA (Teste de *Tukey*) ou teste *T* ou não (o que significa utilizar testes de hipóteses não paramétricos para comparações, a exemplo do teste de *Kruskal-Wallis* e do teste U de *Mann-Whitney*). Nesse teste é definido a hipótese nula e alternativa, onde (Shapiro; Wilk, 1965):

- H_0 : Os dados seguem uma distribuição normal;
- H_1 : Os dados não seguem uma distribuição normal;
- Valor $p > \text{Nível de significância}$ = Falhar em rejeitar a hipótese nula;
- Valor $p < \text{Nível de significância}$ = Rejeitar a hipótese nula.

5.7.2 Teste de Homocedasticidade

O teste de Homocedasticidade mais utilizado é o teste de *Bartlett*, sendo esse baseado na comparação entre a média geométrica das variâncias amostras e a média ponderada (Montgomery, 2020). O mesmo autor comenta que esse teste é sensível à normalidade dos dados, portanto, nos casos em que a normalidade dos dados foi rejeitada, o teste de *Levene* foi o utilizado por ser mais adequado. No teste de hipótese de *Bartlett* são definidas as hipóteses nula e alternativa, onde (Montgomery, 2020):

- H_0 : As variâncias são iguais;
- H_1 : Ao menos uma variância é diferente;
- Valor $p > \text{Nível de significância}$ = Falhar em rejeitar a hipótese nula;
- Valor $p < \text{Nível de significância}$ = Rejeitar a hipótese nula.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa seção estão discutidos os resultados no estado fresco e no estado endurecido dos concretos produzidos que foram curados no Laboratório de Materiais da UFAL (LEMA) e que foram curados na cidade São Miguel dos Milagres em Alagoas, os quais estão identificados pelo termo “Obra”, já que ficaram expostos em um canteiro de obras.

Na Tabela 20 e na Tabela 21 são mostradas as datas de moldagem em conjunto com o intervalo de temperatura e de umidade relativa dessas datas. Ao analisar essas tabelas, é visível que existiu diferenças climáticas entre os locais nos períodos de cura analisados (temperaturas máximas diferentes e umidade relativas mínimas diferentes), justificando a realização das análises em ambientes distintos.

Tabela 20 – Estação meteorológica mais próxima do LEMA

Estação meteorológica automática "A303 – Maceió/AL"						
Tipo de concreto		Data de execução	Variação de temperatura (°C)		Umidade (%)	
			Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
FC	Moldagem (9 h)	04/03/2024	-	-	-	-
	7 dias de cura (0d-7d)	11/03/2024	34,2	23,5	100,0	40,0
	28 dias de cura (7d-28d)	01/04/2024	34,7	23,4	100,0	51,0
FC2	Moldagem (8 h)	19/02/2024	-	-	-	-
	7 dias de cura (0d-7d)	26/02/2024	33,2	24,1	100,0	57,0
	28 dias de cura (7d-28d)	18/03/2024	34,9	23,5	100,0	40,0
FC3	Moldagem (9 h)	12/03/2024	-	-	-	-
	7 dias de cura (0d-7d)	19/03/2024	34,7	24,4	100,0	55,0
	28 dias de cura (7d-28d)	09/04/2024	33,2	23,3	100,0	55,0
FC4	Moldagem (9 h)	21/02/2024	-	-	-	-
	7 dias de cura (0d-7d)	28/02/2024	32,7	24,1	100,0	57,0
	28 dias de cura (7d-28d)	20/03/2024	34,9	23,5	100,0	40,0
FC5	Moldagem (10 h)	13/03/2024	-	-	-	-
	7 dias de cura (0d-7d)	20/03/2024	32,9	24,3	100,0	55,0
	28 dias de cura (7d-28d)	10/04/2024	33,2	22,9	100,0	55,0
FC6	Moldagem (10 h)	22/02/2024	-	-	-	-
	7 dias de cura (0d-7d)	29/02/2024	32,7	24,1	100,0	57,0
	28 dias de cura (7d-28d)	21/03/2024	34,9	23,5	100,0	40,0

Fonte: Autor, 2025

Tabela 21 – Estação meteorológica mais próxima do ponto analisado na cidade de São Miguel dos Milagres

Estação meteorológica convencional "82996 - Porto de Pedras - AL "						
Tipo de concreto		Data de execução	Temperatura (°C)		Umidade (%)	
			Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
FC	Moldagem (12 h)*	06/05/2024	-	-	-	-
	7 dias de cura (0d-7d)	13/05/2024	29,3	24,9	100,0	84,0
	28 dias de cura (7d-28d)	03/06/2024	29,1	24,0	99,0	76,0
FC2	Moldagem (14 h)*	29/04/2024	-	-	-	-
	7 dias de cura (0d-7d)	06/05/2024	30,1	25,9	95,0	71,0
	28 dias de cura (7d-28d)	27/05/2024	29,3	24,5	100,0	76,0
FC3	Moldagem (15 h)*	06/05/2024	-	-	-	-
	7 dias de cura (0d-7d)	13/05/2024	29,3	24,9	100,0	84,0
	28 dias de cura (7d-28d)	03/06/2024	29,1	24,0	99,0	76,0
FC4	Moldagem (8 h)*	07/05/2024	-	-	-	-
	7 dias de cura (0d-7d)	14/05/2024	29,3	24,9	100,0	84,0
	28 dias de cura (7d-28d)	04/06/2024	29,1	24,0	99,0	76,0
FC5	Moldagem (7 h)*	07/05/2024	-	-	-	-
	7 dias de cura (0d-7d)	14/05/2024	29,3	24,9	100,0	84,0
	28 dias de cura (7d-28d)	04/06/2024	29,1	24,0	99,0	76,0
FC6	Moldagem (13 h)*	06/05/2024	-	-	-	-
	7 dias de cura (0d-7d)	13/05/2024	29,3	24,9	100,0	84,0
	28 dias de cura (7d-28d)	03/06/2024	29,1	24,0	99,0	76,0

Fonte: Autor, 2025

6.1 Concretos curados no LEMA

6.1.1 Propriedades no estado fresco

As propriedades no estado fresco dos concretos produzidos estão apresentadas na Tabela 22.

Tabela 22 – Propriedades físicas no estado fresco dos concretos produzidos

Misturas	Tipo de concreto	Slump test (cm)	Massa específica (kg/m ³)
FC	Convencional (CV)	22	2499
FC2	CV + metacaulim (MK)	15	2456
FC3	20% de Agregado Reciclado Misto Graúdo (ARM _g)	27	2356
FC4	20% de ARM _g + MK	20	2409
FC5	50% de ARM _g	22	2322
FC6	50% de ARM _g + MK	7	2346

Fonte: Autor, 2025

Em relação às características físicas dos concretos no estado fresco, a análise dos dados derivados do *slump test* revelou que as misturas que incorporaram ARM, sem metacaulim, apresentaram valores de abatimentos próximos ao concreto de referência. Isso pode ser explicado devido à pré-molhagem desses agregados, que diminui o efeito da absorção de água dos ARM e melhora o abatimento. Quanto ao uso de MK, em todas as misturas com a sua presença houve uma diminuição do abatimento, devido ao aumento do teor de finos na mistura (Parande *et al.*, 2008). Essa condição foi agravada quando utilizado o maior percentual de ARM.

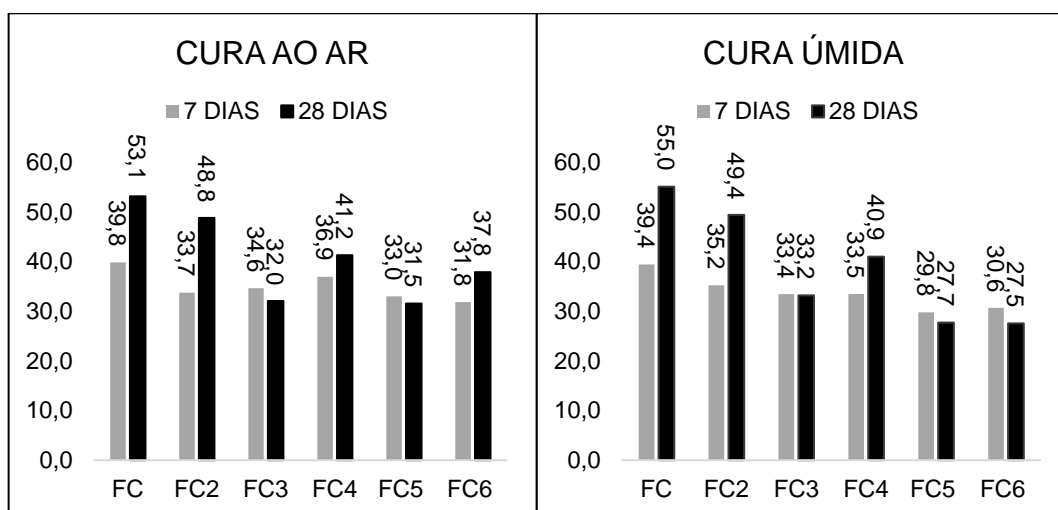
Em termos das massas específicas dos concretos, valores mais baixos foram registrados para concretos formulados com ARM, sendo esses valores consistentes com as propriedades inerentes desses materiais.

6.1.2 Propriedades no estado endurecido

a) Resistência à compressão

A avaliação do desempenho no estado endurecido das misturas de concreto envolveu a medição da resistência à compressão axial em intervalos de 7 e 28 dias, variando o tipo de cura ao ar e cura úmida. Os resultados médios são mostrados graficamente na Figura 24.

Figura 24 – Resultados médios de resistência à compressão em MPa



Fonte: Autor, 2024

Em relação à meta de f_{cj} de 46,6 MPa definida na etapa de dosagem, apenas os concretos convencionais (FC2 e FC) – com e sem MK – atingiram, em ambos os tipos de cura estudados. Mediante a literatura, isso já era esperado já que, devido à

heterogeneidade do ARM, quanto maior o percentual de substituição maior poderá ser a queda de resistência à compressão (Meng *et al.*, 2022; Bazaz; Khayati, 2012; Salles *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2022; Yang; Du; Bao, 2011). Houve ainda resultados fora do esperado, como os concretos com 50% de ARM_g (FC6 e FC5) – com e sem MK – na cura úmida, nos quais ocorreu a redução da resistência à compressão dos 7 para os 28 dias. Destaca-se que todos os concretos ultrapassaram a resistência à compressão de 26,6 MPa aos 28 dias, que corresponde a f_{ck} de 20 MPa, que habilita o concreto para aplicações estruturais.

A mistura FC4 apresentou o melhor resultado quanto ao uso de ARM_g em ambos os tipos de cura, isso pode ser atribuído às características do material adicionado (metacaulim) e às proporções utilizadas de ARM. Esse material pode ter contribuído para melhorar o abatimento, a coesão e a compacidade do concreto, resultando em um desempenho superior em termos de resistência à compressão. O concreto convencional apresentou a maior resistência à compressão em ambos os tipos de cura.

Na Tabela 23 e na Tabela 24 são mostrados os resultados do teste de normalidade *Shapiro-Wilk* referentes aos valores de resistência à compressão nas condições de cura ao ar e cura úmida, respectivamente.

Tabela 23 – Teste de normalidade dos resultados de resistência à compressão (cura ao ar)

Misturas	Resistência à compressão (MPa)			
	Cura ao ar			
	7 dias		28 dias	
	Estatística: <i>Shapiro-Wilk</i>	Valor p	Estatística: <i>Shapiro-Wilk</i>	Valor p
FC	0,8811	0,3275	0,8280	0,1832
FC2	0,9621	0,6258	0,8867	0,3444
FC3	0,7500	< 0,0001	0,9046	0,4003
FC4	0,8040	0,1242	0,9859	0,7729
FC5	0,9465	0,5542	1,0000	1,0000
FC6	0,9845	0,7615	0,9959	0,8777

Fonte: Autor, 2024

Tabela 24 – Teste de normalidade dos resultados de resistência à compressão (cura úmida)

Misturas	Resistência à compressão (MPa)			
	Cura úmida			
	7 dias		28 dias	
	Estatística: <i>Shapiro-Wilk</i>	Valor p	Estatística: <i>Shapiro-Wilk</i>	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: Autor, 2024

Na Tabela 25 e na Tabela 26 são mostrados os resultados do teste de *Levene* para os dados de resistência à compressão aos 7 dias (cura ao ar) e os intervalos de confiança para o desvio padrão, respectivamente. O resultado obtido no teste demonstrou que existe homocedasticidade nos grupos analisados, quanto à propriedade resistência à compressão aos 7 dias na cura ao ar.

Tabela 25 – Resultados do teste de homocedasticidade (7 dias – cura ao ar)

Informação	Valor
<i>Levene</i> (estatística do teste)	0,6244
Graus de Liberdade	5
Valor p	0,6846

Fonte: Autor, 2024

Tabela 26 – Intervalos de confiança para o desvio padrão (7 dias – cura ao ar)

Fator	Limite Inferior	Desvio Padrão	Limite Superior
FC	0,3202	0,7371	10,4113
FC2	1,7918	4,1243	58,2537
FC3	0,4515	1,0392	14,6785
FC4	2,1110	4,8590	68,6308
FC5	0,9581	2,2053	31,1486
FC6	0,6331	1,4572	20,5816

Fonte: Autor, 2024

Na Tabela 27 e na Tabela 28 são mostrados os resultados do teste de *Bartlett* para os dados de resistência à compressão aos 28 dias (cura ao ar) e os intervalos de confiança para o desvio padrão, respectivamente. O resultado obtido no teste

demonstrou que existe homocedasticidade nos grupos analisados, quanto à propriedade da resistência à compressão aos 28 dias na cura ao ar.

Tabela 27 – Resultados do teste de homocedasticidade (28 dias – cura ao ar)

Informação	Valor
<i>Bartlett</i> (estatística do teste)	4,0886
Graus de Liberdade	5
Valor p	0,5367

Fonte: Autor, 2024

Tabela 28 – Intervalos de confiança para o desvio padrão (28 dias – cura ao ar)

Fator	Limite Inferior	Desvio Padrão	Limite Superior
FC	0,2893	0,6658	9,4045
FC2	1,2234	2,8160	39,7748
FC3	0,9362	2,1548	30,4359
FC4	1,6199	3,7287	52,6660
FC5	1,1079	2,5502	36,0196
FC6	0,7403	1,7039	24,0669

Fonte: Autor, 2024

Na Tabela 29 e na Tabela 30 são mostrados os dados gerais do teste de *Bartlett* referentes aos dados de resistência à compressão de 7 dias sob condições de cura úmida. Especificamente, a Tabela 29 exibe os resultados do teste e a Tabela 30 descreve os intervalos de confiança para o desvio padrão. O valor p obtido no teste indicou que existe homocedasticidade entre os grupos testados, em referência às suas propriedades de resistência à compressão aos 7 dias sob condições de cura úmida.

Tabela 29 – Resultados do teste de homocedasticidade (7 dias – cura úmida)

Informação	Valor
<i>Bartlett</i> (estatística do teste)	4,9527
Graus de Liberdade	5
Valor p	0,4217

Fonte: Autor, 2024

Tabela 30 – Intervalos de confiança para o desvio padrão (7 dias – cura úmida)

Fator	Limite Inferior	Desvio Padrão	Limite Superior
FC	0,9782	2,2517	31,8035
FC2	1,4513	3,3407	47,1849
FC3	1,0650	2,4515	34,6265
FC4	0,2793	0,6429	9,0807
FC5	2,0535	4,7269	66,7644
FC6	1,1513	2,6502	37,4320

Fonte: Autor, 2024

A Tabela 31 apresenta os resultados do teste de *Levene* aplicado aos dados de resistência à compressão aos 28 dias dos concretos sob condições de cura úmida. A Tabela 32 exibe os intervalos de confiança para o desvio padrão. O resultado do teste de *Levene* demonstrou que existe homocedasticidade nos grupos analisados, referente à propriedade de resistência à compressão aos 28 dias sob condições de cura úmida.

Tabela 31 – Resultados do teste de homocedasticidade (28 dias – cura úmida)

Informação	Valor
<i>Levene</i> (estatística do teste)	0,4157
Graus de Liberdade	5
Valor p	0,8290

Fonte: Autor, 2024

Tabela 32 – Intervalos de confiança para o desvio padrão (28 dias – cura úmida)

Fator	Limite Inferior	Desvio Padrão	Limite Superior
FC	0,7776	1,7898	25,2797
FC2	1,5306	3,5233	49,7640
FC3	1,0366	2,3861	33,7019
FC4	0,0904	0,2082	2,9402
FC5	0,5035	1,1590	16,3705
FC6	1,4651	3,3724	47,6338

Fonte: Autor, 2024

Na Tabela 33 e na Tabela 34 são mostrados os resultados do teste de *Kruskal-Wallis* para os dados de resistência à compressão aos 7 dias (cura ao ar) e as comparações múltiplas entre os grupos, respectivamente. O resultado do teste demonstrou que as medianas das resistências à compressão aos 7 dias (cura ao ar), de todos os grupos de concretos, são estatisticamente equivalentes. Isto demonstra

que, no contexto dos experimentos realizados, as substituições de cimento e de agregado natural por MK e ARM_g, respectivamente, não produziram alterações significativas na mediana dos resultados de resistência à compressão, em relação ao concreto convencional, para as dosagens estudadas.

Tabela 33 – Resultados do teste não paramétrico (7 dias – cura ao ar)

Informação	Valor
<i>Kruskal-Wallis</i> qui-quadrado	9,9694
Graus de Liberdade	5
Valor p	0,0761

Fonte: Autor, 2024

Tabela 34 – Comparações múltiplas entre os grupos (7 dias – cura ao ar)

Fatores Comparados	Diferença Observada	Diferença Crítica	Diferença
FC - FC2	9,3333	12,7942	Não
FC - FC3	5,3333	12,7942	Não
FC - FC4	3,6667	12,7942	Não
FC - FC5	8,6667	12,7942	Não
FC - FC6	12,0000	12,7942	Não
FC2 - FC3	4,0000	12,7942	Não
FC2 - FC4	5,6667	12,7942	Não
FC2 - FC5	0,6667	12,7942	Não
FC2 - FC6	2,6667	12,7942	Não
FC3 - FC4	1,6667	12,7942	Não
FC3 - FC5	3,3333	12,7942	Não
FC3 - FC6	6,6667	12,7942	Não
FC4 - FC5	5,0000	12,7942	Não
FC4 - FC6	8,3333	12,7942	Não
FC5 - FC6	3,3333	12,7942	Não

Fonte: Autor, 2024

De acordo com o teste ANOVA, pelo valor p encontrado (Tabela 35), pelo menos uma das médias dos resultados de resistência à compressão aos 28 dias (cura ao ar) dentre os 6 grupos é diferente dos demais. A partir desse resultado da ANOVA, foi aplicado o Teste de *Tukey* (Tabela 36) para distinguir qual ou quais desses pares de grupos são diferentes ou não quanto à média dos resultados da propriedade estudada, mantendo o nível de significância.

Tabela 35 – Resultados da ANOVA para resistência à compressão (28 dias – cura ao ar)

ANOVA	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	Valor p
Fator	5	1157,9311	231,5862	38,2506	$5,7000 \cdot 10^{-7}$
Resíduos	12	72,6533	6,0544	-	-

Fonte: Autor, 2024

Tabela 36 – Resultados do teste de Tukey para resistência à compressão (28 dias – cura ao ar)

Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	Valor p
FC2-FC	-4,2667	-11,0149	2,4816	0,3376
FC3-FC	-21,0333	-27,7816	-14,2851	< 0,0001
FC4-FC	-11,8333	-18,5816	-5,0851	0,0008
FC5-FC	-21,5333	-28,2816	-14,7851	< 0,0001
FC6-FC	-15,2000	-21,9483	-8,4517	< 0,0001
FC3-FC2	-16,7667	-23,5149	-10,0184	< 0,0001
FC4-FC2	-7,5667	-14,3149	-0,8184	0,0252
FC5-FC2	-17,2667	-24,0149	-10,5184	< 0,0001
FC6-FC2	-10,9333	-17,6816	-4,1851	0,0016
FC4-FC3	9,2000	2,4517	15,9483	0,0064
FC5-FC3	-0,5000	-7,2483	6,2483	0,9998
FC6-FC3	5,8333	-0,9149	12,5816	0,1059
FC5-FC4	-9,7000	-16,4483	-2,9517	0,0043
FC6-FC4	-3,3667	-10,1149	3,3816	0,5700
FC6-FC5	6,3333	-0,4149	13,0816	0,0705

Fonte: Autor, 2024

Quanto à análise das resistências médias em si separadamente, com um nível de confiança de 95%, apenas o grupo FC2 é considerado equivalente com o concreto convencional (FC), como visto na Tabela 37. Esses resultados demonstram que a substituição de 20% de cimento por MK no concreto convencional (FC2) não produziu alteração nos valores médios equivalentes em comparação ao seu não uso (FC), enquanto que nos concretos com 20% (FC4) e 50% (FC6) de ARM_g houve aumento e equivalência nos valores médios, respectivamente, as suas contrapartes sem uso de MK (FC3 e FC5). Porém, mesmo com e sem o uso de MK, os concretos com 20% e 50% de ARM_g possuem valores médios estatisticamente diferentes e reduzidos em comparação ao convencional com (FC2) e sem MK (FC), prejudicando a resistência à compressão.

Tabela 37 – Comparativo das médias entre os grupos (28 dias – cura ao ar)

Fator	Médias	Grupos
FC	53,0965	a
FC2	48,7664	a
FC3	32,0345	b
FC5	31,5300	b
FC6	37,8360	bc
FC4	41,2412	c

Fonte: Autor, 2024

Aplicando-se o teste ANOVA (Tabela 38) aos dados médios de resistência à compressão aos 7 dias (cura úmida) obteve-se um resultado que, adotado um nível de significância de 0,05, aponta que, pelo menos, um dos dados médios dentre os 6 grupos é diferente dos demais. A fim de realizar uma comparação entre os grupos, foi aplicado o teste de *Tukey*, tendo seus resultados demonstrados na Tabela 39.

Tabela 38 – Resultados da ANOVA para resistência à compressão (7 dias – cura úmida)

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: Autor, 2024

Tabela 39 – Resultados do teste de Tukey para resistência à compressão (7 dias – cura úmida)

Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	Valor p
FC2-FC	-4,2000	-12,2754	3,8754	0,5296
FC3-FC	-6,0000	-14,0754	2,0754	0,1998
FC4-FC	-5,9333	-14,0087	2,1421	0,2082
FC5-FC	-9,6333	-17,7087	-1,5579	0,0168
FC6-FC	-8,7333	-16,8087	-0,6579	0,0315
FC3-FC2	-1,8000	-9,8754	6,2754	0,9712
FC4-FC2	-1,7333	-9,8087	6,3421	0,9755
FC5-FC2	-5,4333	-13,5087	2,6421	0,2807
FC6-FC2	-4,5333	-12,6087	3,5421	0,4539
FC4-FC3	0,0667	-8,0087	8,1421	1,0000
FC5-FC3	-3,6333	-11,7087	4,4421	0,6643
FC6-FC3	-2,7333	-10,8087	5,3421	0,8570
FC5-FC4	-3,7000	-11,7754	4,3754	0,6485
FC6-FC4	-2,8000	-10,8754	5,2754	0,8449
FC6-FC5	0,9000	-7,1754	8,9754	0,9988

Fonte: Autor, 2024

Quanto à análise das médias em si separadamente, com um nível de confiança de 95%, os grupos FC a FC4 e FC2 a FC6 possuem equivalência estatística entre si, respectivamente, conforme elucidado na Tabela 40. Esses resultados demonstram que a substituição de 20% de cimento por MK no concreto convencional (FC2) e no concreto com 20% de ARM_g (FC4), além de sua versão desprovida de MK (FC3), não produziram alterações nos valores médios equivalentes da resistência à compressão aos 7 dias (cura úmida) em comparação ao seu não uso (FC), enquanto nos concretos com 50% de ARM_g com (FC5) e sem MK (FC6) houve redução nos valores médios frente à mesma comparação. Entretanto, esses dois grupos (FC5 e FC6) possuem valores médios estatisticamente equivalentes ao do concreto convencional com MK (FC2), do concreto com 20% de ARM_g sem (FC3) e com (FC4) MK.

Tabela 40 – Comparativo das médias entre os grupos (7 dias – cura úmida)

Fator	Médias	Grupos
FC	39,3914	a
FC2	35,1875	ab
FC3	33,4218	ab
FC4	33,4638	ab
FC5	29,7643	b
FC6	30,6471	b

Fonte: Autor, 2024

Na Tabela 41 e na Tabela 42 são mostrados os resultados do teste *Kruskal-Wallis* para os dados de resistência à compressão aos 28 dias (cura úmida) e as comparações múltiplas entre os grupos, respectivamente. O resultado do valor p, obtido no teste, demonstrou que as medianas das resistências à compressão aos 28 dias (cura úmida) de alguns dos grupos de concretos são estatisticamente diferentes.

Tabela 41 – Resultados do teste não paramétrico (28 dias – cura úmida)

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

Fonte: Autor, 2024

Tabela 42 – Comparações múltiplas entre os grupos (28 dias – cura úmida)

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
FC2 - FC3	6,3333	12,7942	Não
FC2 - FC4	3,0000	12,7942	Não
FC2 - FC5	10,0000	12,7942	Não
FC2 - FC6	10,6667	12,7942	Não
FC3 - FC4	3,3333	12,7942	Não
FC3 - FC5	3,6667	12,7942	Não
FC3 - FC6	4,3333	12,7942	Não
FC4 - FC5	7,0000	12,7942	Não
FC4 - FC6	7,6667	12,7942	Não
FC5 - FC6	0,6667	12,7942	Não

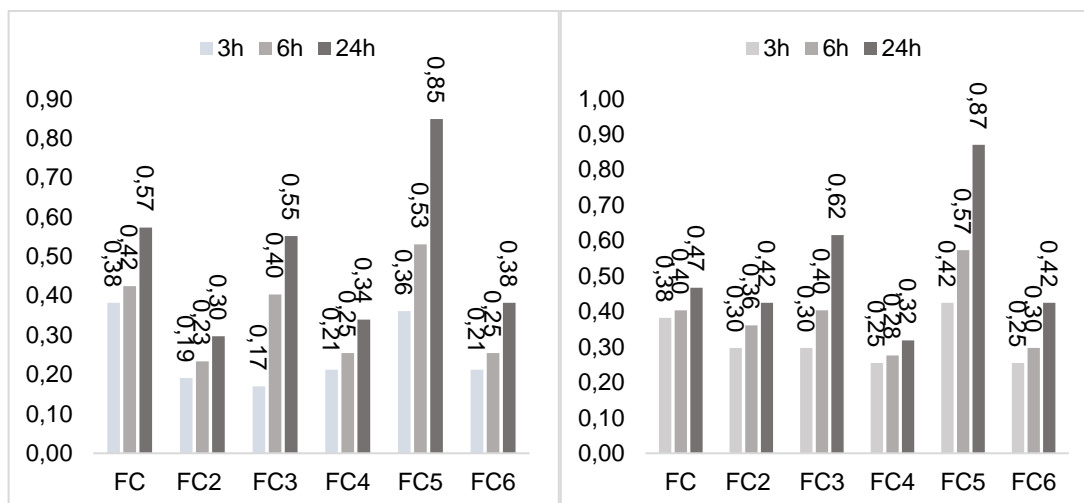
Fonte: Autor, 2024

Quanto à análise das medianas em si separadamente, com um nível de confiança de 95%, os grupos FC a FC4 e FC2 a FC6, são considerados equivalentes entre si, respectivamente como visto na Tabela 42. Esses resultados demonstram que a substituição de 20% de cimento por MK no concreto convencional (FC2) e no concreto com 20% de ARM_g (FC4), além do uso isolado de 20% de ARM_g (FC3) não alteraram a mediana dos resultados de resistência à compressão aos 28 dias (cura úmida), enquanto nos concretos com 50% de ARM_g com (FC5) e sem MK (FC6) houve redução nas medianas frente ao concreto convencional sem MK (FC). Entretanto, esses dois grupos (FC5 e FC6) possuem medianas estatisticamente equivalentes ao do concreto convencional com MK (FC2) e aos concretos com 20% de ARM_g sem (FC3) e com (FC4) MK

b) Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade foi avaliada aos 28 dias de cura, variando o tipo de cura em cura ao ar e cura úmida, além de analisar em 3 h, 6 h e 24 h de absorção. Os resultados médios são mostrados na Figura 25.

Figura 25 – Valores médios de absorção de água por capilaridade (g/cm^2), cura úmida (esquerda) e cura ao ar (direita)



Fonte: Autor, 2024

Observa-se que em 24 h os resultados de absorção de água por capilaridade dos concretos com o uso do metacaulim apresentaram os menores valores, sendo as composições: FC2, FC4 e FC6, com resultados de $0,30 \text{ g}/\text{cm}^2$, $0,34 \text{ g}/\text{cm}^2$ e $0,38 \text{ g}/\text{cm}^2$, respectivamente, na cura úmida; e $0,42 \text{ g}/\text{cm}^2$, $0,32 \text{ g}/\text{cm}^2$ e $0,42 \text{ g}/\text{cm}^2$ na cura ao ar. As misturas que empregaram ARM_g sem metacaulim (FC3 e FC5), com valores respectivos de $0,55 \text{ g}/\text{cm}^2$ e $0,85 \text{ g}/\text{cm}^2$, (na cura úmida) e $0,62 \text{ g}/\text{cm}^2$ e $0,87 \text{ g}/\text{cm}^2$ (cura ao ar), mostraram índices superiores de absorção capilar a 24h em comparação ao concreto de referência (FC). Os valores de absorção de água por capilaridade em 3h e 6h foram maiores para a cura ao ar em todas as misturas contendo ARM_g , isso aconteceu devido ao processo de cura ao ar ser totalmente influenciado pelo local onde estavam expostos os corpos de provas. Devido aos ARM_g apresentarem uma superfície mais rugosa, serem geometricamente mais angulosos e irregulares, assim como microestruturalmente mais porosos quando comparados aos agregados naturais convencionais, essas características influenciam na maior absorção de água por capilaridade por parte desses agregados reciclados (Lima *et al.*, 2022) em comparação aos agregados naturais (Lu *et al.*, 2019).

Na Tabela 43 são mostrados os resultados do teste de *Shapiro-Wilk* e o valor p dos dados quanto aos valores de absorção de água por capilaridade na cura ao ar e na cura úmida.

Tabela 43 – Teste de normalidade para a absorção de água por capilaridade

Misturas	Cura úmida		Cura ao ar	
	24 h			
	Estatística: <i>Shapiro-Wilk</i>	Valor p	Estatística: <i>Shapiro-Wilk</i>	Valor p
FC	0,7500	< 0,0001	0,9868	0,7804
FC2	0,7500	< 0,0001	0,7500	< 0,0001
FC3	0,9643	0,6369	0,9643	0,6369
FC4	0,7500	< 0,0001	0,7500	< 0,0001
FC5	0,9231	0,4633	0,9868	0,7804
FC6	0,7500	< 0,0001	0,7500	< 0,0001

Fonte: Autor, 2024

Na Tabela 44 e na Tabela 45 são mostrados os resultados do teste de *Levene* para os dados de absorção de água por capilaridade (cura úmida) e os intervalos de confiança para o desvio padrão, respectivamente. Quanto à absorção de água por capilaridade (cura ao ar), as propriedades citadas anteriormente são mostradas na Tabela 46 e na Tabela 47, respectivamente. O resultado do valor p, obtido no teste, demonstrou que existe homocedasticidade nos grupos analisados, quanto à propriedade absorção de água por capilaridade em ambos os tipos de cura.

Tabela 44 – Resultados do teste de homocedasticidade para a absorção de água por capilaridade (cura úmida – 24h)

Informação	Valor
<i>Levene</i> (estatística do teste)	1,3321
Graus de Liberdade	5
Valor p	0,3154

Fonte: Autor, 2024

Tabela 45 – Intervalos de confiança para o desvio padrão para a absorção de água por capilaridade (cura úmida – 24h)

Fator	Limite Inferior	Desvio Padrão	Limite Superior
FC	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
FC2	0,0176	0,0404	0,5708
FC3	0,0417	0,0961	1,3572
FC4	0,0150	0,0346	0,4893
FC5	0,0567	0,1305	1,8434
FC6	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001

Fonte: Autor, 2024

Tabela 46 – Resultados do teste de homocedasticidade para a absorção de água por capilaridade (cura ao ar – 24h)

Informação	Valor
<i>Levene</i> (estatística do teste)	1,4149
Graus de Liberdade	5
Valor p	0,2873

Fonte: Autor, 2024

Tabela 47 – Intervalos de confiança para o desvio padrão para a absorção de água por capilaridade (cura ao ar – 24h)

Fator	Limite Inferior	Desvio Padrão	Limite Superior
FC	0,0696	0,1602	2,2629
FC2	0,0176	0,0404	0,5708
FC3	0,0422	0,0971	1,3718
FC4	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
FC5	0,0699	0,1609	2,2731
FC6	0,0176	0,0404	0,5708

Fonte: Autor, 2024

Na Tabela 48 e na Tabela 49 são mostrados os resultados do teste *Kruskal-Wallis* para os dados de absorção de água por capilaridade (24 h – cura ao ar) e as comparações múltiplas entre os grupos, respectivamente. O resultado do valor p, obtido no teste, indicou que as medianas das taxas de absorção de água por capilaridade (24 h – cura ao ar) de certos grupos de concreto diferem significativamente entre si.

Tabela 48 – Resultados do teste não paramétrico para a absorção de água por capilaridade (24 h – cura ao ar)

Informação	Valor
<i>Kruskal-Wallis</i> qui-quadrado	13,3372
Graus de Liberdade	5
Valor p	0,0204

Fonte: Autor, 2024

Tabela 49 – Comparações múltiplas entre os grupos para a absorção de água por capilaridade (24 h – cura ao ar)

Fatores Comparados	Diferença Observada	Diferença Crítica	Diferença
FC - FC2	1,1667	12,7942	Não
FC - FC3	6,8333	12,7942	Não
FC - FC4	4,0000	12,7942	Não
FC - FC5	9,8333	12,7942	Não
FC - FC6	1,1667	12,7942	Não
FC2 - FC3	5,6667	12,7942	Não
FC2 - FC4	5,1667	12,7942	Não
FC2 - FC5	8,6667	12,7942	Não
FC2 - FC6	< 0,0001	12,7942	Não
FC3 - FC4	10,8333	12,7942	Não
FC3 - FC5	3,0000	12,7942	Não
FC3 - FC6	5,6667	12,7942	Não
FC4 - FC5	13,8333	12,7942	Sim
FC4 - FC6	5,1667	12,7942	Não
FC5 - FC6	8,6667	12,7942	Não

Fonte: Autor, 2024

Quanto à análise das medianas em si separadamente, com um nível de confiança de 95%, os grupos FC2 a FC6, são considerados equivalente ao concreto convencional (FC), como visto na Tabela 49. Esses resultados demonstram que a substituição de 20% de cimento por MK no concreto convencional (FC2), no concreto com 20% de ARM_g (FC4) e no concreto com 50% de ARM_g (FC6) não alteraram a mediana dos resultados de absorção de água por capilaridade (24 h – cura ao ar) em comparação ao concreto convencional (FC), sendo esse resultado visto também nos concretos com substituição de 20% (FC3) e 50% (FC5) de AN_g por ARM_g. Os únicos grupos que possuem medianas estatisticamente diferentes são os FC4 e FC5.

Na Tabela 50 e na Tabela 51 são mostrados os resultados do teste *Kruskal-Wallis* para os dados de absorção de água por capilaridade (24 h – cura úmida) e as comparações múltiplas entre os grupos, respectivamente. O resultado do valor p, obtido no teste, indicou que as medianas das taxas de absorção de água por capilaridade (24 h – cura úmida) de certos grupos de concreto diferem significativamente entre si.

Tabela 50 – Resultados do teste não paramétrico para a absorção de água por capilaridade (24 h – cura úmida)

Informação	Valor
<i>Kruskal-Wallis</i> qui-quadrado	15,8907
Graus de Liberdade	5
Valor p	0,0072

Fonte: Autor, 2024

Tabela 51 – Comparações múltiplas entre os grupos para a absorção de água por capilaridade (24 h – cura úmida)

Fatores Comparados	Diferença Observada	Diferença Crítica	Diferença
FC - FC2	10,3333	12,7942	Não
FC - FC3	1,0000	12,7942	Não
FC - FC4	8,1667	12,7942	Não
FC - FC5	4,0000	12,7942	Não
FC - FC6	5,5000	12,7942	Não
FC2 - FC3	9,3333	12,7942	Não
FC2 - FC4	2,1667	12,7942	Não
FC2 - FC5	14,3333	12,7942	Sim
FC2 - FC6	4,8333	12,7942	Não
FC3 - FC4	7,1667	12,7942	Não
FC3 - FC5	5,0000	12,7942	Não
FC3 - FC6	4,5000	12,7942	Não
FC4 - FC5	12,1667	12,7942	Não
FC4 - FC6	2,6667	12,7942	Não
FC5 - FC6	9,5000	12,7942	Não

Fonte: Autor, 2024

Em relação à análise das medianas, com um nível de confiança de 95%, pode-se constatar que os grupos FC2 a FC6, são considerados equivalentes ao concreto convencional (FC), respectivamente como visto na Tabela 51. Isso indica que a substituição de 20% de cimento por MK no concreto convencional (FC2), no concreto com 20% de ARM_g (FC4) e no concreto com 50% de ARM_g (FC6) não alteraram a mediana dos resultados de absorção de água por capilaridade (24 h – cura úmida) em comparação ao concreto convencional (FC), sendo esse resultado visto também nos concretos com substituição de 20% (FC3) e 50% (FC5) de AN_g por ARM_g. No entanto, deve-se notar que os únicos grupos que apresentam medianas estatisticamente diferentes são FC2 e FC5.

6.1.3 Comparativo cura úmida versus cura ao ar

Após a realização das análises estatísticas individuais de cura ao ar e cura úmida, foi necessário analisar se o fator cura influência nas propriedades do estado

endurecido do concreto, sendo frisadas as propriedades de resistência à compressão e absorção de água por capilaridade.

a) Resistência à compressão

Os valores médios são indicados na Tabela 52 e os resultados do teste são mostrados na Tabela 53. Graficamente, a normalidade dos dados quanto a 7 e 28 dias de resistência à compressão (Ar e Úmida) é mostrada em duas figuras (Figura 26, Figura 27), respectivamente.

Tabela 52 – Dados médios de resistência à compressão (Ar e Úmida)

Resistência à compressão (MPa)		
Fator	Média	
	7 dias	28 dias
Ar	35,0	40,8
Úmida	33,7	39,0

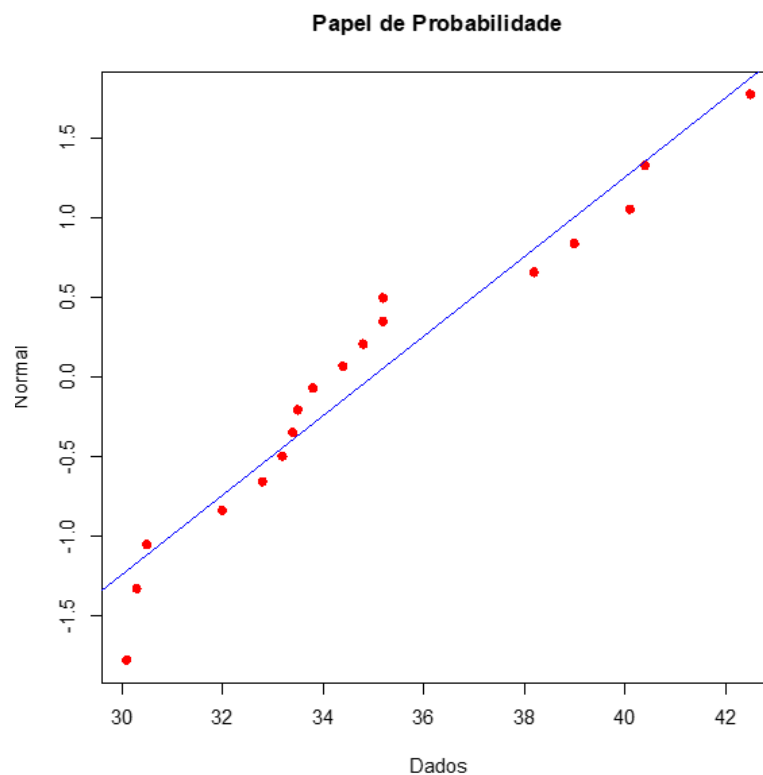
Fonte: Autor, 2024

Tabela 53 – Resultados do teste de normalidade (Resistência à compressão – Ar e Úmida)

Misturas	Idade			
	7 dias		28 dias	
	Estatística: Shapiro- Wilk	Valor p	Estatística: Shapiro- Wilk	Valor p
Ar	0,9271	0,1728	0,9159	0,1095
Úmida	0,9804	0,9545	0,9065	0,0748

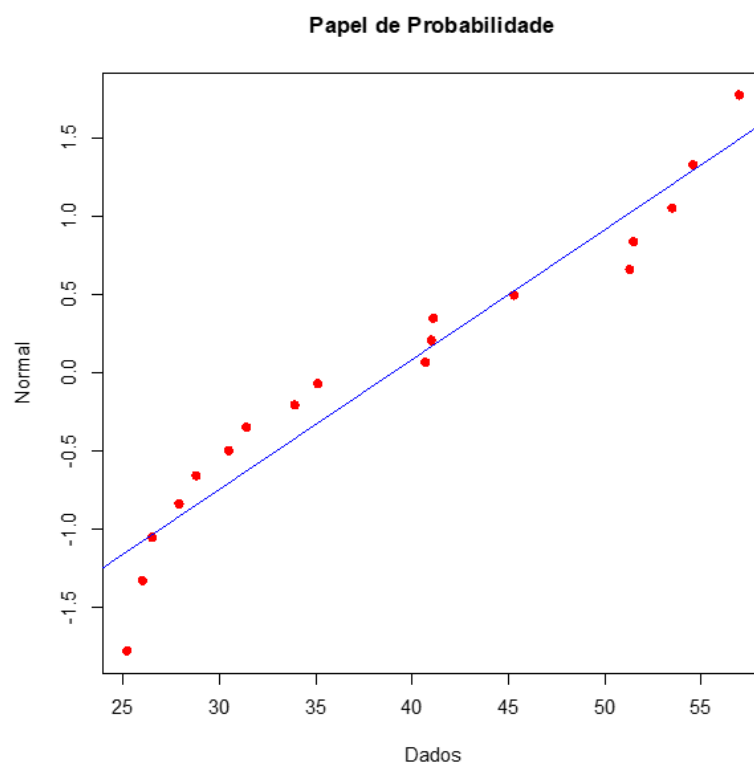
Fonte: Autor, 2024

Figura 26 – Normalidade dos dados (Resistência à compressão – Ar – 7 dias)



Fonte: Autor, 2024

Figura 27 – Normalidade dos dados (Resistência à compressão – Úmida – 28dias)



Fonte: Autor, 2024

Na Tabela 54, Tabela 55, Tabela 56 e na Tabela 57 são descritos os resultados do teste de *Bartlett* para os dados de resistência à compressão aos 7 dias (Ar *versus* Úmida) e 28 dias (Ar *versus* Úmida), bem como os intervalos de confiança para o desvio padrão, respectivamente. O valor de p obtido neste teste indicou que há homocedasticidade entre os grupos analisados com relação à propriedade de resistência à compressão aos 7 dias (Ar *versus* Úmida) e 28 dias (Ar *versus* Úmida).

Tabela 54 – Resultados do teste de homocedasticidade (Resistência à compressão – 7 dias Ar *versus* Úmida)

Informação	Valor
<i>Bartlett</i> (estatística do teste)	0,1919
Graus de Liberdade	1
Valor p	0,6614

Fonte: Autor, 2024

Tabela 55 – Intervalos de confiança para o desvio padrão (Resistência à compressão – 7 dias Ar *versus* Úmida)

Fator	Limite Inferior	Desvio Padrão	Limite Superior
Ar	2,5254	3,6606	6,3233
Úmida	2,8131	4,0777	7,0438

Fonte: Autor, 2024

Tabela 56 – Resultados do teste de homocedasticidade (Resistência à compressão – 28 dias Ar *versus* Úmida)

Informação	Valor
<i>Bartlett</i> (estatística do teste)	1,0644
Graus de Liberdade	1
Valor p	0,3022

Fonte: Autor, 2024

Tabela 57 – Intervalos de confiança para o desvio padrão (Resistência à compressão – 28 dias Ar *versus* Úmida)

Fator	Limite Inferior	Desvio Padrão	Limite Superior
Ar	5,8696	8,5081	14,6969
Úmida	7,5764	10,982	18,9704

Fonte: Autor, 2024

De acordo com o teste t, os resultados apontam que as médias de resistência à compressão aos 7 dias e aos 28 dias, respectivamente, entre os tipos de cura (Ar *versus* Úmida) são iguais, como mostrado na Tabela 58 e na Tabela 59. Isto demonstra que, no contexto dos experimentos realizados, o fator tipo de cura não produziu

alterações significativas na média dos resultados de resistência à compressão aos 7 dias e aos 28 dias, para as dosagens estudadas.

Tabela 58 – Resultados do teste t (Resistência à compressão – 7 dias Ar *versus* Úmida)

Informação	Valor
T	1,0194
Graus de Liberdade	34
Valor p	0,3152
Média no grupo 1:	34,9667
Média no grupo 2:	33,65
Média 1 - Média 2:	1,3167
Desvio padrão amostral do grupo 1:	3,6606
Desvio padrão amostral do grupo 2:	4,0777
Desvio padrão agrupado:	3,8747
Hipótese Alternativa: Diferente de	0
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	-1,3081
Limite Superior	3,9415

Fonte: Autor, 2024

Tabela 59 – Resultados do teste t (Resistência à compressão – 28 dias Ar *versus* Úmida)

Informação	Valor
T	0,5480
Graus de Liberdade	34
Valor p	0,5873
Média no grupo 1:	40,7556
Média no grupo 2:	38,9611
Média 1 - Média 2:	1,7944
Desvio padrão amostral do grupo 1:	8,5081
Desvio padrão amostral do grupo 2:	10,9820
Desvio padrão agrupado:	9,8232
Hipótese Alternativa: Diferente de	0
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	-4,8600
Limite Superior	8,4489

Fonte: Autor, 2024

b) Absorção de água por capilaridade

Os dados médios são mostrados na Tabela 60 e os resultados do teste são mostrados na Tabela 61. Graficamente, a ausência de normalidade dos dados quanto à absorção de água por capilaridade aos 28 dias com 24 h de absorção (Ar versus Úmida) é mostrada em duas figuras (Figura 28 e Figura 29), respectivamente.

Tabela 60 – Dados médios de absorção de água por capilaridade (Ar versus Úmida)

Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)	
Fator	Média
	24 h
Ar	0,52
Úmida	0,50

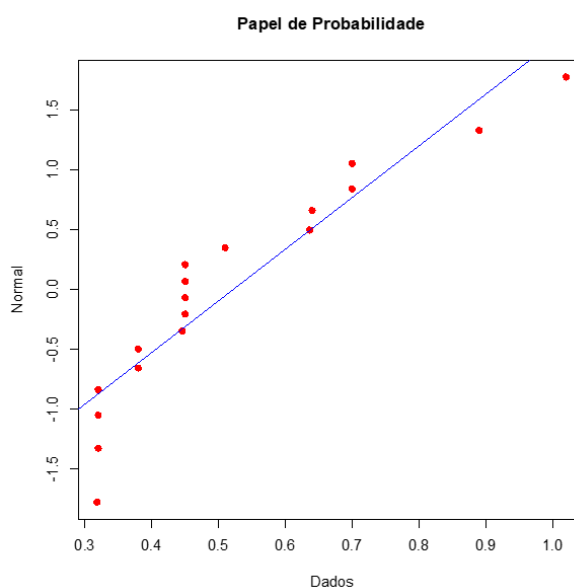
Fonte: Autor, 2024

Tabela 61 – Resultados do teste de normalidade (Absorção de água por capilaridade – Ar versus Úmida)

Misturas	24 h	
	Estatística: Shapiro-Wilk	Valor p
Ar	0,8625	0,0134
Úmida	0,8837	0,0302

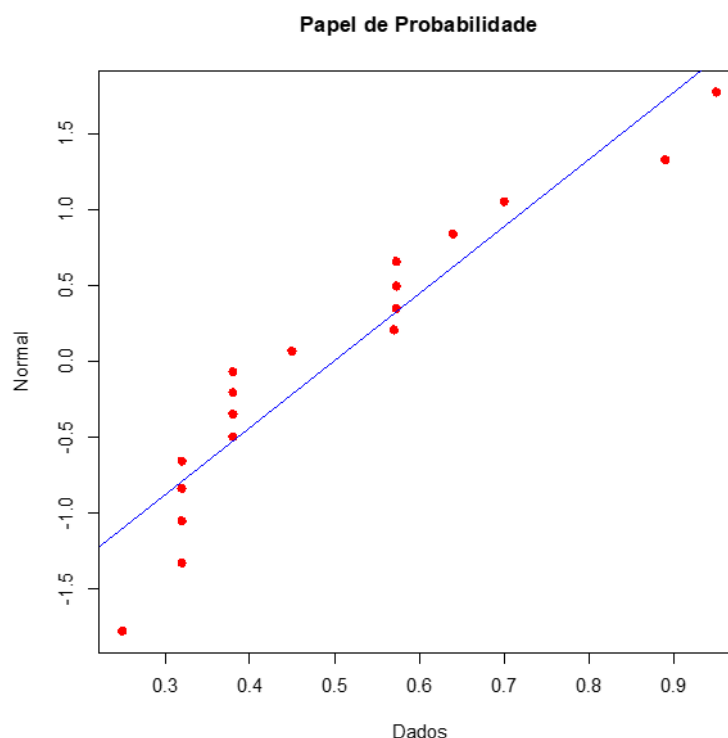
Fonte: Autor, 2024

Figura 28 – Representação gráfica do teste de normalidade *Shapiro Wilk* para absorção de água por capilaridade (Ar – 24 h)



Fonte: Autor, 2024

Figura 29 – Representação gráfica do teste de normalidade Shapiro Wilk para absorção de água por capilaridade (Úmida – 24 h)



Fonte: Autor, 2024

Na Tabela 62 e na Tabela 63 são descritos os resultados do teste de *Levene* para os dados de 24 h de absorção de água por capilaridade (Ar *versus* Úmida), bem como os intervalos de confiança para o desvio padrão, respectivamente. O valor p obtido neste teste indicou que há homocedasticidade entre os grupos analisados com relação à propriedade comentada.

Tabela 62 – Resultados do teste de homocedasticidade para absorção de água por capilaridade (24 h – Ar *versus* Úmida)

Informação	Valor
<i>Levene</i> (estatística do teste)	0,0804
Graus de Liberdade	1
Valor p	0,7785

Fonte: Autor, 2024

Tabela 63 – Intervalos de confiança para o desvio padrão para absorção de água por capilaridade (24 h – Ar *versus* Úmida)

Fator	Limite Inferior	Desvio Padrão	Limite Superior
Ar	0,1405	0,2036	0,3517
Úmida	0,1387	0,2011	0,3473

Fonte: Autor, 2024

Na Tabela 64 são mostrados os resultados do teste U de *Mann-Whitney* para os dados de absorção de água por capilaridade (24 h – Ar *versus* Úmida) e as comparações múltiplas entre os grupos, respectivamente. O resultado do valor p, obtido no teste, demonstrou que as médias amostrais dos valores de absorção de água por capilaridade (24 h – Ar *versus* Úmida), são estatisticamente equivalentes. Isto demonstra que, no contexto dos experimentos realizados, o tipo de cura não produziu alterações significativas na média dos resultados absorção de água por capilaridade (24 h – Ar *versus* Úmida), para as dosagens estudadas.

Tabela 64 – Resultados do teste U de *Mann-Whitney* para absorção de água por capilaridade (24 h – Ar *versus* Úmida)

Informação	Valor
W	175
Valor p	0,6902
Hipótese Nula	0
Método	Wilcoxon rank sum test with continuity correction
(Pseudo) Mediana	$1,0357 \cdot 10^{-5}$
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	-0,1229
Limite Superior	0,1299

Fonte: Autor, 2024

6.2 Concretos curados no campo

6.2.1 Propriedades no estado fresco

A Tabela 65 descreve as propriedades no estado fresco de concretos formulados com ARM e MK, abrangendo diversas taxas de substituição.

Tabela 65 – Propriedades físicas no estado fresco dos concretos produzidos

Misturas	Tipo de concreto	Slump test (cm)	Massa específica (kg/m ³)
FC	Convencional (CV)	23	2515
FC2	CV + metacaulim (MK)	22	2483
FC3	20% de Agregado Reciclado Misto Graúdo (ARM _g)	25	2382
FC4	20% de ARM _g + MK	19	2458
FC5	50% de ARM _g	25	2312
FC6	50% de ARM _g + MK	9	2369

Fonte: Autor, 2024

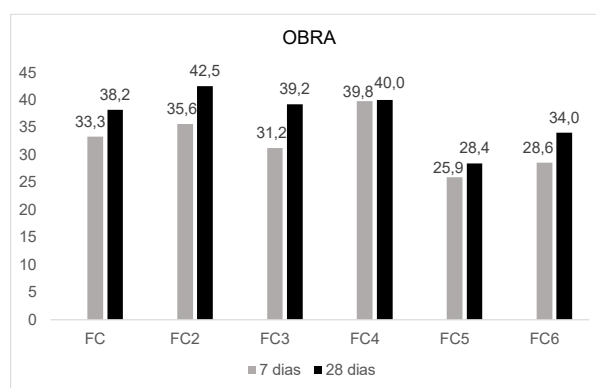
Os resultados no estado fresco dos concretos executados para cura em campo são próximos dos concretos executados para cura no laboratório, sem a ocorrência de mudanças significativas.

6.2.2 Propriedades no estado endurecido

c) Resistência à compressão

A avaliação do desempenho no estado endurecido das misturas de concreto envolveu a medição da resistência à compressão axial em intervalos de 7 e 28 dias e o local de exposição “Obra”, representando a cidade de São Miguel dos Milagres. Os resultados médios são mostrados na Figura 30.

Figura 30 – Resultados médios de resistência à compressão em MPa (Campo)



Fonte: Autor, 2024

Em relação a meta de f_{cj} de 46,6 MPa definida na etapa de dosagem, nenhum concreto atingiu essa meta. A literatura corrobora esse resultado dos concretos com ARM, atribuindo o declínio da resistência à compressão com o aumento das taxas de substituição, em função da natureza heterogênea desse agregado (Meng *et al.*, 2022; Bazaz; Khayati, 2012; Salles *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2022; Yang; Du; Bao, 2011). Destaca-se que todos os concretos ultrapassaram a resistência à compressão de 26,6 MPa aos 28 dias, que corresponde a um f_{ck} de 20 MPa, que habilita o concreto para aplicações estruturais em condições ambientais agressivas.

A Tabela 66 fornece mais informações sobre os resultados do teste de normalidade para resistência à compressão, com seus respectivos valores p detalhados.

Tabela 66 – Teste de normalidade nos resultados de resistência à compressão (Obra)

Misturas	Resistência à compressão (MPa)			
	Obra			
	7 dias		28 dias	
	Estatística: <i>Shapiro-Wilk</i>	Valor p	Estatística: <i>Shapiro-Wilk</i>	Valor p
FC	0,8409	0,2164	0,9552	0,5928
FC2	0,9796	0,7262	0,9792	0,7233
FC3	0,7865	0,0826	0,8710	0,2983
FC4	0,9231	0,4633	0,8929	0,3631
FC5	0,7500	< 0,0001	0,8096	0,1376
FC6	0,9423	0,5367	0,9643	0,6369

Fonte: Autor, 2024

Na Tabela 67 e na Tabela 68 são mostrados os resultados do teste de *Levene* para os dados de resistência à compressão aos 7 dias (exposto na obra) e os intervalos de confiança para o desvio padrão, respectivamente. O resultado do valor p obtido no teste indicou que não há diferença significativa na variância entre os grupos analisados, quanto à propriedade da resistência à compressão aos 7 dias expostos na obra, indicando, portanto, a existência de homocedasticidade.

Tabela 67 – Resultados do teste de homocedasticidade para resistência à compressão (7 dias – Obra)

Informação	Valor
<i>Levene</i> (estatística do teste)	0,6904
Graus de Liberdade	5
Valor p	0,6403

Fonte: Autor, 2024

Tabela 68 – Intervalos de confiança para o desvio padrão para resistência à compressão (7 dias – Obra)

Fator	Limite Inferior	Desvio Padrão	Limite Superior
FC	2,1809	5,0200	70,9052
FC2	0,2214	0,5097	7,1993
FC3	1,2665	2,9153	41,1776
FC4	0,2281	0,5251	7,4164
FC5	0,4112	0,9466	13,3702
FC6	1,3829	3,1831	44,9598

Fonte: Autor, 2024

Na Tabela 69 e na Tabela 70 são mostrados os resultados do teste de *Bartlett* para os dados de resistência à compressão aos 28 dias (exposto na obra) e os

intervalos de confiança para o desvio padrão, respectivamente. O resultado do valor p obtido no teste demonstrou que não existe homocedasticidade nos grupos analisados, quanto à propriedade da resistência à compressão aos 28 dias expostos na obra.

Tabela 69 – Resultados do teste de homocedasticidade para resistência à compressão (28 dias – Obra)

Informação	Valor
<i>Bartlett</i> (estatística do teste)	13,8223
Graus de Liberdade	5
Valor p	0,0168

Fonte: Autor, 2024

Tabela 70 – Intervalos de confiança para o desvio padrão para resistência à compressão (28 dias – Obra)

Fator	Limite Inferior	Desvio Padrão	Limite Superior
FC	0,4485	1,0323	14,5812
FC2	2,5194	5,7992	81,9108
FC3	0,5284	1,2163	17,1789
FC4	0,4349	1,0010	14,1392
FC5	0,7612	1,7521	24,7476
FC6	0,1674	0,3853	5,4422

Fonte: Autor, 2024

Na Tabela 71 e na Tabela 72 são mostrados os resultados do teste *Kruskal-Wallis* para os dados de resistência à compressão aos 7 dias (exposto na obra) e as comparações múltiplas entre os grupos, respectivamente. O resultado do valor p indicou que as medianas das resistências à compressão aos 7 dias (exposto na obra) de certos grupos de concreto diferem significativamente entre si.

Tabela 71 – Resultados do teste não paramétrico para resistência à compressão (7 dias – Obra)

Informação	Valor
<i>Kruskal-Wallis</i> qui-quadrado	13,9235
Graus de Liberdade	5
Valor p	0,0161

Fonte: Autor, 2024

Tabela 72 – Comparações múltiplas entre os grupos para resistência à compressão (7 dias – Obra)

Fatores Comparados	Diferença Observada	Diferença Crítica	Diferença
FC - FC2	1,6667	12,7942	Não
FC - FC3	2,5000	12,7942	Não
FC - FC4	6,1667	12,7942	Não
FC - FC5	8,5000	12,7942	Não
FC - FC6	4,8333	12,7942	Não
FC2 - FC3	4,1667	12,7942	Não
FC2 - FC4	4,5000	12,7942	Não
FC2 - FC5	10,1667	12,7942	Não
FC2 - FC6	6,5000	12,7942	Não
FC3 - FC4	8,6667	12,7942	Não
FC3 - FC5	6,0000	12,7942	Não
FC3 - FC6	2,3333	12,7942	Não
FC4 - FC5	14,6667	12,7942	Sim
FC4 - FC6	11,0000	12,7942	Não
FC5 - FC6	3,6667	12,7942	Não

Fonte: Autor, 2024

Em relação à análise das medianas, com um nível de confiança de 95%, pode-se constatar que os grupos FC a FC6, FC2 a FC6 e FC3 a FC6 são equivalentes entre si, respectivamente como visto na Tabela 72. Isso indica que a substituição de 20% de cimento por MK no concreto convencional (FC2), no concreto com 20% de ARM_g (FC4) e no concreto com 50% de ARM_g (FC6) não alteraram a mediana dos resultados de resistência à compressão aos 7 dias (exposto na obra) em comparação ao concreto convencional (FC), sendo esse resultado visto também nos concretos com substituição de 20% (FC3) e 50% (FC5) de AN_g por ARM_g. No entanto, deve-se notar que os únicos grupos que apresentam medianas estatisticamente diferentes são FC4 e FC5.

Através do teste de ANOVA (Tabela 73), adotando-se nível de significância de 5%, conclui-se que existe pelo menos um grupo cuja média de resistência à compressão aos 28 dias (exposto na obra) difere dos demais. A partir desse resultado da ANOVA, foi aplicado o Teste de *Tukey* (Tabela 74) para distinguir qual ou quais desses pares de grupos são diferentes ou não quanto à média dos resultados da propriedade estudada, mantendo o nível de significância.

Tabela 73 – Resultados da ANOVA para resistência à compressão (28 dias – Obra)

Tabela da ANOVA	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	Valor p
Fator	5	385,9593	77,1919	11,4651	0,0003
Resíduos	12	80,793	6,7328	-	-

Fonte: Autor, 2024

Tabela 74 – Resultados do teste de *Tukey* para resistência à compressão (28 dias – Obra)

Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	Valor p
FC2-FC	4,2460	-2,8702	11,3623	0,3934
FC3-FC	1,0090	-6,1073	8,1252	0,9962
FC4-FC	1,7657	-5,3506	8,8819	0,9552
FC5-FC	-9,8374	-16,9536	-2,7211	0,0058
FC6-FC	-4,2460	-11,3623	2,8702	0,3934
FC3-FC2	-3,2371	-10,3533	3,8792	0,6548
FC4-FC2	-2,4804	-9,5966	4,6359	0,8422
FC5-FC2	-14,0834	-21,1996	-6,9672	0,0003
FC6-FC2	-8,4921	-15,6083	-1,3758	0,0167
FC4-FC3	0,7567	-6,3595	7,8730	0,9990
FC5-FC3	-10,8463	-17,9625	-3,7301	0,0027
FC6-FC3	-5,2550	-12,3712	1,8612	0,2044
FC5-FC4	-11,6030	-18,7193	-4,4868	0,0015
FC6-FC4	-6,0117	-13,1280	1,1045	0,1177
FC6-FC5	5,5913	-1,5249	12,7076	0,1607

Fonte: Autor, 2024

Quanto à análise das médias em si separadamente, com um nível de confiança de 95%, os grupos FC a FC4 possuem equivalência estatística entre si, respectivamente, conforme elucidado na Tabela 75. Esses resultados demonstram que a substituição de 20% de cimento por MK no concreto convencional (FC2), no concreto com 50% de ARM_g (FC6), no concreto com 20% de ARM_g (FC4), além de sua versão desprovida de MK (FC3), não produziram alterações nos valores médios equivalentes da resistência à compressão aos 28 dias (exposto na obra) em comparação ao seu não uso (FC), enquanto nos concretos com 50% de ARM_g sem MK (FC5) houve redução nos valores médios frente à mesma comparação. Esse grupo (FC5) somente possui valores médios equivalentes com o grupo FC6.

Tabela 75 – Comparativo das médias entre os grupos para resistência à compressão (28 dias – Obra)

Fator	Médias	Grupos
FC	38,2143	ab
FC2	42,4604	a
FC3	39,2233	ab
FC4	39,9800	ab
FC5	28,3770	c
FC6	33,9683	bc

Fonte: Autor, 2024

6.3 Concretos curados no laboratório *versus* curados no campo

Após a execução das análises isoladas e comparativas do laboratório (cura ao ar e cura úmida) e do campo (obra), foi necessário analisar se os fatores “laboratório” e “campo” influenciam nos resultados de resistência à compressão aos 7 e 28 dias de cura, sendo essa análise “Cura ao Ar e Cura Úmida *versus* Obra”, analisando se o fator das condições climáticas influencia ou não nesses resultados. Os dados brutos quanto à “cura ao ar e cura úmida”, “obra”, estão descritos nos Apêndices A (Tabela A8), B (Tabela B2), respectivamente.

6.3.1 Cura ao Ar e Cura Úmida *versus* Obra

Os resultados do teste de normalidade *Shapiro Wilk* de cura ao ar e cura úmida, foram executados em tópicos anteriores na Tabela 53. Os dados médios de resistência à compressão da obra, o teste de normalidade e a representação gráfica dos dados (7 dias e 28 dias) são mostrados na Tabela 76, Tabela 77, Figura 31 e Figura 32, respectivamente.

Tabela 76 – Dados médios de resistência à compressão (Obra)

Resistência à compressão (MPa)		
Fator	Média	
	7 dias	28 dias
Obra	32,4	37,0

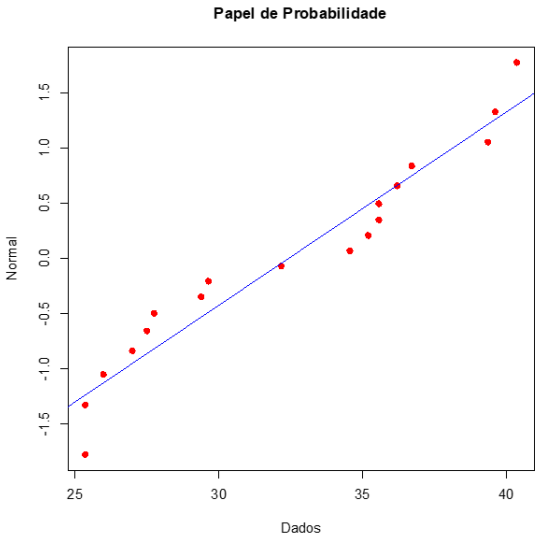
Fonte: Autor, 2024

Tabela 77 – Resultados do teste de normalidade (Resistência à compressão – Obra)

Misturas	Idade			
	7 dias		28 dias	
	Estatística: Shapiro-Wilk	Valor p	Estatística: Shapiro-Wilk	Valor p
Obra	0,9109	0,0894	0,9369	0,2566

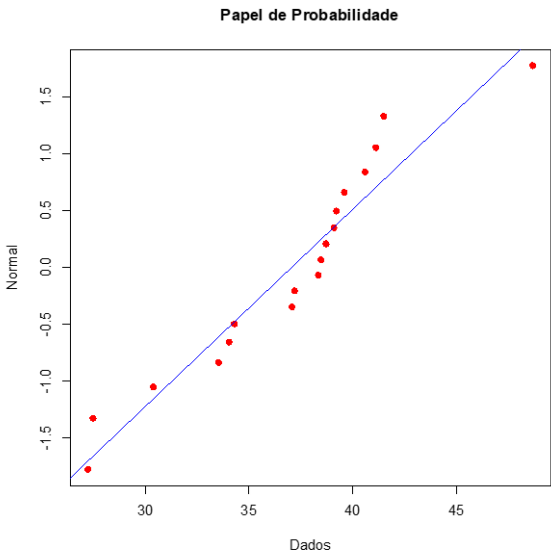
Fonte: Autor, 2024

Figura 31 – Normalidade dos dados (Resistência à compressão – Obra – 7 dias)



Fonte: Autor, 2024

Figura 32 – Normalidade dos dados (Resistência à compressão – Obra – 28 dias)



Fonte: Autor, 2024

Na Tabela 78, Tabela 79, Tabela 80 e na Tabela 81 são descritos os resultados do teste de *Bartlett* para os dados de resistência à compressão aos 7 dias e 28 dias (Ar *versus* Obra), bem como os intervalos de confiança para o desvio padrão, respectivamente. O valor p obtido neste teste indicou que há homocedasticidade entre os grupos analisados com relação à propriedade de resistência à compressão aos 7 dias e 28 dias (Ar *versus* Obra).

Tabela 78 – Resultados do teste de homocedasticidade (Resistência à compressão – 7 dias Ar *versus* Obra)

Informação	Valor
<i>Bartlett</i> (estatística do teste)	2,0134
Graus de Liberdade	1
Valor p	0,1559

Fonte: Autor, 2024

Tabela 79 – Intervalos de confiança para o desvio padrão (Resistência à compressão – 7 dias Ar *versus* Obra)

Fator	Limite Inferior	Desvio Padrão	Limite Superior
Ar	2,5254	3,6606	6,3233
Obra	3,5935	5,2088	8,9978

Fonte: Autor, 2024

Tabela 80 – Resultados do teste de homocedasticidade (Resistência à compressão – 28 dias Ar *versus* Obra)

Informação	Valor
<i>Bartlett</i> (estatística do teste)	3,7371
Graus de Liberdade	1
Valor p	0,0532

Fonte: Autor, 2024

Tabela 81 – Intervalos de confiança para o desvio padrão (Resistência à compressão – 28 dias Ar *versus* Obra)

Fator	Limite Inferior	Desvio Padrão	Limite Superior
Ar	5,8696	8,5081	14,6969
Obra	3,6149	5,2398	9,0513

Fonte: Autor, 2024

Na Tabela 82, Tabela 83, Tabela 84 e na Tabela 85 são descritos os resultados do teste de *Bartlett* para os dados de resistência à compressão aos 7 dias e 28 dias (Úmida *versus* Obra), bem como os intervalos de confiança para o desvio padrão, respectivamente. Mediante os resultados do valor p obtidos no teste, existe

homocedasticidade entre os grupos analisados com relação à propriedade de resistência à compressão aos 7 dias (Úmida *versus* Obra) e não existe homocedasticidade entre os grupos analisados com relação à propriedade de resistência à compressão aos 28 dias (Úmida *versus* Obra).

Tabela 82 – Resultados do teste de homocedasticidade (Resistência à compressão – 7 dias Úmida *versus* Obra)

Informação	Valor
<i>Bartlett</i> (estatística do teste)	0,9802
Graus de Liberdade	1
Valor p	0,3222

Fonte: Autor, 2024

Tabela 83 – Intervalos de confiança para o desvio padrão (Resistência à compressão – 7 dias Úmida *versus* Obra)

Fator	Limite Inferior	Desvio Padrão	Limite Superior
Obra	3,5935	5,2088	8,9978
Úmida	2,8131	4,0777	7,0438

Fonte: Autor, 2024

Tabela 84 – Resultados do teste de homocedasticidade (Resistência à compressão – 28 dias Úmida *versus* Obra)

Informação	Valor
<i>Bartlett</i> (estatística do teste)	8,3207
Graus de Liberdade	1
Valor p	0,0039

Fonte: Autor, 2024

Tabela 85 – Intervalos de confiança para o desvio padrão (Resistência à compressão – 28 dias Úmida *versus* Obra)

Fator	Limite Inferior	Desvio Padrão	Limite Superior
Obra	3,6149	5,2398	9,0513
Úmida	7,5764	10,982	18,9704

Fonte: Autor, 2024

Feita a comparação valendo-se do teste t, com um nível de significância de 0,05, é possível afirmar que médias de resistência à compressão aos 7 dias e aos 28 dias, respectivamente, entre o tipo de cura ao ar (Laboratório) e o local obra (Campo) são iguais, como mostrado na Tabela 86 e na Tabela 87. Isto demonstra que, no contexto dos experimentos realizados, as condições climáticas seja com o fator concretos curados no laboratório (Laboratório de Materiais da UFAL) – cura ao ar – e

com o fator concretos curados no campo (Cidade de São Miguel dos Milagres) – obra – não produziu alterações significativas na média dos resultados de resistência à compressão aos 7 dias e aos 28 dias, para as dosagens estudadas.

Tabela 86 – Resultados do teste t (Resistência à compressão – 7 dias Laboratório (cura ao ar) *versus* Campo (obra))

Informação	Valor
T	1,7112
Graus de Liberdade	34
Valor p	0,0961
Média no grupo 1:	34,9667
Média no grupo 2:	32,3988
Média 1 - Média 2:	2,5679
Desvio padrão amostral do grupo 1:	3,6606
Desvio padrão amostral do grupo 2:	5,2088
Desvio padrão agrupado:	4,5018
Hipótese Alternativa: Diferente de	0
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	-0,4817
Limite Superior	5,6174

Fonte: Autor, 2024

Tabela 87 – Resultados do teste t (Resistência à compressão – 28 dias Laboratório (cura ao ar) *versus* Campo (obra))

Informação	Valor
T	1,5788
Graus de Liberdade	34
Valor p	0,1236
Média no grupo 1:	40,7556
Média no grupo 2:	37,0372
Média 1 - Média 2:	3,7183
Desvio padrão amostral do grupo 1:	8,5081
Desvio padrão amostral do grupo 2:	5,2398
Desvio padrão agrupado:	7,0655
Hipótese Alternativa: Diferente de	0
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	-1,0679
Limite Superior	8,5046

Fonte: Autor, 2024

De acordo com o teste t, para um nível de significância de 0,05, pode-se afirmar que não há diferença estatística entre as médias de resistência à compressão aos 7 dias e aos 28 dias, respectivamente, entre o tipo de cura úmida (Laboratório) e o local obra (Campo) são iguais, como mostrado na Tabela 88 e na Tabela 89. Isto demonstra que, no contexto dos experimentos realizados, as condições climáticas seja com o fator concretos curados no laboratório (Laboratório de Materiais da UFAL) – cura úmida – e com o fator concretos curados no campo (Cidade de São Miguel dos Milagres) – obra – não produziu alterações significativas na média dos resultados de resistência à compressão aos 7 dias e aos 28 dias, para as dosagens estudadas.

Tabela 88 – Resultados do t (Resistência à compressão – 7 dias Laboratório (Cura úmida) *versus* Campo (Obra))

Informação	Valor
T	0,8025
Graus de Liberdade	34
Valor p	0,4279
Média no grupo 1:	33,65
Média no grupo 2:	32,3988
Média 1 - Média 2:	1,2512
Desvio padrão amostral do grupo 1:	4,0777
Desvio padrão amostral do grupo 2:	5,2088
Desvio padrão agrupado:	4,6776
Hipótese Alternativa: Diferente de	0
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	-1,9175
Limite Superior	4,4199

Fonte: Autor, 2024

Tabela 89 – Resultados do teste t (Resistência à compressão – 28 dias Laboratório (Cura úmida) *versus* Campo (Obra))

Informação	Valor
T	0,6708
Graus de Liberdade	34
Valor p	0,5087
Média no grupo 1:	38,9611
Média no grupo 2:	37,0372
Média 1 - Média 2:	1,9239
Desvio padrão amostral do grupo 1:	10,982
Desvio padrão amostral do grupo 2:	5,2398
Hipótese Alternativa: Diferente de	0
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	-3,9908
Limite Superior	7,8386

Fonte: Autor, 2024

7 CONCLUSÃO

7.1 Consideração finais

O presente estudo explorou a substituição de agregados naturais graúdos (AN_g) por agregados reciclados mistos graúdos (ARM_g), com a intenção de elucidar a extensão das alterações nas características do concreto em seu estado fresco e em seu estado endurecido. Diante disso, por meio desta investigação, foram capturados *insights* sobre a interação entre substituição de agregados e desempenho, visando projetar dosagens com o uso de agregados reciclados que atendam aos padrões previstos para aplicações de concreto estrutural.

Mediante a pior situação em termos da dosagem com o uso de ARM_g , sendo essa equivalente à resistência à compressão média aos 28 dias de 46,6 MPa (equivalente a um f_{ck} de 40 MPa), nenhum dos concretos obtiveram resultados iguais/acima do mínimo da dosagem, tanto os curados no laboratório de estruturas e materiais (LEMA) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL) – cura ao ar e cura úmida – quanto os curados na cidade de São Miguel dos Milagres – posicionados em ambiente marinho, com distância para a costa de 199 m. Entretanto, os concretos com 20% de ARM_g e 20% de MK foram os que chegaram mais próximos do valor de f_{cj} , demonstrando a melhoria nessa propriedade causada pelo uso de metacaulim.

A análise estatística dos resultados de resistência à compressão aos 7 dias dos concretos do laboratório curados ao ar demonstrou que, para as dosagens estudadas – 20% e 50% de ARM_g –, o uso de ARM_g e de MK (20% de substituição ao cimento) não produziu alterações expressivas nos resultados frente ao concreto convencional (FC). Todavia, esse resultado não se repetiu na resistência à compressão aos 28 dias, já que apenas o concreto convencional com MK (FC2) teve resultados equivalentes ao FC. Mediante a mesma comparação, os concretos com 20% (FC3) e 50% de ARM_g (FC5) tiveram resultados inferiores e, embora o uso de MK (FC4 e FC6, respectivamente) aumentou seus resultados, ainda assim eles são reduzidos frente ao concreto convencional (FC).

A análise estatística dos resultados de resistência à compressão aos 7 dias dos concretos do laboratório curados em meio úmido demonstrou que, para as dosagens estudadas, apenas o concreto convencional com MK (FC2), o concreto com 20% de ARM_g (FC3) e sua versão com MK (FC4) tiveram resultados próximos aos do concreto

convencional (FC). Ao fazer essa mesma comparação aos 28 dias de resistência à compressão, apenas FC2, FC3 e FC4 possuem resultados equivalentes a FC. Isso demonstra que o percentual elevado de 50% de ARM_g – sem (FC5) e com MK (FC6) – em concretos curados em meio úmido, prejudicou a resistência à compressão aos 7 dias e aos 28 dias dos concretos estruturais.

Considerando um nível de confiança de 95%, os resultados de absorção de água por capilaridade às 24 h aos 28 dias de cura (tanto na cura ao ar quanto na cura úmida) não tiveram alterações significativas, frente ao concreto convencional (FC), ao substituir parcialmente o AN_g por 20% (FC3) e 50% de ARM_g (FC5) – incluindo suas versões com 20% de MK substituído parcialmente ao cimento (FC4 e FC6) nos concretos. Isso significa que tanto o MK quanto o ARM_g, para as dosagens estudadas, não produziram alterações nos resultados dessa propriedade.

Ao analisar estatisticamente os dados de resistência à compressão quanto ao tipo de cura (cura ao ar *versus* cura úmida) como um todo, é notório que os resultados dessa propriedade são equivalentes em ambas as idades de cura (7 e 28 dias), significando que o fator “tipo de cura”, no contexto dos experimentos realizados, não produziu mudanças relevantes na propriedade estudada. Esse resultado é repetido ao analisar a propriedade de absorção de água por capilaridade, às 24 h aos 28 dias de cura, nessa mesma comparação estatística (cura ao ar *versus* cura úmida), onde os resultados são equivalentes entre os tipos de cura.

Com relação a análise estatística de resistência à compressão aos 7 dias de cura (exposto em uma obra na cidade de São Miguel dos Milagres) é visto que, o uso de 20% (FC3) e 50% de ARM_g (FC5) – e também suas contrapartes com 20% de MK (FC4 e FC6, respectivamente) – não produziram alterações nos resultados dessa propriedade. Portanto, isso significa que o ARM_g e o MK não influenciaram essa propriedade, dentro do contexto empregado na pesquisa. Em contraponto a esses dados de 7 dias, os de resistência à compressão aos 28 dias (exposto em uma obra na cidade de São Miguel dos Milagres) tem apenas o concreto FC5 com resultados médios que diferem negativamente ao FC. Isso demonstra o efeito positivo do MK nos concretos com uso de ARM_g, pois com o seu uso (FC6), o resultado dele ficou equivalente a FC.

Mediante a análise estatística da propriedade de resistência à compressão (7 e 28 dias) quanto ao tipo de cura ao ar (Laboratório) e local obra (Campo), ambos como um todo no contexto dos experimentos realizados, foi perceptível que as condições climáticas, seja no LEMA (cura ao ar – cidade de Maceió) ou na obra (cidade de São Miguel dos Milagres), não realizaram alterações significativas nos resultados dessa propriedade. Esse resultado se repetiu na comparação do “LEMA (cura úmida – cidade de Maceió) com a obra (cidade de São Miguel dos Milagres) no âmbito de resistência à compressão aos 7 dias e aos 28 dias.

Diante do exposto, pode-se resumir que:

- o tipo de cura não influenciou nos resultados de resistência à compressão aos 7 dias e aos 28 dias e, também não influenciou nos resultados de absorção de água por capilaridade aos 28 dias às 24 h de absorção;
- as condições climáticas diferentes entre o LEMA (cidade de Maceió) e o canteiro de obra (Cidade de São Milagres) não influenciaram nos resultados de resistência à compressão aos 7 dias e aos 28 dias;
- o metacaulim influenciou positivamente na resistência à compressão aos 7 e aos 28 dias dos concretos com uso de ARM_g e também na diminuição da absorção de água por capilaridade. A melhoria da resistência à compressão acontece devido ao aumento da produção de C-S-H nos concretos. No entanto, sabe-se que como o metacaulim é uma pozolana, e essa influência na resistência à compressão poder ser ainda mais expressiva em idades mais avançadas. Por fim, a redução da absorção de água por capilaridade acontece devido ao aumento de teor de finos causado pelo uso do metacaulim.

Quanto às propriedades no estado fresco, em função do uso do aditivo superplastificante e da pré-molhagem dos agregados reciclados com 80% da água de absorção deles, quase todos os concretos produzidos com ARM_g (20% e 50%) tiveram resultados satisfatórios quanto ao abatimento, podendo esses ser lançados manualmente ou bombeados e, dessa forma, são diversas as situações em que eles poderão ser aplicados. Apenas o concreto com 50% de ARM_g com MK apresentou abatimento reduzido, provavelmente em função da alta absorção de água do ARM_g e do alto teor de finos do MK.

7.2 Sugestão para trabalhos futuros

Buscando perpetuar as investigações conduzidas na presente pesquisa, propõe-se que os assuntos subsequentes sejam abordados em futuras investigações acadêmicas:

- Utilizar outros métodos de dosagem com agregados reciclado mistos, a exemplo da norma europeia *EN 206-1* e do método de dosagem IPT;
- Investigar o desempenho, acima de 28 dias, em concretos com ARM e MK;
- Realizar estudo equivalente com agregado reciclado misto e/ou agregado reciclado cimentício em outras porcentagens de substituição, entretanto, é recomendado um tratamento prévio desses agregados. Dessa forma, a qualidade deles será mais aproximada dos agregados naturais;
- Analisar a durabilidade de concretos com uso de ARM;
- Realizar um detalhamento microscópico através de análise de microscopia eletrônica de varredura para interpretar, com maior entendimento, a zona de transição do agregado reciclado misto graúdo;
- Analisar a viabilidade econômica, quanto à economia circular, logística reversa e Marketing Verde, da utilização dos traços estudados na presente pesquisa.

REFERÊNCIAS

ABCP ONLINE – PALESTRA GRATUITA. Dosagem do concreto pelo método ABCP. 2023. Disponível: < <https://abcp.org.br/download/>> Acesso em: 28 jun. 2023.

ABERA, Yonatan (Shanko) Ayele. Performance of concrete materials containing recycled aggregate from construction and demolition waste. **Results in Materials**, v. 14, n. 100278, p. 1-11, jun./2022.

ABRECON – Associação Brasileira para a Reciclagem de RCD. Relatório Pesquisa Setorial 2014/2015. 2015. Disponível: < <https://abrecon.org.br/documentos-e-informa/relatorio-pesquisa-setorial-abrecon/>> Acesso em: 6 out. 2023.

ABRECON – Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil. O que é entulho?. 2023a. Disponível: < <https://abrecon.org.br/entulho#:~:text=Entulho%20%C3%A9%20o%20conjunto%20de,como%20pr%C3%A9dios%2C%20resid%C3%A2ncias%20e%20pontes.>> Acesso em: 29 set. 2023.

ABRECON – Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil. Tabela CONAMA. 2023b. Disponível: < https://abrecon.org.br/?jet_download=MTI0NDE5MzQ0Mjc5OTg5Nzc3MDEwMjc2NDIzMDkwOQ=> Acesso em: 29 set. 2023.

ABRELP. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil. 2022. Disponível: < <https://www.abrema.org.br/download/90935/?tmstv=1718136285/>> Acesso em: 01 out. 2023.

ABREMA. PANORAMA. 2024. Disponível: < <https://www.abrema.org.br/download/96475/?tmstv=1733786378>> Acesso em: 03 fev. 2025.

ADAMS, K.; THORNBACK, J. How Much Waste Is Produced by the Construction Sector? (Construction Waste–How Much Is There?) CPA UK. 2022. Disponível: < <https://www.constructionproducts.org.uk/media/557062/how-much-construction-waste-is-there.pdf>> Acesso em: 12 jul. 2024.

AFROZ, Rafia; MASUD, Muhammad Mehedi. Using a contingent valuation approach for improved solid waste management facility: Evidence from Kuala Lumpur, Malaysia. **Waste Manage**, v. 31, n. 4, p. 800-808, abr./2011.

AGRELA, F.; ROSALES, M.; CUENCA-MOYANO, G.; LÓPEZ-ALONSO, M.; ORDÓÑEZ, J. Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost Analysis of Concrete Pavements made with Mixed Recycled Aggregates and Olive Biomass Bottom Ash. In: II INTERNATIONAL CÓRDOBA ECO-CONCRETE CONFERENCE, 2023, Cordoba. **Proceedings...** Spain: Universidad de Córdoba, 2023. p. 93-99.

AGRELA, Francisco; GONZÁLEZ-GALLARDO, Francisco, ROSALES, Julia; TAVIRA, Javier; AYUSO, Jesús; CABRERA, Manuel. Complete Real-Scale Application of Recycled Aggregates in a Port Loading Platform in Huelva, Spain. **Materials**, v. 13, n. 2651, p. 1- 21, 2020.

ALMUSAWI, Mohammed Baqer Hasan; KARIM, AhmadTarmizi Bin Abd; ETHAIB, Saleem. Evaluation of Construction and Demolition Waste Management in Kuwait. **Recycling**, v. 7, n. 88, p. 1-17, nov./2022.

AL-RAQEB, H.; GHAFFAR, S. H.; AL-KHEETAN, M.; CHOUGAN, M. Understanding the challenges of construction demolition waste management towards circular construction: Kuwait Stakeholder's perspective. **Cleaner Waste Systems**, v. 4, n. 100075, p. 1-8, jan./2023.

AMERICAN PUBLIC HEALTH OF WATER AND WASTEWATER (APHA). **Standard method for the examination of water and wastewater**. 23^a ed. Washington: America Public Heath Association, Washington, D.C. 2017.

AMIRI, Mohammad Javad; ASADBEIGI, Mehdi. Life Cycle Assessment of Construction and Demolition Waste Management in Tehran, Iran. **Environmental Energy and Economic Research**, v. 8, n. 1, p. 1-12, 2024.

AMORIM JUNIOR, N. S.; SILVA, G. A. O.; DIAS, C. M. R.; RIBEIRO, D. V. Concrete containing recycled aggregates: Estimated lifetime using chloride migration test. **Construction and Building Materials**, v. 222, p. 108-118, out./2019.

ANDAL, Jonathan; SHEHATA, Medhat; ZACARIAS, Philip. Properties of concrete containing recycled concrete aggregate of preserved quality. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 842-855, out./2016.

ANDRADE FILHO, P. E. S. **Comportamento de ligações aço-concreto reciclado por meio de adesivos**. Dissertação de mestrado - São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, 2021.

ANDRADE, Jairo José de Oliveira; POSSAN, Edna; SQUIAVON, Jéssica Zamboni; ORTOLAN, Tiago Luis Possebon. Evaluation of mechanical properties and carbonation of mortars produced with construction and demolition waste. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 70-83, fev./2018.

ANGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**. 2005. 236 f. Tese (Doutor em Engenharia). Universidade de São Paulo, São Paulo. 2005.

ANGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. 2000. 172 f. Dissertação (Mestre em Engenharia de Construção Civil e Urbana). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2000.

ANGULO, Sergio Cirelli; ULSEN, Carina. **Resíduos de construção e demolição: fundamentos sobre gestão e reciclagem**. São Paulo: EPUSP, 2023.

ANTONI, M.; ROSSEN, J.; MARTIRENA, F.; SCRIVENER, K. Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 12, p. 1579-1589, 2012.

ARAIZA-AGUILAR, Juan Antonio; GUTIÉRREZ-PALACIOS, Constantino; ROJAS-VALENCIA, María Neftali; NÁJERA-AGUILAR, Hugo Alejandro; GUTIÉRREZ-HERNÁNDEZ, Rubén Fernando; AGUILAR-VERA, Rodrigo Antonio. Selection of Sites for the Treatment and the Final Disposal of Construction and Demolition Waste, Using Two Approaches: An Analysis for Mexico City. **Sustainability**, v. 11, n. 4077, jul./2019.

ASGARI, Alireza; GHORBANIAN, Tahereh; YOUSEFI, Nader; DADASHZADEH, Dariush; KHALILI, Fatemeh; BAGHERI, Amin; RAEI, Mehdi; MAHVI, Amir Hossein. **Journal of Environmental Health Science & Engineering**, v. 15, n. 14, p. 1-8, 2017.

ASLAM, Muhammad Shahzad; HUANG, Beijia; CUI, Lifeng. Review of construction and demolition waste management in China and USA. **Journal of Environmental Management**, v. 264, n. 110445, p. 1-17, jun./2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5564**: Via férrea – Lastro ferroviário – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2021a.

_____. **NBR 5738**: Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 5739**: Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018a.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2023.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2022a.

_____. **NBR 7218**: Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2010a.

_____. **NBR 7809**: Agregado graúdo — Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais — Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2013.

_____ **NBR 9833:** Concreto fresco — Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2009a.

_____ **NBR 9917:** Agregados para concreto — Determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022b.

_____ **NBR 10157:** Aterros de resíduos perigosos - Critérios para projeto, construção e operação - Procedimento. Rio de Janeiro, 1987.

_____ **NBR 12655:** Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2022c.

_____ **NBR 13896:** Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 1997.

_____ **NBR 15112:** Resíduos da construção civil e resíduos volumosos - Áreas de transbordo e triagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004a.

_____ **NBR 15113:** Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes - Aterros - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004b.

_____ **NBR 15114:** Resíduos sólidos da Construção civil - Áreas de reciclagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004c.

_____ **NBR 15116:** Agregados reciclados para uso em argamassa e concretos de cimento Portland — Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2021b.

_____ **NBR 15849:** Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento. Rio de Janeiro, 2010b.

_____ **NBR 15894-1:** Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2010c.

_____ **NBR 16697:** Cimento Portland — Requisitos. Rio de Janeiro, 2018b.

_____ **NBR 16886:** Concreto — Amostragem de concreto fresco. Rio de Janeiro, 2020a.

_____ **NBR 16889:** Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020b.

_____ **NBR 16915:** Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, 2021c.

_____ **NBR 16916:** Agregado miúdo — Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021d.

_____ **NBR 16917:** Agregado graúdo — Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021e.

_____**NBR 16972:** Agregados — Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021f.

_____**NBR 16973:** Agregados — Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro, 2021g.

_____**NBR 16974:** Agregados — Ensaios de resistência ao impacto e à abrasão *Los Angeles*. Rio de Janeiro, 2022d.

_____**NBR 17054:** Agregados — Determinação da composição granulométrica — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022e.

ATABI, K. L.; REIG-CERDÁ, L.; COLOMER-MENDOZA, F. J. Categorization and Quantification of Construction Waste of Commercial Buildings in Iraq. In: III INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTECHNICAL ENGINEERING AND ENERGETIC-IRAQ (ICGEE), 2023, Baghdad. **Proceedings...** Iraq: University of Baghdad, 2023. p. 1-6.

Auckland Council. Auckland's Waste Assessment 2017. 2017. Disponível: < <https://www.aucklandcouncil.govt.nz/plans-projects-policies-reports-bylaws/our-plans-strategies/topic-based-plans-strategies/environmental-plans-strategies/docswastemanagementplan/waste-assessment-2017.pdf>> Acesso em: 19 jun. 2024.

BAHRAMI, N. *et al.* Optimum recycled concrete aggregate and micro-silica content in self-compacting concrete: Rheological, mechanical and microstructural properties. **Journal of Building Engineering**, v. 31, set./2020.

BANTHIA, N.; CHAN, C. Use of recycled aggregate in plain and fiber-reinforced shotcrete. **Concrete International**, v. 22, n. 6, p. 41-45, jun./2000.

BARBUDO, Auxi; LOZANO-LUNAR, Angélica; LÓPEZ-UCEDA, Antonio; GALVÍN, Adela P.; AYUSO, Jesús. Photocatalytic Recycled Mortars: Circular Economy as a Solution for Decontamination. **Applied sciences**, v. 10, n. 7305, p. 1-18, out./2020.

BARHMAIAH, B.; PRIYANKA, M. L.; PADMAKAR, M. Strength analysis and validation of recycled aggregate concrete. **Materials Today: Proceedings**, v. 37 part 2, p. 2312-2317, 2021.

BARROSO, M.; SÁEZ DEL BOSQUE, I.F; MEDINA, G; JIMÉNEZ, M; MEDINA C. Mixed Recycled Aggregates in the Sustainable Ecoconcrete Industry. In: II INTERNATIONAL CÓRDOBA ECO-CONCRETE CONFERENCE, 2023, Cordoba. **Proceedings...** Spain: Universidad de Córdoba, 2023. p. 42-46.

BASTOS, David; FARINHA, Catarina Brazão; PEDERNEIRAS, Cinthia Maia; VEIGA, Rosário; BOGAS, José Alexandre; GOMES, Ricardo Infante; SILVA, António Santos. CO2 uptake by recycled aggregates obtained from construction and demolition waste. **SSRN (preprint article)**, p. 1-39, nov. 2023.

BATISTA, Bruna Caroline Campos; SILVA, Áquila Blance Bastos Martins; NOÉ, Amanda Freitas; LOPES, Raduan Krause; CHRISTOFORO, André Luis; ALMEIDA, Diego Henrique. Influência da adição de RCD misto na resistência à compressão e na porosidade de argamassa. **Revista principia**, v. 59, n. 3, p. 1-13, set./2022.

BAZAZ, Jafar Bolouri; KHAYATI, Mahmood. Properties and Performance of Concrete Made with Recycled Low-Quality Crushed Brick. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 24, n. 4, p. 330-338, 2012.

BBC News Brasil. Por que a Palestina não é um país; resumo. 2023. Disponível: < <https://www.bbc.com/portuguese/articles/cw4d3940g8do/>> Acesso em: 20 jun. 2024.

BEHERA, M.; BHATTACHARYYA, S. K.; MINOCHA, A. K.; DEOLIYA, R.; MAITI, S. Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete - A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 501–516, out./2014.

BEKTAS, F.; WANG, K.; CEYLAN, H. Effects of crushed clay brick aggregate on mortar durability. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 5, p. 1909-1914, mai./2009.

BERGSDAL, Håvard; BOHNE, Rolf André; BRATTEBØ, Helge. Projection of Construction and Demolition Waste in Norway. **Journal of Industrial Ecology**, v. 11, n. 3, p. 27-39, 2008.

BIDABADI, Mehran Shirani; AKBARI, Mahmood. PANAHI, Omid. Optimum mix design of recycled concrete based on the fresh and hardened properties of concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 32, n. 101483, nov./2020.

BIGDELOO, S.; MOUSAVI, S. H.; MOEINADDINI, M.; OMRANI, G.; MIRZAHOSEINI, A. Study of the amount and composition of construction and demolition wastes in the Karaj City. **J. Environ. Res. Technol**, v. 6, n. 6, p. 1-10, 2020.

BONDAR, D.; NANUKUTTAN, S.; PROVIS, J. L.; SOUTSOS, M. Efficient mix design of alkali activated slag concretes based on packing fraction of ingredients and paste thickness. **Journal of Cleaner Production**, v. 218, p. 438-449, mai./2019.

BORGES, Pietra Moraes; SCHIAVON, Jéssica Zamboni; SILVA, Sérgio Roberto; RIGO, Eduardo; NEVES JUNIOR, Alex; POSSAN, Edna; ANDRADE, Jairo José Oliveira. Mortars with recycled aggregate of construction and demolition waste: Mechanical properties and carbon uptake. **Construction and Building Materials**, v. 387, n. 131600, p. 1-13, mai./2023.

BRASIL. **Lei nº 12.305, em 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, Casa Civil, Superintendência para Assuntos Jurídicos, 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 30 set. 2023.

BRASIL. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília: MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, Secretaria de Qualidade Ambiental. Brasília, 2020. 187 f.

BRASIL. **Resolução Conama nº 307**, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Diário Oficial da União, Brasília, n. 136, p. 95-96, 17 jul. 2002.

BRASIL. **Resolução Conama nº 469**, de 29 de julho de 2015. Altera a Resolução CONAMA n 307, de 05 de julho de 2002, que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Diário Oficial da União, Brasília, Publicação DOU, de 30/07/2015, páginas 109 e 110.

BRAVO, Miguel; BRITO, Jorge; PONTES, Jorge; EVANGELISTA, Luís. Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants. **Journal of Cleaner Production**, v. 99, p. 59-74, jul./2015a.

BRITO, J.; AGRELA, F.; SILVA, R.V. Construction and demolition waste. In *Newtrends in Eco-Efficient and Recycled Concrete*; BRITO, J., AGRELA, F., Eds. **Woodhead Publishing**: Amsterdam, The Netherlands, 2019; Volume 1, pp. 1–22.

BROUJENI, B. R.; OMRANI, G. A.; NAGHAVI, R.; AFRASEYABI, S. S. Construction and Demolition Waste Management (Tehran Case Study). **Engineering, Technology and Applied Science Research**, v. 6, n. 6, p. 1249-1252, dez./2016.

BULHÕES, J. A. **Colapso urbano? Narrativas de moradores do Pinheiro sobre a subsidência do solo em Maceió-AL**. 2022. 127 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Arquitetura e Urbanismo). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2022.

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. 2007. 280 f. Tese (Doutorado em Ciência da Engenharia), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CACHIM, P. B. Mechanical properties of brick aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 3, p. 1292-1297, mar./2009.

Cámara Colombiana de La Construcción - CAMACOL. 2017. Disponível: <<https://camacol.co/>> Acesso em: 20 jun. 2024.

Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). Guide for Identifying, Evaluating and Selecting Policies for Influencing Construction, Renovation and Demolition Waste Management. 2019. Disponível: <<https://www.ccme.ca/en/res/crdguidance-secured.pdf>> Acesso em: 11 mai. 2024.

CANTERO, B.; DEL BOSQUE, I.S.; MATÍAS, A.; DE ROJAS, M.S.; MEDINA, C. Inclusion of construction and demolition waste as a coarse aggregate and a cement addition in structural concrete design. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 19, n. 4, p. 1338-1352, ago./2019.

CANTERO, B.; DEL BOSQUE, I.S.; MATÍAS, A.; MEDINA, C. Statistically significant effects of mixed recycled aggregate on the physicalmechanical properties of structural concretes. **Construction and Building Materials**. v. 185, p. 93–101, out./2018.

CANTERO, Blas; BRAVO, Miguel; BRITO, Jorge; SÁEZ DEL BOSQUE, Isabel Fuencisla; MEDINA, César. Thermal Performance of Concrete with Recycled Concrete Powder as Partial Cement Replacement and Recycled CDW Aggregate. **Applied Sciences**, v. 10, n. 4540, p. 1-18, 2020.

CANTERO, Blas; BRAVO, Miguel; BRITO, Jorge; SÁEZ DEL BOSQUE, Isabel Fuencisla; MEDINA, César. Assessment of the Permeability to Aggressive Agents of Concrete with Recycled Cement and Mixed Recycled Aggregate. **Applied Sciences**, v. 11, n. 3856, p. 1-17, 2021a.

CANTERO, Blas; SAINTZ-AJA, Jose; YORIS, Adrian; MEDINA, César; THOMAS, Carlos. Resonance Fatigue Behaviour of Concretes with Recycled Cement and Aggregate. **Applied Sciences**, v. 11, n. 5045, p. 1-19, 2021b.

CARASEK, H.; GIRARDI, A.C.C.; ARAÚJO, C.; ANGELIM, R.; CASCUDO, O.; Estudo e avaliação de agregados reciclados de resíduo de construção e demolição para argamassas de assentamento e de revestimento. **Cerâmica**, v. 64, p. 288-300, 2018.

CARNEIRO, J. A. **Uso de agregado reciclado e fibras de aço em concreto simples e concreto armado sob flexão**. 2011. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2011.

CARTUXO, F. et al. Rheological behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates – Influence of the superplasticizer. **Construction and Building Materials**, v. 89, p. 36-47, 1 ago. 2015.

CASTAÑO-CARDOZA, Taimí; LINSEL, Stefan; ALUJAS-DIAZ, Adrián; OROZCO-MORALES, Rubén; MARTIRENA-HERNÁNDEZ, José Fernando. Influence of very fine fraction of mixed recycled aggregates on the mechanical properties and durability of mortars and concretes. **Revista Facultad de Ingeniería del la Universidad de Antioquia**. n. 81, p. 81-92, fev./2016.

CASTRO, A. L. de. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. 2007. 302 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

Central Intelligence Agency (CIA). WFB – Explore All Countries Cuba Central America and the Caribbean. 2024. Disponível: < <https://www.cia.gov/the-world-factbook/countries/cuba/#people-and-society/>> Acesso em: 25 jun. 2024.

Central Statistical Bureau (CSM). Kuwait population estimation. 2021. Disponível: < <https://www.csb.gov.kw/>> Acesso em: 20 jun. 2024.

CHEN, H. J.; YEN, T.; CHEN, K. H. Use of building rubbles as recycled aggregates. **Cement and Concrete Research**. v. 33, n. 1, p. 125-132, 2003.

CHEN, Xiaoguang; GRUYAERT, Elke; CIZER, Özlem; LI, Jiabin. The effect of water absorption distribution of recycled coarse aggregate on the compressive strength distribution of high-performance concrete. **Materiales de Construcción**, v. 73, n. 352, p. 1-13, out./dez. 2023.

CHOWDHURY, F.; RAIHAN, M.; ISLAM, G. M.; RAMIZ, F. Construction Waste Management Practice: Bangladesh Perception. In: 3rd International Conference on Advances in Civil Engineering 2016 (ICACE 2016), 2016, Chittagong. **Proceedings...** Bangladesh: Chittagong University of Engineering & Technology, 2016. p. 1-7.

COLORADO, H. A.; MUÑOZ, A.; MONTEIRO, S. N. Circular Economy of Construction and Demolition Waste: A Case Study of Colombia. **Sustainability**, v. 14, n. 7225, p. 1-18, jun./2022.

CORDEIRO, L. N. P. **Análise dos parâmetros principais que regem a variabilidade de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto**. 2013. 127 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

CORDEIRO, L. N. P.; MASUERO, A. B.; DAL MOLIN, D. C. C.; SOUZA, P. S. L.; PAES, I. N. L. Avaliação de processos de misturas de concretos com agregados graúdos reciclados. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 3, p. 255-265, 2017.

COSTA, M. S. R. **Propriedades mecânicas e durabilidade de concretos produzidos com agregados miúdos reciclados e metacaulim dosados pelo modelo de empacotamento compressível**. 2021. 121 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

CSN Cimentos. Relatório de ensaios de Cimento. 2023. Disponível: < <https://www.csn.com.br/homepage/cimentos/>> Acesso em: 16 jun. 2023.

DAOUD, A. O. E. **Materials Procurement Conceptual Framework for Minimising Waste in the Egyptian Construction Industry**. 2021. 319 f. Tese (Doutor em Filosofia), Universidade South Bank de Londres, Inglaterra, 2021.

DE BRITO, J.; AGRELA, F.; SILVA, R. V. **Construction and demolition waste**. Elsevier Ltd, 2018.

Deloitte. Study on Resource Efficient Use of Mixed Wastes, Improving management of construction and demolition waste—Final Report. 2017. Disponível: < <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/78e42e6c-d8a6-11e7-a506-01aa75ed71a1/language-en#>> Acesso em: 19 jun. 2024.

Department for Environment (DE) FRA- UK Government. Statistics on waste statistical notice. 2015. Disponível: < https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/487916/UK > Acesso em: 24 jun. 2024.

DIAS, Adriana; NEZAMI, Salem; SILVESTRE, José; KURDA, Rawaz; SILVA, Rui; MARTINS, Isabel; DE BRITO, Jorge. Environmental and Economic Comparison of Natural and Recycled Aggregates Using LCA. **Recycling**, v. 7, n. 43, p. 1-13, jun./2022.

Dillon Consulting, Metabolic & Summit72. Material Flows in the CRD Sector in Guelph-Wellington: A Material Flow Analysis. Circular Opportunity Innovation Launchpad (COIL). 2023. Disponível: < https://coil.eco/wp-content/uploads/2022/12/Guelph-Wellington_MaterialFlowAnalysis_Report_FINAL.pdf> Acesso em: 11 mai. 2024.

DUAN, H.; MILLER, T. R.; LIU, G.; TAM, V. W. Y. Construction debris becomes growing concern of growing cities. **Waste management**, v. 83, p. 1-5, 2019.

ECKERT, Matthias; OLIVEIRA, Miguel. Mitigation of the negative effects of recycled aggregate water absorption in concrete technology. **Construction and Building Materials**, v. 133, p. 416-424, fev./2017.

Egyptian Ministry of Environment (EMoE). Report on the Environment Status - Egypt 2016. 2017. Disponível: < <https://www.devex.com/organizations/ministry-of-environment-moe-egypt-124141>> Acesso em: 19 jun. 2024.

EL-DESOUKY, A. M.; IBRAHIM, M. E.; ELDIEB, A. S. Estimating Material Waste in the Building Construction in Egypt. **Al-Azhar University Civil Engineering Research Magazine (CERM)**, v. 40, n. 3, p. 371–381, 2018.

ELHAKAM, Ali Abd; MOHAMED, Abd Elmoaty; AWAD, Eslam. Influence of self-healing, mixing method and adding silica fume on mechanical properties of recycled aggregates concrete. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 421-427, out./2012.

ETXEBERRIA, M.; GONZALEZ-COROMINAS, A. The assessment of ceramic and mixed recycled aggregates for high strength and low shrinkage concretes. **Materials and Structures**, v. 51, n. 129, 2018.

ETXEBERRIA, M.; VÁZQUEZ, E.; MARI, A. R.; BIZINOTTO, M. B. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**. v. 37, n. 5., p. 735-742, 2007.

European Commission (EC). Service Contract on Management of Construction and Demolition Waste: SR1, prepared by Bio Intelligence Services. 2011. Disponível: < https://environment.ec.europa.eu/document/download/22239ead-82d4-42fb-86dc-d202d5f40507_en?filename=2011_CDW_Report_0.pdf> Acesso em: 12 jul. 2024.

European Environmental Agency - European Union. Project – BlockWaste. 2022. Disponível: < <https://blockwasteproject.eu/project/>> Acesso em: 12 jul. 2024.

FADIYA, Olusanjo O; GEORGAKIS, Panos; CHINYIO, Ezekiel. Quantitative Analysis of the Sources of Construction Waste. **Journal of Construction Engineering**: Hindawi Publishing Corporation, United Kingdom, p. 1- 9, set./out. 2014.

FATEMI, Nawrose. Strategies to Reduce Construction and Demolition (C&D) Waste for Sustainable Building Design in Dhaka: Role of Architects. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON ARCHITECTURE: EDUCATION, PRACTICE AND RESEARCH, 2012, Dhaka. **Proceedings...** Bangladesh: Vilnius Gediminas Technical University, 2012. p. 543-550.

FERNANDES, B. C. M. **A utilização de resíduos da construção civil e demolição – rcd – como agregado para o concreto**. UNIFOR, Formiga, MG, 2015.

FERNÁNDEZ, I. M. **Estudio económico y ambiental del cambio de La gestión de residuos de construcción y Demolición en la ciudad de la habana**. 2012. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, Espanha, 2012.

FERRÁNDEZ, D.; SAIZ, P.; MORÓN, C.; DÍAZ, J. P. Research of recycled mortars behaviour towards impact noise. **Informes de la Construcción**, v. 71, n. 554, p. 1-9, abri-jun./2019.

FERRÁNDEZ, Daniel; SAIZ, Pablo; ZARAGOZA-BENZAL, Alicia; ZÚÑIGA-VICENTE, Jose Angel. Towards a more sustainable environmentally production system for the treatment of recycled aggregates in the construction industry: An experimental study. **Heliyon**, v. 9, n. e16641, p. 1-16, 2023.

FERREIRA, L.; BARRA, M.; DE BRITO, J. Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties. **Magazine of Concrete Research**, v. 63, n. 8, p. 617–627, 2011.

FERREIRA, R. L. S.; ANJOS, M. A. S.; LEDESMA, E. F.; PEREIRA, J. E. S.; NOBREGA, A. K. C. Evaluation of the physical-mechanical properties of cement-lime based masonry mortars produced with mixed recycled aggregates. **Materiales de Construcción**. v. 70, n. 337, p. 1-14, jan./mar., 2020.

FERREIRA, R. L. S.; ANJOS, M. A. S.; NÓBREGA, A. K. C.; PEREIRA, J. E. S.; LEDESMA, E. F. The role of powder content of the recycled aggregates of CDW in the behavior of rendering mortars. **Construction and Building Materials**, v. 208, p. 601- 612, 2019.

FERRONATO, Navarro; SIRPA, Rocio Clara Fuentes; LIZARAZU, Edith Gabriela Guisbert; CONTI, Fabio; TORRETTA, Vincenzo. Construction and demolition waste recycling in developing cities: management and cost analysis. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, p. 24377–24397, 2023.

FIGUEIRÊDO FILHO, J. G. L. **Avaliação da trabalhabilidade de concreto contendo agregado reciclado de argamassa**. 2011. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2011.

FIGUEIREDO, Nathália; VARGAS, Alexandre. Análise da influência do uso de agregados reciclados da região de criciúma/sc nas propriedades mecânicas de concretos estruturais. **UNESC**: Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2016/02.

FIGUEIREDO, P. O. **Processos de cominuição de baixa energia para produção de agregado miúdo reciclado de concreto**. 2020. 116 f. Dissertação (Mestre em Ciências), Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, 2020.

FONSECA, A. P. **Estudo comparativo de concretos com agregado graúdo reciclado de telha cerâmica e agregado graúdo natural**. 2006. 223 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

FROTTE, C.; NÚBILA, C. S. A. D. **Estudo das propriedades de concretos com substituição parcial de agregado natural por RCD**. 2015. 87 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenheiro). Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

FROTTÉ, Camila; NUBILA, Clarisse Sophia Alejandra Di; NAGALLI, André; MAZER, Wellington; MACIOSKI, Gustavo; OLIVEIRA, Luna Ollin Steffen. Estudo das propriedades físicas e mecânicas de concreto com substituição parcial de agregado natural por agregado reciclado proveniente de RCD. **Revista Matéria**: Revista da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, v. 22, n. 2, 2017.

GARACH, Laura; LÓPEZ, Mónica; AGRELA, Francisco; ORDÓÑEZ, Javier; ALEGRE, Javier; MOYA, José Antonio. Improvement of Bearing Capacity in Recycled Aggregates Suitable for Use as Unbound Road Sub-Base. **Materials**, v. 8, p. 8804-8816, 2015.

GERIN, M.; SALES, A.; DE NARDIN. S. **Mechanical and physical properties of recycled aggregates concrete**. In: Revista Tecnológica, Universidade Estadual de Maringá. 2019.

GINGA, C. P.; ONGPENG, J. M. C.; DALY, M. K. M. Circular Economy on Construction and Demolition Waste: A Literature Review on Material Recovery and Production. **Materials**, v. 13, n. 13, p. 1-18, jul./2020.

GIRARDI, A. C. C. **Avaliação da substituição total de areia natural por rcd em revestimentos de argamassa**. 2016. 131 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil). Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

GOMES, H. C. **Agregados reciclados em concretos para a mitigação de impactos da indústria da construção civil**. 2021. 98 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia Civil, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Varginha, 2021.

GOMES, M.; BRITO, J. Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: durability performance. **Materials and Structures**, v. 42, n. 5, p. 663-675, 2009.

GOMES, M.; BRITO, J.; BRAVO, M. Mechanical Performance of Structural Concrete with the Incorporation of Coarse Recycled Concrete and Ceramic Aggregates. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 26, n. 10, nov./2013.

GÓMEZ-MEIJIDE, B.; PÉREZ, I.; PASANDÍN, A. R. Recycled construction and demolition waste in Cold Asphalt Mixtures: evolutionary properties. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, n. 1, p. 588-598, jan./2016.

GONÇALVES, M. S. **Análise da viabilidade técnica de utilização de resíduos de concreto oriundos da pré-fabricação como agregado graúdo para a produção de novos concretos**. 2011. 118 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil). Unidade Acadêmica de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2011.

GONZÁLEZ, Marcos Díaz; CABALLERO, Pablo Plaza; FERNANDEZ, David Blanco; VIDAL, Manuel Miguel Jordán; DEL BOSQUE, Isabel Fuencisla Sáez; MARTINEZ, César Medina. 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.

GONZALEZ-COROMINAS, A.; ETXEBERRIA, M. Properties of high performance concrete made with recycled fine ceramic and coarse mixed aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 618-626, out./2014.

Google Earth Pro. 2025. Disponível: < <https://www.google.com/intl/pt-BR/earth/about/versions/>> Acesso em: 11 mar. 2025.

GRATÃO, U. **Influência da variabilidade da composição do agregado graúdo proveniente de resíduos de construção civil (rcc) nas propriedades mecânicas, hidráulicas e físicas do concreto permeável**. 2023. 176 f. Tese (Doutor em Tecnologia Ambiental). Centro de Ciências Exatas, Naturais e Tecnologias, Universidade de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto, 2023.

GUILLOT, J. D. **Gestión de residuos en la UE: hechos y cifras**. 2022.

GUNEYISI, E.; GESOGLU, M.; KARAOGLU, S.; MERMERDAS, K. Strength, permeability and shrinkage cracking of silica fume and metakaolin concretes. **Construction and Building Materials**, v. 34, n. 0, p. 120–130, 2012.

GUO, Hui; SHI, Caijun; GUAN, Xuemao; ZHU, Jianping; DING, Yahong; LING, Tung-Chai; ZHANG, Haibo; WANG, Yuli. Durability of recycled aggregate concrete – A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 89, p. 251-259, mai./2018.

HAFEZI, M. N. Management of construction waste of Shahroud city according to environmental aspects. In: VII CONFERENCE OF GEOLOGY ENGINEERING AND ENVIRONMENT OF IRAN, 2010, Shahroud. **Proceedings...** Iran: Shahroud Polytechnic University, 2010. p. 1-15.

HAIDER, Husnain; ALMARSHOD, Sulaiman Yousef; ALSALEEM, Saleem S.; ALI, Ahmed AbdelMonteleb M.; ALINIZZI, Majed; ALRESHEEDI, Mohammad T.; SHAFIQUZZAMAN, Md. Life Cycle Assessment of Construction and Demolition Waste Management in Riyadh, Saudi Arabia. **MDPI: International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, p. 1-17, jun. 2022.

HANSEN, T. C. **Recycled of demolished concrete and masonry**. London: Chapman and Hall, 1992. 316 f. Part One: Recycled aggregates and recycled aggregate concrete, p. 1-160. (RILEM TC Report 6).

HANSEN, T. C. The second RILEM state of the art report on recycled aggregates and recycled aggregate concrete. **Materials and Structures**, v. 1, n. 111, p. 201-204, 1986a.

HANSEN, T.C. Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945–1985. **Materials and Structures**. v. 19, 201–246, 1986b.

HAO, J.; DI MARIA, F.; CHEN, Z.; YU, S.; MA, W.; DI SARNO, L. Comparative study of construction and demolition waste management in China and the European Union. **Detritus**, v. 13, p. 114-121, 2020.

HERRERA, Iván Emilio Martínez; LARRAÑAGA, Miren Etxeberria; FÉ, Elier Pavón de la; BRITO, Nelson Emilio Díaz. Evaluación de morteros de albañilería elaborados con áridos reciclados mixtos con diferentes procesos de obtención. **Revista Cubana de Ingeniería**, v. 3, n. 2, p. 11-16, mai-ago./2012.

HOANG, H.; ISHIGAKI, T.; KUBOTA, R.; YAMADA, M.; KAWAMOTO, K.; NGUYEN, G.; TONG, K. An empirical investigation of generation rate, composition, and handling practices of construction and demolition waste in hanoi, Vietnam. In: XVII INTERNATIONAL WASTE MANAGEMENT AND LANDFILL SYMPOSIUM, 2019, Forte Village. **Proceedings...** Italy: Santa Margherita di Pula (CA), 2019. p. 1-15.

HU, K.; CHEN, Y.; YU, C.; XU, D.; CAO, S.; PANG, R. Upgrading the Quality of Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste by Using a Novel Brick Separation and Surface Treatment Method. **Materials and Structures**, v. 13, n. 2893, p. 1-20, jun./2020.

HUANG, Beijia; WANG, Xiangyu; KUA, Harnwei; GENG, Yong; BLEISCHWITZ, Raimund; REN, Jingzheng. Construction and demolition waste management in China through the 3R principle. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 129, p. 36-44, fev./2018.

HUANG, Jianling; YIN, Yang; ZHENG, Lei; ZHANG, Sibao; ZHAO, Qingyn; CHEN, Huihua. Life Cycle Assessment of Construction and Demolition Waste from Railway Engineering Projects. **Hindawi - Computational Intelligence and Neuroscience**, v. 8423, n. 1, 2022.

HUBERT, Julien; MICHEL, Frédéric; COURARD, Luc. WP T1 - Activity 1 - Material flow / Territorial analysis Deliverable 1.1 Sand resources in NWE. 2022. Disponível: < <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/320465/1/WP%20T1.1%20-%20Sand%20resources%20in%20NWE.pdf>> Acesso em: 13 jul. 2024.

I&T Gestão de Resíduos. Tecnologia em gestão ambiental Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos Tratamento de Resíduos Sólidos. 2019. Disponível: < <https://www.facebook.com/ietsp/posts/1134399790077791/>> Acesso em: 30 set. 2023.

IBGE. População do Brasil e Unidades da Federação. 2022. Disponível: < https://ftp.ibge.gov.br/Censos/Censo_Demografico_2022/Previa_da_Populacao/POP_2022_Brasil_e_UFs.pdf> Acesso em: 30 set. 2023.

IMP, Iraqi Ministry of Planning. Central Statistical organization, Environmental Statistics Report for Iraq Municipal Services Sector. 2020. Disponível: < <https://mop.gov.iq/en/>> Acesso em: 22 jun. 2024.

INEI. **Perú**: Anuario de Estadísticas Ambientales. Perú: Lima, 2019

INMET. Estações Utilizadas - Automáticas e Convencionais. 2010. Disponível: < <https://mapas.inmet.gov.br/>> Acesso em: 11 mar. 2025.

INMET. Mapa de estações. 2025. Disponível: < <https://mapas.inmet.gov.br/>> Acesso em: 09 mar. 2025.

Instituto Nacional de Investigaciones Económicas-NU, Cuba, CEPAL, Subsele de México. **Política social y reformas estructurales**: Cuba a principios del siglo XXI. Cuba: PNUD, 2004.

ISLAM, R.; NAZIFA, T. H.; YUNIARTO, A.; SHANAWAZ UDDIN, A. S. M.; SALMIATI, S.; SHAHID, S. An empirical study of construction and demolition waste generation and implication of recycling. **Waste Management**, v. 95, p. 10-21, 2019.

JAIN, P.; POWELL, P.; TOLAYMAT, T. 2015. Methodology to Estimate the Quantity, Composition, and Management of Construction and Demolition Debris in the United States. Washington, DC:U.S. Environmental Protection Agency. EPA/600/R-15/111.

JESUS, Sara; PEDERNEIRAS, Cinthia Maia; BRITO, Jorge de; VEIGA, Rosário. Reduction of the Cement Content by Incorporation of Fine Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste in Rendering Mortars. **Infrastructures**, v. 6, n. 11, p. 1-16, jan./2021.

JIMÉNEZ, A. M. G. **Estudo experimental de um resíduo de construção e demolição (RCD) para utilização em pavimentação**. 2011. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

JIMÉNEZ, J. R.; AYUSO, J.; LÓPEZ, M.; FERNÁNDEZ, J.; DE BRITO, J. M. C. L. Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing. **Construction and Building Materials**. v. 40, p. 679-690, mar./2013.

JIN, Ruoyu; LI, Bo; ZHOU, Tongyo; WANATOWSKI, Dariusz; PIROOZFAR, Poorang. An empirical study of perceptions towards construction and demolition waste recycling and reuse in China. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 126, p. 86-98, 2017.

JOHN, V. M.; ANGULO, S. C.; MIRANDA, L. F.; AGOPYAN, V.; VASCONCELLOS, F. (Eds.) **Strategies for Innovation in Construction and Demolition Waste Management in Brazil**. CIB World Building Congress, National Research Council of Canada: Toronto, ON, Canada, 2004.

JOSEPH, Herbert Sinduja; PACHIAPPAN, Thamilselvi; AVUDAIPPAN, Siva; FLORES, Erick I. Saavedra. A Study on Mechanical and Microstructural Characteristics of Concrete Using Recycled Aggregate. **Materials: Journal of Construction**, v. 15, n.21, p.1-19, out./2022.

JOSEPH, Herbert Sinduja; PACHIAPPAN, Thamilselvi; AVUDAIPPAN, Siva; GUINDOS, Pablos. Prediction of the mechanical properties of concrete incorporating simultaneous utilization of fine and coarse recycled aggregate. **Revista de la Construcción: Journal of Construction**, v. 22, n.1, p.178-191, 2023.

JUAN, Marta Sánchez; GUTIERREZ, Pilar Alaejos. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p.872- 877, fev./2009.

KATZ, A. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. **Cement and Concrete Research**. v. 33, n. 5, p. 703–711, mai./2003.

KATZ, A.; BAUM, H.; Effect of High Levels of fines content on concrete properties. **Aci Materials Journal**, v. 6, p.474- 482, 2006.

KEPNIAK, Maja. Recycled Cement Concrete as an Eco-Friendly Aggregate in Polymer Composite – Application Feasibility. In: CZARNECKI, L.; GARBACZ, A.; WANG, R.; FRIGIONE, M.; AGUIAR, J. B. (org.). **Concrete-Polymer Composites in Circular Economy: Proceedings of the 17th International Congress on Polymers in Concrete (ICPIC 2023)**. Suíça: Springer, 2025. p. 206-211.

KHEIRBEK, Ali; HASSAN, Bassam; ASLAN, Basel. The effect of using recycled aggregates on concrete durability indicators. **European Journal of Engineering and Technology**, v. 12, n. 1, 2024.

KOBAYASHI, S.; KAWANO, H. **Properties and usage of recycled aggregate concrete**. Demolition and reuse of concrete and masonry: reuse of demolition waste. London: Chapman and Hall, 1988.

KOFOWOROLA, O. F.; GHEEWALA, S. H. Estimation of construction waste generation and management in Thailand. **Waste Management**, v. 29, n. 2, p. 731-738, fev./2009.

Korea Ministry of Environment. Occurrence and status of nationwide waste. Korea Ministry of Environment, Sejong. 2019. Disponível: <
<https://eng.me.go.kr/eng/web/main.do>> Acesso em: 11 jul. 2024.

KOU, S. C.; POON, C. S. AGRELA, F. Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 8, p. 788-795, set./2011.

KUMAR, G. S.; SAINI, P. K.; KARADE, S.R.; MINOCHA, A.K. Chemico-thermal treatment for quality enhancement of recycled concrete fine aggregates. **J. Mater. Cycles Waste Manag**, v. 21, p. 1197-1210, 2019.

KUMAR, Ravi; GURRAM, Subash Chandra Bose; MINOCHA, Ashwani Kumar. Influence of recycled fine aggregate on microstructure and hardened properties of concrete. **Magazine of Concrete Research**. v. 69, n. 24, p. 1288 -1295, dez/2017.

LAMOND, J. F.; CAMPBELL SR, R. L.; CAMPBELL, T. R.; CAZARES, J. A.; GIRALDI, A.; HALCZAK, W.; HALE JR, H. C.; JENKINS, N. J. T.; MILLER, R.; SEABROOK, P. T. Removal and reuse of hardened concrete: reported by ACI committee 555. **ACI Materials Journal**. v. 99, n. 3, p. 300-325, 2002.

LAZAR, J; FENG, J. H.; HOCHHEISER, H. Research methods in human-computer. Reino Unido: Wiley, 2010.

LEE, G. C.; CHOI, H. B. Study on interfacial transition zone properties of recycled aggregate by micro-hardness test. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 455-460, mar./2013.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 290 f. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Tese (doutorado). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2001.

LEITE, M. B.; MOLIN, D. D.; Avaliação da atividade pozolânica do material cerâmico presente no agregado reciclado de resíduo de C&D. **Sitientibus**: Revista de Feira de Santa, n. 26, p 111-130, 2002.

LEVY, S. M.; HELENE, P. Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 11, p. 1975–1980, 2004.

LIMA, G. T. DOS S.; ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. Investigation of the properties of pervious concrete with a recycled aggregate designed with a new combination of admixture. **Construction and Building Materials**, v. 340, n. 127710, 2022.

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.

LIMA, N. K. S.; UCHOA, J. C. M.; SILVA, J. V. L. M.; GERMANO, R. L. B.; LIMA, M. M. S.; MORAES, K. A. M. Estudo experimental acerca da influência da pré-molhagem na resistência à compressão do concreto com utilização de agregado reciclado misto. In: 65º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2024, Maceió. **Anais...** Brasil: Centro de Convenções de Maceió, 2024a. p. 1-16.

LIMA, Paulo Roberto Lopes; LEITE, Monica Batista. Influence of CDW Recycled Aggregate on Drying Shrinkage of Mortar. **Open Journal of Civil Engineering**, v. 2, n. 2, p. 1-5, 2012.

LIMBACHIYA, Mukesh; MEDDAH, Mohammed Seddik; OUCHAGOUR, Youssef. Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete. **Construction and Building Materials**, v. 27, n. 1, p. 439-449, fev./2012.

LIU, Qiong; XIAO, Jianzhuang; SUN, Zhihui. Experimental study on the failure mechanism of recycled concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 10, p. 1050-1057, out./2011.

LIU, Weishu; HU, Guangyuan; TANG, Li; WANG, Yuandi. China's global growth in social science research: Uncovering evidence from bibliometric analyses of SSCI publications (1978–2013). **Journal of Informetrics**, v. 9, n. 3, p. 555-569, 2015.

LÓPEZ-UCEDA, Antonio; AYUSO, Jesús; JIMÉNEZ, José Ramón; AGRELA, Francisco; BARBUDO, Auxiliadora; DE BRITO, Jorge. Upscaling the Use of Mixed Recycled Aggregates in Non-Structural Low Cement Concrete. **Materials**, v. 9, n. 91, p. 1-16, fev./2016.

LÓPEZ-UCEDA, Antonio; AYUSO, Jesús; LÓPEZ, Martín; JIMENEZ, José Ramón; AGRELA, Francisco; SIERRA, María José. Properties of Non-Structural Concrete Made with Mixed Recycled Aggregates and Low Cement Content. **Materials**, v. 9, n. 74, p. 1-19, jan./2016.

LOPOUKHINE, R. **Developing a circular building materials system and fostering innovation from construction, demolition and renovation (crd) waste: An ontario-focused systemic policy analysis and blueprint for change**. 2024. 86 f. Dissertação (Mestrado em Design em Previsão Estratégica e Inovação), Universidade da Faculdade de Arte e Design de Ontário, Canada, 2024.

LOTFY, Abdurrahmaan; AL-FAYEZ, Mahmoud. Performance evaluation of structural concrete using controlled quality coarse and fine recycled concrete aggregate. **Cement and Concrete Composites**, v. 61, p. 36-43, ago./2015.

LOTFY, Somayeh; EGGIMANN, Manuel; WAGNER, Eckhard; MROZ, Radosław; DEJA, Jan. Performance of recycled aggregate concrete based on a new concrete recycling technology. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 243-256, out./2015.

LOVATO, P. S. **Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto**. 2007. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

LU, J. X.; YAN, X.; HE, P.; POON, C. S. Sustainable design of pervious concrete using waste glass and recycled concrete aggregate. **Journal of cleaner production**, v. 234, p. 1102-1112, 2019.

LUCAS, J.; De Brito, J.; VEIGA, R.; FARINHA, C. The effect of using sanitary ware as aggregates on rendering mortars' performance. **Materials & Design**. v. 91, p. 155-164, fev./2016.

MACHADO, L. S. M. **Determinação da ecoeficiência de concretos reciclados em função do consumo de ligantes**. Dissertação (Mestre), Feira de Santana: Universidade Estadual de Feira de Santana, 2020.

MAH, Chooi Mei; FUJIWARA, Takeshi; HO, Chin Siong. Construction and demolition waste generation rates for high-rise buildings in Malaysia. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, v. 34, n. 12, p. 1-15, set./2016.

MALESEV, Mirjana; RADONJANIN, Vlastimir; MARINKOVIC, Snezana. Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production. **Sustainability**, v. 2, p. 1204–1225, 2010.

MALTA, J. O. **Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo de construção e demolição**. 2012. 1792 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana). Escola Politécnica, Universidade federal da Bahia, Salvador, 2012.

MARTÍNEZ, Iván; ETXEBERRIA, Miren; PAVÓN, Elier; DÍAZ, Nelson. Analysis of the properties of masonry mortars made with recycled fine aggregates for use as a new building material in Cuba. **Revista De La Construcción: Journal of Construction**, v. 15, n. 1, p. 9-21, 2016.

MARTÍNEZ, Pablo Saiz; FERRÁNDEZ, Daniel; MELANE-LAVADO, Alberto; ZARAGOZA-BENZAL, Alicia. Characterization of Three Types of Recycled Aggregates from Different Construction and Demolition Waste: An Experimental Study for Waste Management. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 20, n. 3709, p. 1-19, fev./2023.

MARTÍNEZ-LAGE, Isabel; MARTÍNEZ-ABELLA, Fernando; VÁSQUEZ-HERRERO, Cristina; PERÉZ-ORDÓÑEZ, Juan Luis. Properties of plain concrete made with mixed recycled coarse aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 171-176, dez./2012.

MAS, Benito; CLADERA, Antoni; BESTARD, Jeroni; MUNTANER, Denis; LOPEZ, Catalina Elena; PINA, Silvia; PRADES, Jesus. Concrete with mixed recycled aggregates: Influence of the type of cement. **Construction and Building Materials**, v. 34, p. 430-441, set./2012.

MATIAS, D. *et al.* Durability of concrete with recycled coarse aggregates : influence of superplasticizers. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 06014011, n. 5, p. 1–5, 2014.

MCGINNIS, M. J.; DAVIS, M.; DE LA ROSA, A.; WELDON, B. D.; KURUMA, Y. C. Strength and stiffness of concrete with recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 258-269, nov./2017.

MEDINA, César; ZHU, Wenzhong; HOWIND, Torsten; ROJAS, María Isabel Sánchez; FRÍAS, Moisés. Influence of mixed recycled aggregate on the physical – mechanical properties of recycled concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 68, p. 216-225, abril./2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1994.

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

MEIRA, G. R. **Corrosão de armaduras em estruturas de concreto: Fundamentos, diagnóstico e prevenção**. 1. ed. João Pessoa: IFPB, 2017.

MENEGAKI, Maria; DAMIGOS, Dimitris. A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v.13, p. 8-15, out./2018.

MENG, Tao; LIAN, Songsong; YING, Kanjun; YU, Hongming. Feasibility study of cement-stabilized materials using 100% mixed recycled aggregates from perspectives of mechanical properties and microstructure. **Reviews on advanced materials science**, v. 60, n. 1, p. 490-502, 2021b.

MENG, Tao; WEI, Huadong; DAI, Dawang; LIAO, Jianping; AHMED, Sara. Effect of brick aggregate on failure process of mixed recycled aggregate concrete via X-CT. **Construction and Building Materials**, v. 327, n. 126934, p. 1-17, 2022.

MENG, Tao; WEI, Huadong; YANG, Xiufen; ZHANG, Bo; ZHANG, Yuncui; ZHANG, Cungui. Effect of Mixed Recycled Aggregate on the Mechanical Strength and Microstructure of Concrete under Different Water Cement Ratios. **Materials**. v. 14, n. 2631, p. 1-16, 2021a.

MERINO-LECHUGA, Antonio Manuel; GONZÁLEZ-CARO, Ágata; FERNÁNDEZ-LEDESMA, Enrique; JIMÉNEZ, José Ramón; FERNÁNDES-RODRÍGUEZ, José María; SUESCUM-MORALES, David. Accelerated Carbonation of Vibro-Compacted Porous Concrete for Eco-Friendly Precast Elements. **MDPI**. v. 16, n. 2995, p. 1-20, 2023.

Metacaulim do Brasil. METACAULIM HP ULTRA. 2023. Disponível: <
<https://www.metacaulim.com.br/impermeabilizantes-metacaulim-hp-ultra.html>>
Acesso em: 07 mai. 2023.

Ministry for the Environment. Reducing waste: a more effective landfill levy. Report No. ME 1470. 2019. Disponível: <
<https://environment.govt.nz/assets/Publications/Files/reducingwaste-a-more-effective-landfill-levy-consultation-document.pdf>> Acesso em: 19 jun. 2024.

Ministry of Local Government (MoLG) - Japan International Cooperation Agency (JICA). Study on Construction and Demolition Waste in West Bank, Palestine. 2017. Disponível: < https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/1000041684_04.pdf > Acesso em: 20 jun. 2024.

Ministry of Natural Resources and Environment (MONRE), 2011. 2011 Report on National Environment: Solid Waste. 2011. Disponível: <
<https://www.monre.gov.vn/English> > Acesso em: 23 jun. 2024.

Minprirody of Russia. Ecology, Passport of the national Project, The Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation. 2018. Disponível: <
<https://www.mnr.gov.ru/en/> > Acesso em: 25 jun. 2024.

MIRANDA, L.; SELMO, S. Argamassa com areia de entulho reciclado. **Revista Técnica**. São Paulo, v. 74, p. 68-71, mai./2003.

MOLLA, Adane Sewhunegn; TANG, Patrick; SHER, Willy; BEKELE, Dawit Nega. Chemicals of concern in construction and demolition waste fine residues: A systematic literature review. **Journal of Environmental Management**, v. 299, n. 113654, dez./2021.

MONTGOMERY, Douglas C. **Design and Analysis of Experiments**. Nova Jersey: Wiley, 2020.

MORENO, S.; ROSALES, M.; ROSALES, J.; AGRELA, F.; DÍAZ-LÓPES, J. L. Feasibility of Using New Sustainable Mineral Additions for the Manufacture of Eco-Cements. **Materials**, v. 17, n. 777, p. 1-19, fev./2024.

MOUSAVINEJAD, Seyed Hosein Ghasemzadeh; SARADAR, Ashkan; JABBARI, Mostafa; MOEIN, Mohammad Mohtasham. Evaluation of fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing different percentages of waste tiles. **Elsevier: Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 8, p. 1-38, jul. 2023.

MUDULI, R.; MUKHARJEE, B. B. Effect of incorporation of metakaolin and recycled coarse aggregate on properties of concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 209, p. 398-414, 2019.

NAGALLI, André. **Gerenciamento de Resíduos Sólidos na Construção Civil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

NAIM, Amine; HATTAB, Ikrame; ZAHNOUNE, Rajaa; ELGHOZLANI, Mohamed; TANANE, Omar; EL BOUARI, Abdeslam; ELKACMI, Reda. Assessing the Feasibility, Usability, and Durability of Recycled Construction and Demolition Waste in Road Construction in Morocco. **Materials Research Proceedings**, v. 40, p. 19-32, 2024.

NEPOMUCENO, M. C. S.; ISIDORO, R. A. S.; CATARINO, J. P. G. Mechanical performance evaluation of concrete made with recycled ceramic coarse aggregates from industrial brick waste. **Construction and Building Materials**, v. 165, p. 284-294, mar./2018.

NESA, J.; SOJIB, M. A.; DIBA, A. B.; TULI, U. H.; RANA, S. K.; SHAHANUR, S. M. J. Effects of using recycled aggregate in place of coarse aggregate and sugarcane bagasse ash as a partial replacement for cement in concrete. In: 7th International Conference on Civil Engineering for Sustainable Development, 2024, Khulna. **Proceedings...** Bangladesh: Khulna University of Engineering, 2024. p. 1-7.

NG, T. S.; FOSTER, S. J. Development of a mix design methodology for high-performance geopolymers mortars. **Wiley Online Library**, v. 14, n. 2, p. 148-156, jan. 2013.

NGHIEM, Ha Tan; PHAN, Quang Minh; KAWAMOTO, Ken; NGO, Kim Tuan; NGUYEN, Hoang Giang; NGUYEN, Tien Dung; ISOBE, Yugo; KAWASAKI, Mikio. An investigation of the generation and management of construction and demolition waste in vietnam. **Detritus – Multidisciplinary Journal for Waste Resources and Residues**, p. 1-15, set./2020.

NGUYEN, G. Current Situation and New Regulations on Construction and Demolition Waste Management in Vietnam. In: International Symposium on Construction and Demolition Waste Management, 2019, Tokyo. **Proceedings...** Japan: Tokyo International Exchange Center Tokyo Academic Park, 2019. p. 1-17.

NGUYEN, Hoang Giang; NGUYEN, Dung Tien; NGHIEM, Ha Tan; TRAN, Viet Cuong; KATO, Akira; MATSUNO, Akihiro; ISOBE, Yugo; KAWASAKI, Mikio; KAWAMOTO, Ken. Current Management Condition and Waste Composition Characteristics of Construction and Demolition Waste Landfills in Hanoi of Vietnam. **Sustainability**, v. 13, n. 18, p. 1-29, set./2021.

NUNES, K. R. A.; MAHLER, C. F. Construction & Demolition Waste and Circular Economy: The Case Study of a Brazilian City. **Recent Progress in Materials**, v. 6, n. 4, p. 1-16, 2024.

OBAS, John Ebohon; RUOYU, Jin; EDMUNDO, Wena; FEDERICO, Rossi; OLABISI, Ige. Social, Economic, and Environmental Evaluation: Adopting Digital Manufacturing for Circularity in Cementitious Products. 2024. Disponível: < <https://ucem.repository.guildhe.ac.uk/id/eprint/101/>> Acesso em: 19 mai. 2024.

OECD. **Global Material Resources Outlook to 2060**: Economic Drivers and Environmental Consequences. Paris: OECD Publishing, 2019.

OLIVEIRA *et al.* Diagnóstico da geração e da composição dos RCD de Fortaleza/CE. **Eng Sanit Ambient**: Revista da Universidade Federal do Ceará – Campus Universitário do Pici, Fortaleza, ano 16, n. 3, p. 219- 224, jul./set. 2011.

OLIVEIRA, M. J. **Estudo do concreto produzido com agregado reciclado misto**. 2023b. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil). Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2023b.

OLIVEIRA, R. G. G. **Ecoeficiência de concretos com agregados graúdos reciclados de construção e demolição**. 2023c. 109 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil). Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2023c.

OLIVEIRA, R. P. **Estudo da influência do teor de finos dos agregados reciclados mistos nas propriedades das argamassas de revestimento**. 2015. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

OLIVEIRA, T. M. **Análise numérica de pilares mistos preenchidos com concreto reciclado sob compressão axial centrada**. 2023a. 147 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil). Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2023a.

ONEI. Tratamiento y Recolección de Desechos Sólidos. 2011. Disponível: http://www.one.cu/aec2010/esp/02_tabla_cuadro.htm. Acesso em: 25 jun. 2024.

ÖZALP, F.; YILMAZ, H. D.; KARA M.; KAYA, Ö.; SAHIN, A. Effects of recycled aggregates from construction and demolition wastes on mechanical and permeability properties of paving stone, kerb and concrete pipes. **Construction and Building Materials**, v. 110, p. 17-23, 2016.

OZBAKKALOGLU, T.; GHOLAMPOUR, A.; XIE, T. Mechanical and Durability Properties of Recycled Aggregate Concrete: Effect of Recycled Aggregate Properties and Content. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n. 2, 2018.

PADOVAN, R. G. **Influência da pré-molhagem nas propriedades de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto**. 2013. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2013.

PAPASTAMOULIS, Vasilios; LONDON, Kerry; FENG, Yingbin; ZHANG, Peng; CROCKER, Robert; PATIAS, Petros. Conceptualising the Circular Economy Potential of Construction and Demolition Waste: An Integrative Literature Review. **Recycling**, v. 6, n. 61, p. 1-20, set./2021.

PARANDE, A. K. et al. Study on strength and corrosion performance for steel embedded in metakaolin blended concrete/mortar. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 127-134, 2008.

PAST, Vida; YAGHMAEIAN, Kamiar; NADERI, Maziar; NADERI, Nahal. Management of the construction and demolition waste (CDW) and determination of the best disposal alternative by FAHP (Fuzzy Analytic Hierarchy Process): A case study of Tehran, Iran. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 73, n. 4, p. 271-284, mar./2023.

PAVÓN, Elier; MARTÍNEZ, Iván; ETXEBERRIA, Miren. La producción de residuos de construcción y demolición y el uso de agregados reciclados en la Habana, Cuba. **Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia**, n. 71, p. 167-178, jun./2014.

PAZ, Candida Fachinetto; POSSAN, Edna; PUNHAGUI, Katia Regina Garcia. Inventário do ciclo de vida de agregados produzidos a partir de resíduos de construção e demolição. **Revista Técnico-Científica: Revista do CREA-PR**, Curitiba, n. 32, p. 1- 13, abr. 2023.

PEDRO; D.; DE BRITO, J.; EVANGELISTA, L. Structural concrete with simultaneous incorporation of fine and coarse recycled concrete aggregates: Mechanical, durability and long-term properties. **Construction and Building Materials**. v. 154, p. 294-309, nov./2017.

PEDROZO, R. F. E. **Influência da substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado fino em propriedades de argamassas e concretos**. 2008. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

PEIXOTO, L. K. S.; ANJOS, M. A. S.; FARIAS, E. C.; BRANCO, F. G. Evaluation of Chloride Ion Attack in Self-Compacting Concrete Using Recycled Construction and DemolitionWaste Aggregates. **Buildings**, v. 14, n. 319, p. 1-20, jan./2024.

PELISSARI, V. **Propriedades de concretos produzidos através da utilização de agregados reciclados de concreto**. 2016. 123 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba, Curitiba, 2016.

PICCINALI, Andrea; DIOTTI, Alessandra; PLIZZARI, Giovanni; SORLINI, Sabrina. Impact of Recycled Aggregate on the Mechanical and Environmental Properties of Concrete: A Review. **Materials**, v. 15, n. 1818, p. 1-19, fev./2022.

PINTO, A. R. R.; TABORDA, T. O. **Reuso de material reciclado aplicado como matéria prima renovável na fabricação de novas peças e na construção civil**. 2023. 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia). Universidade Anhembi-Morumbi, São José dos Campos, 2023.

PLANARES. PLANO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS - Governo Federal. 2020. Disponível: < https://www.gov.br/mma/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/agendaambientalurbana/lixao-zero/plano_nacional_de_residuos_solidos-1.pdf/> Acesso em: 6 out. 2023.

PLANARES. PLANO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS - Governo Federal. 2022. Disponível: < https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/agendaambientalurbana/lixao-zero/plano_nacional_de_residuos_solidos-1.pdf> Acesso em: 15 nov. 2023.

POON, C. S.; KOU, S. C.; LAM, L. Influence of recycled aggregate on slump and bleeding of fresh concrete. **Materials and Structures**, v. 40, p. 981-988, 2007.

POON, C. S.; SHUI, Z. H.; LAM, L.; FOK, H.; KOU, S. C. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 1, p. 31-36, jan./2004.

POON, C. S.; YU, A. T. W.; NG, L. H. On-site sorting of construction and demolition waste in Hong Kong. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 32, n. 2, p. 157-172, 2001.

QUATTRONE, Marco; ANGULO, Sergio C.; JOHN, Vanderley M. Energy and CO2 from high performance recycled aggregate production. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 90, p. 21- 33, set. 2014.

RAFIQ, MD. Sahil; KHANDAKER, Nadim Reza. Sustainable Management of Construction and Demolition Waste in Bangladesh: Advancing a Greener Industry through Resource Recovery and Recycling. **Research Square (preprint article)**, p. 1-20, fev./2024.

RAHLA, Kamel Mohamed; MATEUS, Ricardo; BRAGANÇA, Luís. Implementing Circular Economy Strategies in Buildings—From Theory to Practice. **Applied system innovation**, v. 4, n. 26, p. 1-14, abr./2021.

RAO CHAKRADHARA, M.; BHATTACHARYYA, S. K.; BARAI, S. V. Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. **Materials and Structures**, v. 44, p. 205-220, jan./2011.

RAO, A.; JHA, K. N.; MISTRA, S. Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 50, p. 71-81, mar./2007.

RASHID, Khuram; REHMAN, Munib Ul; BRITO, Jorge; GHAFOR, Habiba. Multi-criteria optimization of recycled aggregate concrete mixes. **Journal of Cleaner Production**, v. 276, n. 124316, dez./2020.

REDDY, M. S.; DINAKAR, P.; RAO, B. H. Mix design development of fly ash and ground granulated blast furnace slag based geopolymer concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 20, p. 712-722, nov./2018.

REIS, G. R.; SILVA, C. P.; LIMA, H. J. N. Avaliação do uso de agregados reciclados na fabricação de concreto. **Inter scientia**, v.8, n.1, 2021.

REIS, N.; BRITO, J.; CORREIA, J. R.; ARRUDA, M. R. Punching behaviour of concrete slabs incorporating coarse recycled concrete aggregates. **Engineering Structures**, v. 100, p. 238-248, 2015.

RELATÓRIO de ensaios com agregados reciclados secundários miúdo e graúdo provenientes de resíduos de demolição. **Relatório técnico**. Maceió, 2023b.

RELATÓRIO parcial de ensaios com agregados reciclados primários limpos miúdo (ARPLM) e graúdo (ARPLG) de resíduos de demolição. **Relatório técnico**. Maceió, 2023a.

REQUEJO, S. O. **Infraestructura de reciclaje RCD para la regeneración urbano paisajística del eje Ciudad de Dios – Chiclayo**. 2023. 54 f. Monografia (Graduação em Arquitetura), Facultad de Ingeniería, Escuela de Arquitectura, Universidad Católica Santo Toribio De Mogrovejo, Peru, 2023.

RODRIGUES JUNIOR, Jose Fernando. Pesquisa Experimental. Disponível: <https://escritacientifica.sc.usp.br/wp-content/uploads/MPCC_5_DataAnalysis06-PesquisaExperimental.pdf> Acesso em: 02 fev. 2025.

RODRIGUES, Clarice Ribeiro de Sá; FUCAL, Stela. Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo da construção civil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 99-111, jan./mar. 2014.

RODRÍGUEZ-ÁLVARO, Roberto; SEARA-PAZ, Sindy; GONZÁLEZ-FONTEBOA, Belén; ETXEBERRIA, Miren. Study of different granular by-products as internal curing water reservoirs in concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 45, n. 103623, p. 1- 11, 2022.

RODRÍGUEZ-ROBLES, Desirée; GARCÍA-GONZÁLEZ, Julia; JUAN-VALDÉS, Andrés; POZO, Julia M^a Morán-del; GUERRA-ROMERO, Manuel I. Quality Assessment of Mixed and Ceramic Recycled Aggregates from Construction and Demolition Wastes in the Concrete Manufacture According to the Spanish Standard. **Materials**, v. 7, p. 5843-5857, 2014.

RONDINEL-OVIEDO, D. R. Construction and demolition waste management in developing countries: a diagnosis from 265 construction sites in the Lima Metropolitan Area. **International journal of construction management**, v. 23, n. 2, p. 371-382, 2023.

ROQUE, Samuel; PEDERNEIRAS, Cinthia Maia; FARINHA, Catarina Brazão; BRITO, Jorge; VEIGA, Rosário. Concrete-Based and Mixed Waste Aggregates in Rendering Mortars. **Materials**, v. 13, n. 1976, p. 1-19, 2020.

ROSADO, L. P.; VITALE, P.; PENTEADO, C. S. G.; ARENA, U. Life cycle assessment of construction and demolition waste management in a large area of São Paulo State, Brazil. **Waste Management**, v. 85, p. 477- 489, 2019.

ROSALES, M.; DIAZ-LÓPEZ, J. L.; AGRELA, F.; ROSALES, J. Eco-Concrete Towards Sustainable Construction. In: II INTERNATIONAL CÓRDOBA ECO-CONCRETE CONFERENCE, 2023, Cordoba. **Proceedings...** Spain: Universidad de Córdoba, 2023. p. 124-131.

ROSALES, Manuel; JULIA, Rosales; MORENO, Santiago; AGRELA, Francisco; DÍAZ-LÓPEZ, José Luis. Sustainable Concrete Design with Mixed Recycled Aggregates and Biomass Bottom Ash Applying High Levels of Aggregates and Cement Substitution. **SSRN (preprint article)**, p. 1-43, jan./2025.

ROUHI BROUJENI, B.; OMRANI, G. A.; NAGHAVI, R.; AFRASEYABI, S. S. Construction and Demolition Waste Management (Tehran Case Study). **Engineering, Technology & Applied Science Research**, v. 6, n. 6, p. 1249-1252, 2016.

SÁEZ, Paola Villoria; OSMANI, Mohamed. A diagnosis of construction and demolition waste generation and recovery practice in the European Union. **Journal of Cleaner Production**, v. 241, n. 118400, dez./2019.

SALGADO, Fernanda de Andrade; SILVA, Flávio de Andrade Silva. Properties of recycled aggregates from different composition and its influence on concrete strength. **IBRACON Structures and Materials Journal**, vol. 14, no. 6, p. 1-16, 2021.

SALLES, Pedro Valle; GOMES, Camila Lacerda; POGGIALI, Flávia Spitale Jacques; RODRIGUES, Conrado Souza. 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.

SANTANA, M. J. A.; CARNEIRO, A. P.; SAMPAIO, T. S. Uso do agregado reciclado em argamassas de revestimento. In: CARNEIRO, A. P. (Org); SCHADACH, I. A. B; CASSA, J. C. S. **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção**: Projeto entulho bom. 2001, 312 f., Salvador: EDUFBA, cap. 8, 2001.

SANTANA, V. M., LEITE, M. B. Avaliação do uso de agregados miúdos reciclados na dosagem e produção de concretos reciclados. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., 2018, Foz do Iguaçu. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2018.

SANTOS, A. A. M. **Concreto com agregado graúdo reciclado de concreto: Dosagem e produção**. 2016b. 135 f. Dissertação (Mestrado em Ciência em Engenharia Civil e Ambiental). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2016b.

SANTOS, A. N. **Diagnóstico da situação dos resíduos de construção e demolição (rcd) no município de petrolina (Pe)**. 2008. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2008.

SANTOS, A. R.; UCHOA, J. C. M.; ASSIS, W. S.; MORAES, K. A. M.; ARAUJO, J. P.; LIMA, F. M. S. Argamassas cimentícias com uso de agregado reciclado misto e substituição de cimento por metacaulim e resíduo de beneficiamento de mármore e granito. In: 65º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2024b, Maceió. **Anais...** Brasil: Centro de Convenções de Maceió, 2024b. p. 1-16.

SANTOS, A. R.; UCHOA, J. C. M.; MORAES, K. A. M.; CASTRO, L. S. C.; ASSIS, W. S.; PRIMO, S. Estudo de argamassa cimentícia com uso de agregado reciclado misto e metacaulim. In: 65º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2024a, Maceió. **Anais...** Brasil: Centro de Convenções de Maceió, 2024a. p. 1-16.

SANTOS, C. J. R. dos. ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DE RCD COMO AGREGADO GRAÚDO – **IX Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental São Bernardo do Campo/SP** – 26 a 29/11/2018.

SANTOS, E. S. **Avaliação da influência dos britadores de mandíbula e de impacto nas propriedades de agregados reciclados para aplicação em bases e sub-bases de pavimentos**. 2016a. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016a.

SAWIC - South Africa State of Waste Report. South Africa State of Waste - A report on the state of the waste: Final draft report. 2018. Disponível: < https://soer.environment.gov.za/soer/UploadLibraryImages/UploadDocuments/141119143510_state%20of%20Waste%20Report_2018.pdf> Acesso em: 13 jul. 2024.

SCHILLER, Ana Paula Sturbelle; PALIGA, Charlei Marcelo; TORRES, Ariela da Silva. Study of the potentiality of partial replacement of cement by civil construction residues in coating mortar. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 8, p. 1-16, jul./2021.

SEADON, Jeff; ALADWAN, Ala'; GOLDING, Kevin. Mandatory Site Waste Management Plans. 2022. Disponível: < <https://www.aucklandcouncil.govt.nz/plans-projects-policies-reports-bylaws/our-plans-strategies/topic-based-plans-strategies/environmental-plans-strategies/docswastemanagementplan/waste-assessment-appendix-d2.pdf>> Acesso em: 19 jun. 2024.

SHAMSAEI, Mohsen; CARTER, Alan; VAILLANCOURT, Michel. Using construction and demolition waste materials to alleviate the negative effect of pavements on the urban heat island: A laboratory, field, and numerical study. **Case Studies in Construction Materials**, v. 20, n. e03346, p. 1-23, mai./2024.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, v. 52, n. 3/4, p. 591-611, 1965.

SHAYAN, A.; XU, A. Performance and properties of structural concrete made with recycled concrete aggregate. **ACI Materials Journal**, v. 100, n. 5, p. 371-380, sep/out. 2003.

SHMILLS, Maysam; ABED, Mohammed; HORVATH, Tamas; BOZSAKY, David. Multicriteria based optimization of second generation recycled aggregate concrete. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, n. e01447, p. 1- 17, 2022.

SHOOSHTARIAN, Salman; MAQSOOD, Tayyab; CALDERA, Savindi; RYLEY, Tim. Transformation towards a circular economy in the Australian construction and demolition waste management system. **Sustainable Production and Consumption**, v. 30, p. 89-106, mar./2022.

SIDDIQUE, R.; KLAUS J. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: a review. **Applied Clay Science**, v. 43, n. 3-4, p. 392-400, 2009.

SILVA, J. L. O. **Análise de propriedades mecânicas de concretos produzidos com diferentes dosagens de agregados reciclados de concreto**. 2023. 109 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil). Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2023.

SILVA, J. L. O.; UCHOA, J. C. M.; MORAES, K. A. M.; LIMA, Y. O.; SANTOS, A. R.; LIMA, N. K. Estudo comparativo entre concretos estruturais com uso de agregado gráudo reciclado misto e de concreto. In: 65º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2024, Maceió. **Anais...** Brasil: Centro de Convenções de Maceió, 2024. p. 1-13.

SILVA, J.; De Brito, J.; VEIGA, R. Recycled Red-Clay Ceramic Construction and Demolition Waste for Mortars Production. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 22, n. 3, p. 236-244, fev./2010.

SILVA, K. A. N. **Estudo de propriedades mecânicas de concretos produzidos com diferentes agregados reciclados**. 2011a. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2011.

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R.K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. **Constr. Build. Mater.** v. 65, p. 201–217, 2014.

SILVA, R. V.; JIMÉNEZ, J. R.; AGRELA, F.; BRITO, J. DE. Real-scale applications of recycled aggregate concrete. In: **New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete**, 2018, cap. 21. p. 573–589.

SILVA, R.; BRITO, J. D.; DHIR, R. Use of recycled aggregates arising from construction and demolition waste in new construction applications. **Journal of Cleaner Production**. Elsevier, v. 236, p. 117629, 2019.

SILVA, Sergio Roberto; ANDRADE, Jairo José de Oliveira. Análise do emprego de diferentes tipos de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em concretos com vistas à sustentabilidade: uma análise técnica e vantagens econômicas. **Revista Espacios**: Grupo Editorial Espacios GEES, v. 38, n. 27, p. 14, 2017.

SILVA, Sergio Roberto; CIMADON, Felipe Nunes; BORGES, Pietra Moraes; SCHIAVON, Jessica Zamboni; POSSAN, Edna; ANDRADE, Jairo José Oliveira. Relationship between the mechanical properties and carbonation of concretes with construction and demolition waste. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, n. e00860, p. 1 -22, 2022.

SINGH, Amardeep; MIAO, Xinzhaio; ZHOU, Xin; DENG, Qi; LI, Jiannan; ZOU, Shuai; DUAN, Zhenhua. Use of recycled fine aggregates and recycled powders in sustainable recycled concrete. **Elsevier: Journal of Building Engineering**, v. 77, p. 1-17, jul. 2023.

SINGH, N.; SINGH, S. P. Carbonation and electrical resistance of self compacting concrete made with recycled concrete aggregates and metakaolin. **Construction and Building Materials**, v. 121, p. 400-409, 2016.

SINIR. Plano Nacional de Resíduos Sólidos. 2023. Disponível: <
<https://sinir.gov.br/informacoes/plano-nacional-de-residuos-solidos/>> Acesso em: 6 out. 2023.

SOTO-PAZ, Jonathan; ARROYO, Orlando; TORRES-GUEVARA, Luz Elba; PARRA-OROBIO, Brayan A.; CASALLAS-OJEDA, Miguel. The circular economy in the construction and demolition waste management: A comparative analysis in emerging and developed countries. **Elsevier: Journal of Building Engineerin**, v. 78, p. 1-20, set. 2023.

SROUR, I. M.; CHEHAB, G. R.; EL-FADEL, M.; TAMRAZ, S. Pilot-based assessment of the economics of recycling construction demolition waste. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, v. 31, n. 11, p. 1170-1179, 2013.

STAKE, Robert E. **Multiple case study analysis**. Guilford Press: 2013.

SUAREZ-RIERA, Daniel; RESTUCCIA, Luciana; FALLIANO, Devid; FERRO, Giuseppe Andrea; TULIANI, Jean-Marc; PAVESE, Matteo; LAVAGNA, Luca. An Overview of Methods to Enhance the Environmental Performance of Cement-Based Materials. **Infrastructures**, v. 9, n. 94, p. 1-20, jun./2024.

SUESCUM-MORALES, David; KALINOWSKA-WICHROWSKA, Katarzyna; FERNÁNDEZ, José María; JIMÉNEZ, José Ramón. Accelerated carbonation of fresh cement-based products containing recycled masonry aggregates for CO₂ sequestration. **Journal of CO₂ Utilization**, v. 46, n. 101461, abr./2021.

TABSH, S. W.; TAMIMI, A.; EL-EMAM, M. Strength Properties of Pervious Concrete Made with Locally Produced Recycled Coarse Aggregate. In: 9th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering, 2024, London. **Proceedings...** United Kingdom: ICSECT, 2024. p. 1-8.

TAGHIPOUR, Hassan; JAZADANI, Reza Taghizadeh; DEHGHANZADEH, Reza; JAFARABADI, Mohamad Asghari; MOHAMMADI, Mohsen Mir; GHAYEBZADEH, Mehdi. Construction and Demolition Waste and Its Management Challenges in Iran: A Case Study in Tabriz City. **Health Scope**, v. 8, n. 2, p. 1-6, mai./2019.

TAM, V. W. Y.; TAM, C. M.; LE, K. N. Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches, **Resources, Conservation and Recycling**, v. 50, n. 1, p. 82–101, 2007.

TEIXEIRA, Eduardo Cruz; MEDEIROS, Camila Macedo; PATRIOTA, André Luiz Santos; PADILHA JUNIOR, Marcos Antônio. Estudo de concretos preparados com rcd e metacaulim. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 8, p. 63407-63414, ago./2020.

TENÓRIO, J. J. L. **Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição visando aplicações estruturais**. 2007. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007.

THOMAS, J.; THAICKAVIL, N. N.; WILSON, P. M. Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates. **Journal of Building Engineering**, v. 19, p. 349-365, set./2018.

THÖNI, V.; MATAR, S. K. I. SOLID WASTE MANAGEMENT IN THE OCCUPIED PALESTINIAN TERRITORY West Bank including East Jerusalem & Gaza Strip. 2019. Disponível: < https://www.cesvi.eu/wp-content/uploads/2019/12/SWM-in-Palestine-report-Thoni-and-Matar-2019_compressed-1.pdf> Acesso em: 20 jun. 2024.

TOMASI, C. F. **Análise técnica do uso de agregado graúdo reciclado misto em concreto convencional**. 2021. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil). Campus Universitário da Região dos Vinhedos, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2021.

TOPÇU, İlker Bekir; SENGEL, Selim. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. **Cement and Concrete Research**. v. 34, n. 8, p. 1307–1312, ago./2004.

TORRES, Levi. Por que o Planares é um retrocesso para a reciclagem de RCD?. 2023. Disponível: < <https://abrecon.org.br/artigos/retrocesso-planares#:~:text=O%20Brasil%20tem%20capacidade%20para,de%20agregado%20reciclado%20por%20ano.>> Acesso em: 3 out. 2023.

TRAN, Ngoc Linh; GRAUBNER, Carl-Alexander. Uncertainties of concrete parameters in shear capacity calculation of RC members without shear reinforcement. **BETON-UND STAHLBETONBAU International Probabilistic Workshop**, p. 1-8, 2018.

TRUBNIKOVA, Elena. 7,75 млрд тонн: в России установлен абсолютный рекорд по образованию производственных отходов. 2020. Disponível: < <https://finexpertiza.ru/press-service/researches/2020/rekord-proizvodstv-otkhod/>> Acesso em: 26 jun. 2024.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Advancing Sustainable Materials Management: 2018 Fact Sheet Assessing Trends in Materials Generation and Management in the United States. 2020. Disponível: < https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-01/documents/2018_ff_fact_sheet_dec_2020_fnl_508.pdf> Acesso em: 12 jul. 2024.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Construction and Demolition Debris: Material-Specific Data. 2023. Disponível: < <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/construction-and-demolition-debris-material/>> Acesso em: 10 jul. 2024.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Overviews and Factsheets. 2018. Disponível: < <https://www.epa.gov/smm/sustainable-management-construction-and-demolition-materials/>> Acesso em: 12 jul. 2024.

UCHOA, J. C. M.; LIMA, N. K. S.; MELO, C. V. A.; LIMA, J. P. A.; CASTRO, L. S. C.; PRIMO, D. S. Análise de argamassas cimentícias com uso de agregados reciclados mistos e diferentes tipos de aditivos redutores de água. In: 65º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2024a, Maceió. **Anais...** Brasil: Centro de Convenções de Maceió, 2024a. p. 1-14.

UCHOA, J. C. M.; MORAES, K. A. M.; SANTOS, A. R.; LIMA, J. P. A.; CASTRO, L. S. C.; PRIMO, D. S. Estudo de diferentes procedimentos de cura em concretos com uso de agregados reciclados mistos graúdos e metacaulim. In: 65º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2024b, Maceió. **Anais...** Brasil: Centro de Convenções de Maceió, 2024b. p. 1-13.

UCHOA, J. C. M.; MARQUES, M. D. **Estudo da vida útil das estruturas de concreto armado frente ao teor de íons cloreto na cidade de Maceió/AL**. 2021. 91 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Civil, Centro Universitário Cesmac, Maceió, 2021.

UCHÔA, Júlio Cezar de Mendonça; CARVALHO, Francisco Silva Antônio. Logística reversa na construção civil: implicações para a sustentabilidade empresarial e o meio ambiente. In: LIMA, L. A. O.; ALVES, J. P. C.; MORAES, A. R. C. V.; PEDROSA, G. A.; BRAZ, L. M. N.; GOMES, J. P.; SOUSA, K. L.; GOMES FILHO, T. A.; SILVA, L. G.; PEREIRA, R.; NUNES, N. R. A.; CANEQUIM, B. H.; FIGUEIREDO, D. S. (org.). **Sustentabilidade e Inclusão: Práticas contemporâneas no âmbito da gestão, educação e saúde**. São José dos Pinhais: Seven, 2024d. p. 44-52.

UCHÔA, Júlio César de Mendonça; FREITAS, Leninne Guimarães; PEREIRA, Ivone Vieira; BERTOULO, Claudemir; OLIVEIRA, Alessandro Silva; JACOMINI, Rafael Gomes; AMARAL, Joubert Caetano; CERQUEIRA, Homero de Giorge; MACIEL, Wagner Alves; PINHEIRO, Leandro Andrei Lopes; CAPRONI NETO, Henrique Luiz; SOUSA JUNIOR, Francisco Souto. A importância do marketing verde como ferramenta mercadológica para o consumo e a conscientização sustentável. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 18, n. 10, p. 1 -11, 2024c.

UMAR, Usman Aminu; SHAFIQ, Nasir; AHMAD, Farah Amira. A case study on the effective implementation of the reuse and recycling of construction & demolition waste management practices in Malaysia. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 12, p. 283-291, 2021.

UMAR, Usman Aminu; SHAFIQ, Nasir; ISA, Mohamed Hasnain. Investigation of construction wastes generated in the Malaysian residential sector. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, v. 36, n. 12, p. 1-18, ago./2018.

UMAR, Usman Aminu; SHAFIQ, Nasir; MALAKAHMAD, Amirhossein; NURUDDIN, Muhd Fadhil; KHAMIDI, Mohd Faris. A review on adoption of novel techniques in construction waste management and policy. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 19, n. 4, p. 1361–1373, 2017.

UNAM, Universidad Nacional Autónoma de México. Methodology for Locating Final Disposal Sites for Construction and Demolition Waste Using Geographic Information Systems: Case Study Mexico City; Technical Report; National Autonomous University of Mexico—Secretariat of Science, Technology and Innovation: Mexico City, Mexico, 2017; p. 261.

USEPA. **Advancing Sustainable Materials Management: 2018 Fact Sheet: Assessing Trends in Materials Generation and Management in the United States**. USEPA:Washington, DC, USA, 2020.

VASSILEVA, Magdalena; AL-HALBOUNI, Djamil; MOTAGH, Mahdi; WALTER, Thomas R.; DAHM, Torsten; WETZEL, Hans-Ulrich. A decade-long silent ground subsidence hazard culminating in a metropolitan disaster in Maceió, Brazil. **Scientific Reports**, v. 11, n. 7704, p. 1 -13, abr./2021.

VIANA NETO, Luís Antônio da Cunha; SALES, Angela Teresa Costa; SALES, Lucila Costa. Efeitos da variabilidade de agregados de RCD sobre o desempenho mecânico do concreto de cimento Portland. **Revista Matéria**. v. 23, n. 1, p. 1-11, 2018.

VIEIRA, G. L.; DAL MOLIN, D. C. C. Viabilidade técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. **Ambiente Construído**, v. 4, n. 4, p. 47–63, 2008.

VIEIRA, G. M. **Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons cloreto obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de resíduos de construção e demolição**. 2003. 151 f. Dissertação (Mestre em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

VIEIRA, L. DE B. P.; FIGUEIREDO, A. D. DE; JOHN, V. M. Evaluation of the use of crushed returned concrete as recycled aggregate in ready-mix concrete plant. **Journal of Building Engineering**, v. 31, set./2020.

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.

VILLIERS, Wibke De; MWONGO, Mwititi; BABAFEMI, Adewumi John; ZIJL, Gideon Van. Quantifying Recycled Construction and Demolition Waste for Use in 3D-Printed Concrete. **Recycling**, v. 9, n. 55, p. 1-17, jun./2024.

VLIEGER, Jentel De; BLAAKMEER, Jan; GRUYAERT, Elke; LI, Jiabin; CIZER, Ozlem. Rheology of 3d Printing Mortar with Recycled Sand. **SSRN (preprint article)**, p. 1-28, jan./2024.

WANG, Bo; YAN, Libo; FU, Qiuni; KASAL, Bohumil. A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 171, n. 105565, ago./2021

WANG, Jiayuan; WU, Huanyu; TAM, Vivian W. Y.; ZUO, Jian. Considering life-cycle environmental impacts and society's willingness for optimizing construction and demolition waste management fee: An empirical study of China. **Journal of Cleaner Production**, v. 206, p. 1004-1014, jan./2019.

WANG, Zhenshuang; XIE, Wanchen; LIU, Jingkuang. Regional differences and driving factors of construction and demolition waste generation in China. **Engineering, Construction and Architectural Management**, v. 29, n. 6, jun./2022.

WU, Huanyu; ZUO, Jian; ZILLANTE, George; WANG, Jiayuan; DUAN, Huabo. Environmental impacts of cross-regional mobility of construction and demolition waste: An Australia Study. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 174, n. 105805, nov./2021.

WU, Huanyu; ZUO, Jian; ZILLANTE, George; WANG, Jiayuan; YUAN, Hongping. Status quo and future directions of construction and demolition waste research: A critical review. **Journal of Cleaner Production**, v. 240, n. 118163, dez./2019.

XIAO, Jianzhuang; LI, Wengui; FAN, Yuhui; HUANG, Xiao. An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996–2011). **Construction and Building Materials**. v. 31, p. 364-383, jun./2012.

YACOUB, A.; DJERBI, A.; FEN-CHONG, T. Water absorption in recycled sand: New experimental methods to estimate the water saturation degree and kinetic filling during mortar mixing. **Construction and Building Materials**. v. 158, p. 464-471, 2018.

YAN, Jie; LIU, Xinglong; WANG, Xiaotian; WANG, Lijun; WENG, Weisu; YU, Xutao; XING, Guobin; XIE, Jun; LU, Chao; LUO, Yan; LAI, Zhenquan; SHAN, Doudou. Influence of nano-attapulgit on compressive strength and microstructure of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Composites**. v. 8, n. 1, p. 494-502, 2022.

YANG, Jian; DU, Qiang; BAO, Yiwang. Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 4, p. 1935-1945, abr./2011.

YAPRAK, Hasbi; ARUNTAS, Hüseyin Yılmaz; DEMIR, İlhami; SIMSEK, Osman; DURMUS, Gökhan. Effects of the fine recycled concrete aggregates on the concrete properties. **International Journal of the Physical Sciences**. v. 6, n. 10, p. 2455–2461, mai./2011.

YAZDANI, Maziar; KABIRIFAR, Kamyar; FRIMPONG, Boadu Elijah; SHARIATI, Mahdi; MIRMOZAFFARI, Mirpouya; BOSKABADI, Azam. **Journal of Cleaner Production**, v. 280, n. 124138, jan./2021.

YOON, Sanghyuck; CHOI, Wonyoung; JEON, Chansoo. Effects of the recycled coarse aggregate mixing ratio on the characteristics of concrete with different design strengths. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, p. 1-12, jun./2024.

YOUNIS, K. H.; AMIN, A. A.; AHMED, H. G.; MARUF, S. M. Recycled Aggregate Concrete including Various Contents of Metakaolin: Mechanical Behavior. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2020, n. 8829713, p. 1-17, dez./2020.

YOUNIS, K. H; MUSTAFA, S. M. Feasibility of using nanoparticles of SiO₂ to improve the performance of recycled aggregate concrete. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2018, n. 1512830, p. 1-11, 2018.

YU, Xiao-qing; ZHANG, Miao; LI, Chen-ye; KIMITOSHI, Hayano; XIN, Kang. Synergistic Effects of Recycled Demolition Waste and GGBS-FA based Geopolymers on the Mechanical Properties and Stabilization Mechanism of High Plasticity Clay. **Case Studies in Construction Materials (Journal Pre-proof)**, n. e03261, p. 1-50, mai. 2024.

ZHANG, Chunbo; HU, Mingming; DI MAIO, Francesco; SPRECHER, Benjamin; YANG, Xining; TUKKER, Arnold. An overview of the waste hierarchy framework for analyzing the circularity in construction and demolition waste management in Europe. **Science of the Total Environment**, v. 803, n. 149892, jan./2022.

ZHANG, Mingzhong. Pore-scale modelling of relative permeability of cementitious materials using X-ray computed microtomography images. **Cement and Concrete Research**, v. 95, p. 18-29, mai./2017.

ZHANG, N.; DUAN, H.; MILLER, T. R.; TAM, V. W. Y; LIU, G.; ZUO, J. Mitigation of carbon dioxide by accelerated sequestration in concrete debris. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 117, n. 109495, p. 1-17, jan./2020.

ZHANG, S.; ZONG, L. Properties of concrete made with recycled coarse aggregate from waste brick. **Environmental Science & Technology**, v. 33, n. 2, p. 482–489, 2013.

ZHENG, Lina; WU, Huanyu; ZHANG, Hui; DUAN, Huabo; WANG, Jiayuan; JIANG, Weiping; DONG, Biqin; LIU, Gang; ZUO, Jian; SONG, Qingbin. Characterizing the generation and flows of construction and demolition waste in China. **Construction and Building Materials**, v. 136, p. 405-413, abril./2017.

ZONG, Lan; FEI, Zhengyue; ZHANG, Shiping. Permeability of recycled aggregate concrete containing fly ash and clay brick waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 70, p. 175-182, mai./2014

ZORDAN, S.; PAULON, V. A.; A Utilização do Entulho como Agregado para o Concreto. **Engenharia e Construção**, v. 44, n. 45, p. 19-21, mai./2000.

APÊNDICE A – Resultados dos ensaios no estado endurecido dos concretos e a estatística desses resultados do laboratório

Tabela A1 – Dados de resistência à compressão no laboratório

Misturas	Resistência à compressão (MPa)			
	Tipo de cura			
	Cura ao ar		Cura úmida	
	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
FC	39,0	53,5	37,1	57,0
	40,4	53,4	39,5	53,5
	40,1	52,3	41,6	54,6
Média	39,8	53,1	39,4	55,0
Desvio Padrão	0,6	0,5	1,8	1,5
CV (%)	1,5	1,0	4,7	2,7
FC2	30,1	46,7	34,6	51,3
	32,8	47,7	32,2	51,5
	38,2	52,0	38,8	45,3
Média	33,7	48,8	35,2	49,4
Desvio Padrão	3,4	2,3	2,7	2,9
CV (%)	10,0	4,7	7,7	5,8
FC3	35,2	29,6	30,9	33,9
	35,2	33,7	33,5	30,5
	33,4	32,8	35,8	35,1
Média	34,6	32,0	33,4	33,2
Desvio Padrão	0,8	1,8	2,0	1,9
CV (%)	2,5	5,5	6,0	5,9
FC4	33,8	37,8	34,2	40,7
	34,4	40,7	33,2	41,0
	42,5	45,2	33,0	41,1
Média	36,9	41,2	33,5	40,9
Desvio Padrão	4,0	3,0	0,5	0,2
CV (%)	10,8	7,4	1,6	0,4
FC5	30,5	34,1	35,2	26,5
	33,5	31,5	27,5	28,8
	34,8	29,0	26,6	27,9
Média	32,9	31,5	29,8	27,7
Desvio Padrão	1,8	2,1	3,9	0,9
CV (%)	5,5	6,6	13,0	3,4

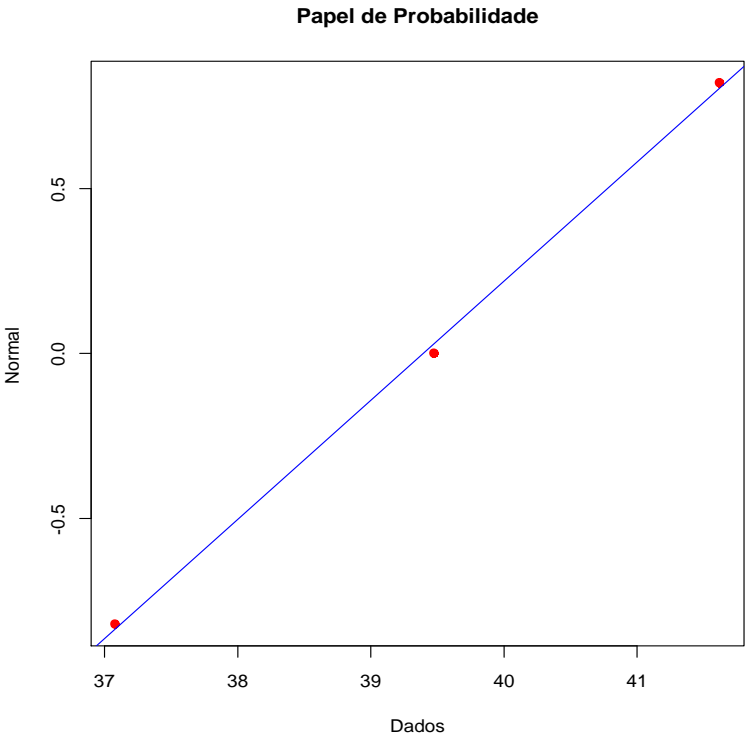
continua

conclusão

Misturas	Resistência à compressão (MPa)			
	Tipo de cura			
	Cura ao ar		Cura úmida	
	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
FC6	32,0	36,1	33,7	31,4
	33,2	39,5	28,8	26,0
	30,3	38,0	29,5	25,2
Média	31,8	37,9	30,7	27,5
Desvio Padrão	1,2	1,4	2,2	2,8
CV (%)	3,7	3,7	7,1	10,0

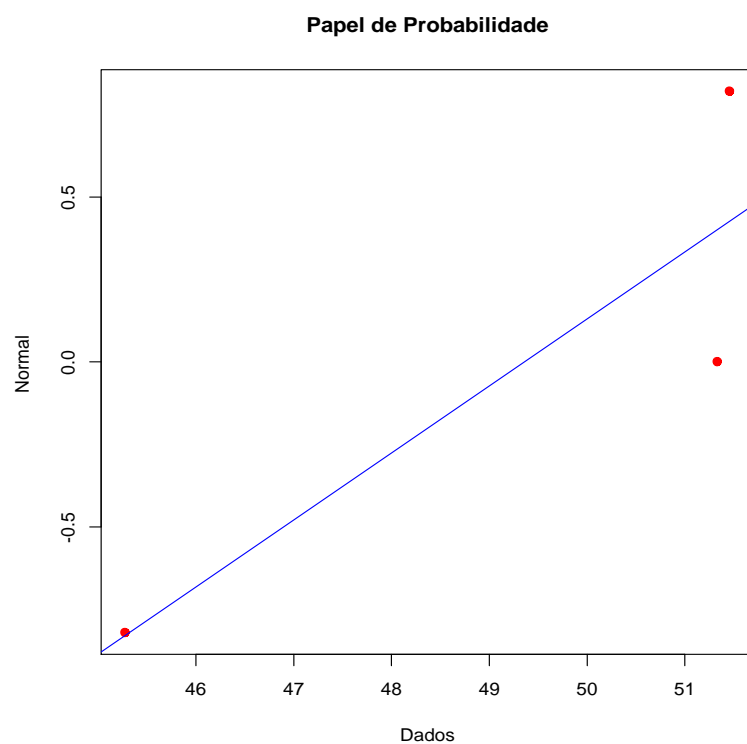
Fonte: Autor, 2024

Figura A1 – Teste de normalidade Shapiro Wilk com dados normais na propriedade de resistência à compressão (7 dias Cura úmida – FC)



Fonte: Autor, 2024

Figura A2 – Teste de normalidade Shapiro Wilk com dados não normais na propriedade de resistência à compressão (28 dias Cura úmida – FC2)



Fonte: Autor, 2024

Tabela A2 – Absorção de água por capilaridade (FC)

FC	Cura úmida			Cura ao ar			Unidade
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	
m_s	3610	3570	3590	3620	3710	3680	g
m_{sat-3h}	3640	3600	3620	3655	3730	3715	g
m_{sat-6h}	3640	3605	3625	3660	3730	3715	g
$m_{sat-24h}$	3655	3615	3635	3670	3735	3715	g
$f_{ct,sp}$	2,81	3,54	3,43	2,84	4,06	3,9	MPa
$f_{ct,sp}$ - média	3,26			3,6			MPa
DP ($f_{ct,sp}$)	0,32			0,54			MPa
CV ($f_{ct,sp}$)	9,91			15,02			(%)
F	88259,85	111305,48	107873,15	89240,52	127486,45	122583,1	N
d	100	100	100	100	100	100	mm
ℓ	200	200	200	200	200	200	mm
S	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	cm ²
C_{3h}	0,38	0,38	0,38	0,45	0,25	0,45	g/cm ²
C_{3h} - média	0,38			0,38			g/cm ²
C_{6h}	0,38	0,45	0,45	0,51	0,25	0,45	g/cm ²
C_{6h} - média	0,42			0,4			g/cm ²
C_{24h}	0,57	0,57	0,57	0,64	0,32	0,45	g/cm ²
C_{24h} - média	0,57			0,47			g/cm ²
DP (C_{24h})	0,00			0,13			g/cm ²
CV (C_{24h})	0,00			28,02			(%)
AACMI _{esquerda} - direita	4,2	3,9	4,0	6,0	4,5	4,0	cm
	4,0	4,0	4,0	6,0	4,7	4,0	cm
AACMI _{média} (esquerda - direita)	4,03			4,83			cm
	4,00			4,90			cm
DP _{esquerda-direita}	0,12			0,85			cm
	0,00			0,83			cm
CV _{esquerda-direita}	3,09			17,58			(%)
	0,00			16,91			(%)

Fonte: Autor, 2024

Tabela A3 – Absorção de água por capilaridade (FC2)

FC2	Cura úmida			Cura ao ar			Unidade
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	
m_s	3565	3655	3710	3695	3690	3715	g
m_{sat-3h}	3585	3665	3725	3720	3715	3735	g
m_{sat-6h}	3585	3670	3730	3725	3720	3740	g
$m_{sat-24h}$	3590	3675	3735	3730	3725	3745	g
$f_{ct,sp}$	3,34	3,28	2,90	3,00	3,00	2,75	MPa
$f_{ct,sp}$ - média	3,17			2,91			MPa
DP ($f_{ct,sp}$)	0,19			0,12			MPa
CV ($f_{ct,sp}$)	6,08			4,04			(%)
F	104931,20	102969,83	91201,85	94143,84	94143,84	86298,52	N
d	100	100	100	100	100	100	mm
ℓ	200	200	200	200	200	200	mm
S	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	cm ²
C_{3h}	0,25	0,13	0,19	0,32	0,32	0,25	g/cm ²
C_{3h} - média	0,19			0,3			g/cm ²
C_{6h}	0,25	0,19	0,25	0,38	0,38	0,32	g/cm ²
C_{6h} - média	0,23			0,36			g/cm ²
C_{24h}	0,32	0,25	0,32	0,45	0,45	0,38	g/cm ²
C_{24h} - média	0,3			0,42			g/cm ²
DP (C_{24h})	0,03			0,03			g/cm ²
CV (C_{24h})	10,1			7,07			(%)
AACMI _{esquerda} - direita	4,5	4,6	4,0	4,3	5,0	4,0	cm
	5,4	3,4	4,0	5,8	4,7	4,0	cm
AACMI _{média} (esquerda - direita)	4,37			4,43			cm
	4,27			4,83			cm
DP _{esquerda-direita}	0,26			0,42			cm
	0,84			0,74			cm
CV _{esquerda-direita}	6,01			9,45			(%)
	19,64			15,33			(%)

Fonte: Autor, 2024

Tabela A4 – Absorção de água por capilaridade (FC3)

FC3	Cura úmida			Cura ao ar			Unidade
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	
m_s	3600	3625	3580	3490	3625	3515	g
m_{sat-3h}	3615	3635	3595	3515	3645	3540	g
m_{sat-6h}	3625	3645	3630	3525	3650	3550	g
$m_{sat-24h}$	3645	3660	3630	3540	3665	3570	g
$f_{ct,sp}$	3,18	3,12	2,5	3,12	3,06	3,22	MPa
$f_{ct,sp}$ - média	2,93			3,13			MPa
DP ($f_{ct,sp}$)	0,31			0,06			MPa
CV ($f_{ct,sp}$)	10,57			2,05			(%)
F	100027,83	98066,5	78453,2	98066,5	96105,17	101008,5	N
d	100	100	100	100	100	100	mm
ℓ	200	200	200	200	200	200	mm
S	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	cm ²
C_{3h}	0,19	0,13	0,19	0,32	0,25	0,32	g/cm ²
C_{3h} - média	0,17			0,3			g/cm ²
C_{6h}	0,32	0,25	0,64	0,45	0,32	0,45	g/cm ²
C_{6h} - média	0,4			0,4			g/cm ²
C_{24h}	0,57	0,45	0,64	0,64	0,51	0,7	g/cm ²
C_{24h} - média	0,55			0,62			g/cm ²
DP (C_{24h})	0,08			0,08			g/cm ²
CV (C_{24h})	14,39			12,9			(%)
AACMI _{esquerda}	5	4,6	4,5	4,2	4,5	4,4	cm
- direita	5,4	4,3	5,4	4,5	4,5	4,4	cm
AACMI _{média}	4,7			4,37			cm
(esquerda - direita)	5,03			4,47			cm
DP _{esquerda-}	0,22			0,12			cm
- direita	0,52			0,05			cm
CV _{esquerda-}	4,6			2,86			(%)
- direita	10,3			1,06			(%)

Fonte: Autor, 2024

Tabela A5 – Absorção de água por capilaridade (FC4)

FC4	Cura úmida			Cura ao ar			Unidade
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	
m_s	3600	3615	3590	3555	3560	3565	g
m_{sat-3h}	3615	3635	3605	3575	3575	3590	g
m_{sat-6h}	3620	3635	3610	3575	3580	3590	g
$m_{sat-24h}$	3625	3645	3615	3580	3585	3590	g
$f_{ct,sp}$	3,31	3,53	3,15	3,84	3,31	3,28	MPa
$f_{ct,sp}$ - média	3,33			3,48			MPa
DP ($f_{ct,sp}$)	0,15			0,26			MPa
CV ($f_{ct,sp}$)	4,61			7,42			(%)
F	103950,5	110815,15	99047,17	120621,8	103950,5	102969,8	N
d	100	100	100	100	100	100	mm
l	200	200	200	200	200	200	mm
S	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	cm ²
C_{3h}	0,19	0,25	0,19	0,25	0,19	0,32	g/cm ²
C_{3h} - média	0,21			0,25			g/cm ²
C_{6h}	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,32	g/cm ²
C_{6h} - média	0,25			0,28			g/cm ²
C_{24h}	0,32	0,38	0,32	0,32	0,32	0,32	g/cm ²
C_{24h} - média	0,34			0,32			g/cm ²
DP (C_{24h})	0,03			0			g/cm ²
CV (C_{24h})	8,84			0			(%)
AACMI _{esquerda} - direita	3,5	4,2	4	3,2	4,5	4	cm
	3,5	4,5	3,5	4	3	3,2	cm
AACMI _{média} (esquerda - direita)	3,9			3,9			cm
	3,83			3,4			cm
DP _{esquerda-direita}	0,29			0,54			cm
	0,47			0,43			cm
CV _{esquerda-direita}	7,55			13,73			(%)
	12,3			12,71			(%)

Fonte: Autor, 2024

Tabela A6 – Absorção de água por capilaridade (FC5)

FC5	Cura úmida			Cura ao ar			Unidade
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	
m_s	3360	3375	3160	3195	3340	3340	g
m_{sat-3h}	3385	3405	3190	3235	3365	3375	g
m_{sat-6h}	3395	3420	3205	3245	3375	3390	g
$m_{sat-24h}$	3415	3445	3235	3275	3395	3410	g
$f_{ct,sp}$	2,81	2,65	2,5	2,56	2,5	2,43	MPa
$f_{ct,sp}$ - média	2,65			2,5			MPa
DP ($f_{ct,sp}$)	0,13			0,05			MPa
CV ($f_{ct,sp}$)	4,8			2,04			(%)
F	88259,85	83356,525	78453,2	80414,53	78453,2	76491,87	N
d	100	100	100	100	100	100	mm
l	200	200	200	200	200	200	mm
S	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	cm ²
C_{3h}	0,32	0,38	0,38	0,51	0,32	0,45	g/cm ²
C_{3h} - média	0,36			0,42			g/cm ²
C_{6h}	0,45	0,57	0,57	0,64	0,45	0,64	g/cm ²
C_{6h} - média	0,53			0,57			g/cm ²
C_{24h}	0,7	0,89	0,95	1,02	0,7	0,89	g/cm ²
C_{24h} - média	0,85			0,87			g/cm ²
DP (C_{24h})	0,11			0,13			g/cm ²
CV (C_{24h})	12,75			15,04			(%)
AACMI _{esquerda} - direita	5,6	5,0	5,0	6,0	4,8	6,0	cm
	4,0	4,6	5,0	5,8	5,0	4,8	cm
AACMI _{média} (esquerda - direita)	5,2			5,6			cm
	4,53			5,2			cm
DP _{esquerda-direita}	0,28			0,57			cm
	0,41			0,43			cm
CV _{esquerda-direita}	5,44			10,10			(%)
	9,07			8,31			(%)

Fonte: Autor, 2024

Tabela A7 – Absorção de água por capilaridade (FC6)

FC6	Cura úmida			Cura ao ar			Unidade
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	
m_s	3440	3460	3370	3455	3390	3375	g
m_{sat-3h}	3460	3475	3385	3475	3410	3395	g
m_{sat-6h}	3460	3480	3390	3480	3410	3400	g
$m_{sat-24h}$	3470	3490	3400	3490	3420	3410	g
$f_{ct,sp}$	2,93	3,43	2,97	2,78	2,78	2,87	MPa
$f_{ct,sp}$ - média	3,11			2,81			MPa
DP ($f_{ct,sp}$)	0,23			0,04			MPa
CV ($f_{ct,sp}$)	7,34			1,57			(%)
F	92182,51	107873,15	93163,175	87279,19	87279,19	90221,18	N
d	100	100	100	100	100	100	mm
ℓ	200	200	200	200	200	200	mm
S	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	cm ²
C_{3h}	0,25	0,19	0,19	0,25	0,25	0,25	g/cm ²
C_{3h} - média	0,21			0,25			g/cm ²
C_{6h}	0,25	0,25	0,25	0,32	0,25	0,32	g/cm ²
C_{6h} - média	0,25			0,3			g/cm ²
C_{24h}	0,38	0,38	0,38	0,45	0,38	0,45	g/cm ²
C_{24h} - média	0,38			0,42			g/cm ²
DP (C_{24h})	0,00			0,03			g/cm ²
CV (C_{24h})	0,00			7,07			(%)
AACMI _{esquerda} - direita	4,0	3,9	4,0	4,0	4,0	4,0	cm
	4,0	3,9	4,0	4,0	4,0	4,0	cm
AACMI _{média} (esquerda - direita)	3,97			4,00			cm
	3,97			4,00			cm
DP _{esquerda-direita}	0,05			0,00			cm
	0,05			0,00			cm
CV _{esquerda-direita}	1,19			0,00			(%)
	1,19			0,00			(%)

Fonte: Autor, 2024

Tabela A8 – Dados brutos de resistência à compressão (Ar versus Úmida)

Resistência à compressão (MPa)					
Fator	7 dias	28 dias	Fator	7 dias	28 dias
Ar	39,0	53,5	Úmida	37,1	57,0
	40,4	53,4		39,5	53,5
	40,1	52,3		41,6	54,6
	30,1	46,7		34,6	51,3
	32,8	47,7		32,2	51,5
	38,2	52,0		38,8	45,3
	35,2	29,6		30,9	33,9
	35,2	33,7		33,5	30,5
	33,4	32,8		35,8	35,1
	33,8	37,8		34,2	40,7
	34,4	40,7		33,2	41,0
	42,5	45,2		33,0	41,1
	30,5	34,1		35,2	26,5
	33,5	31,5		27,5	28,8
	34,8	29,0		26,6	27,9
	32,0	36,1		33,7	31,4
	33,2	39,5		28,8	26,0
	30,3	38,0		29,5	25,2
Média	35,0	40,8	Média	33,7	39,0
Desvio Padrão	3,6	8,3	Desvio Padrão	4,0	10,7
CV (%)	10,2	20,3	CV (%)	11,8	27,4

Fonte: Autor, 2024

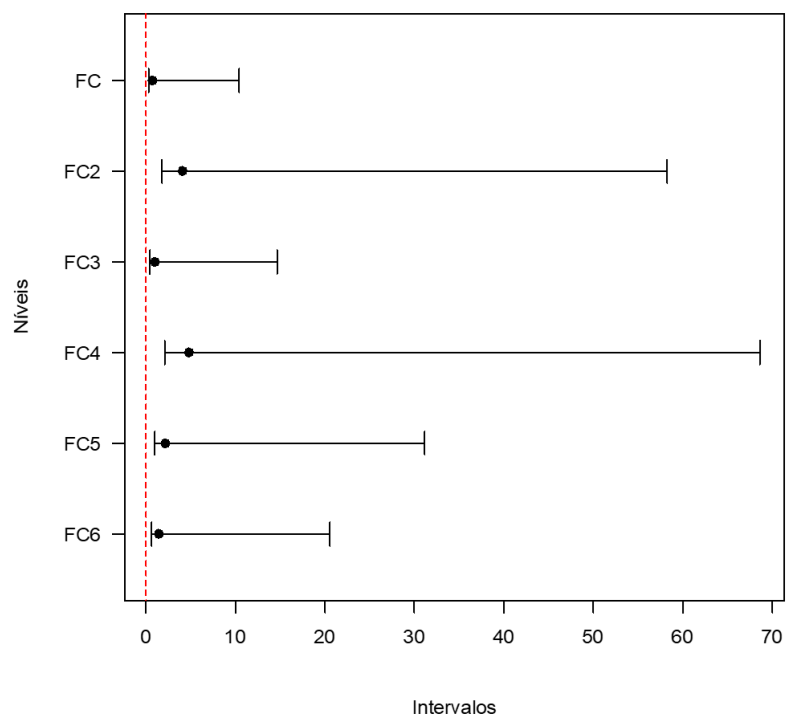
Tabela A9 – Dados brutos de absorção de água por capilaridade aos 28 dias com 24 h de absorção
(Ar versus Úmida)

Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)			
Fator	24 h	Fator	24 h
Ar	0,64	Úmida	0,57
	0,32		0,57
	0,45		0,57
	0,45		0,32
	0,45		0,25
	0,38		0,32
	0,64		0,57
	0,51		0,45
	0,70		0,64
	0,32		0,32
	0,32		0,38
	0,32		0,32
	1,02		0,70
	0,70		0,89
	0,89		0,95
	0,45		0,38
	0,38		0,38
	0,45		0,38
Média	0,52	Média	0,50
Desvio Padrão	0,20	Desvio Padrão	0,20
CV (%)	37,97	CV (%)	39,21

Fonte: Autor, 2024

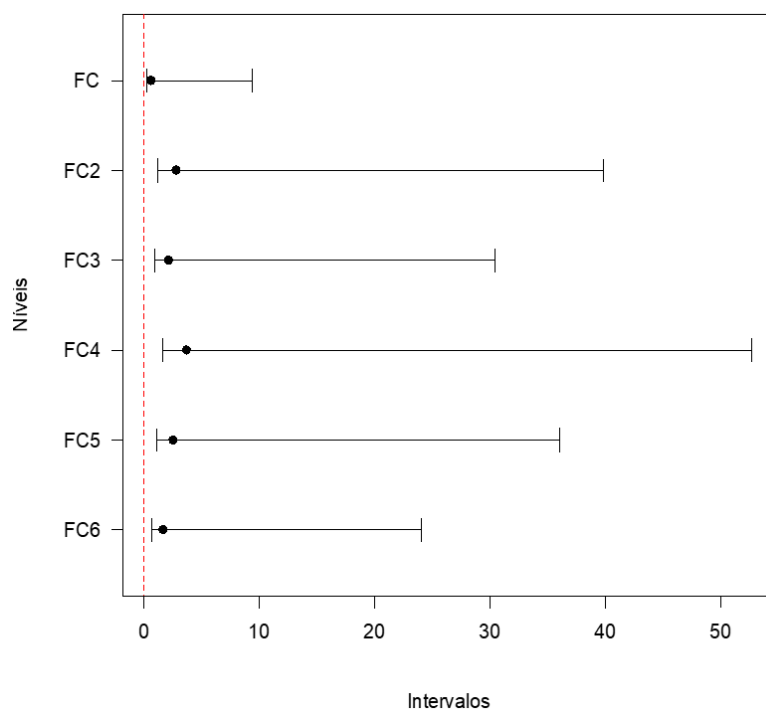
a) Teste de *Bartlett*

Figura A3 – Intervalos de confiança para o desvio padrão na propriedade de resistência à compressão (7 dias – cura ao ar)



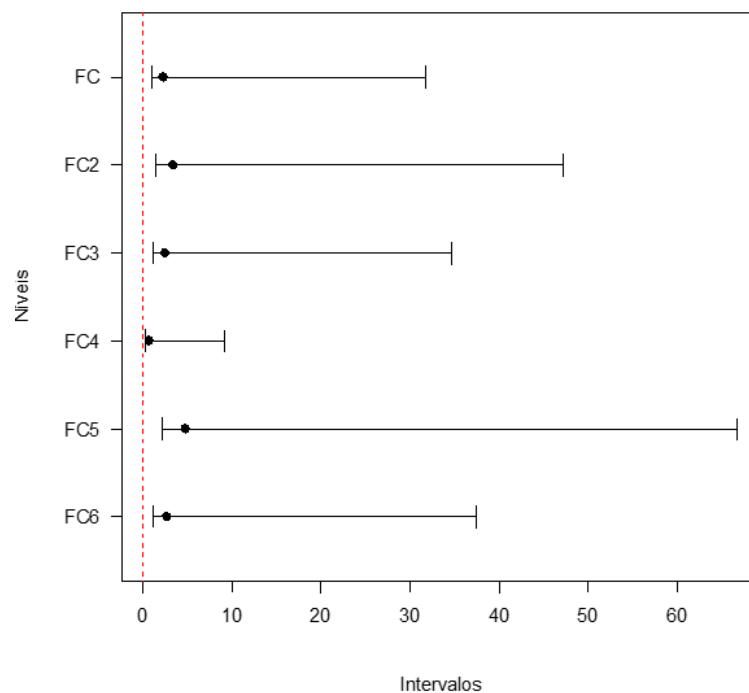
Fonte: Autor, 2024

Figura A4 – Intervalos de confiança para o desvio padrão na propriedade de resistência à compressão (28 dias – cura ao ar)



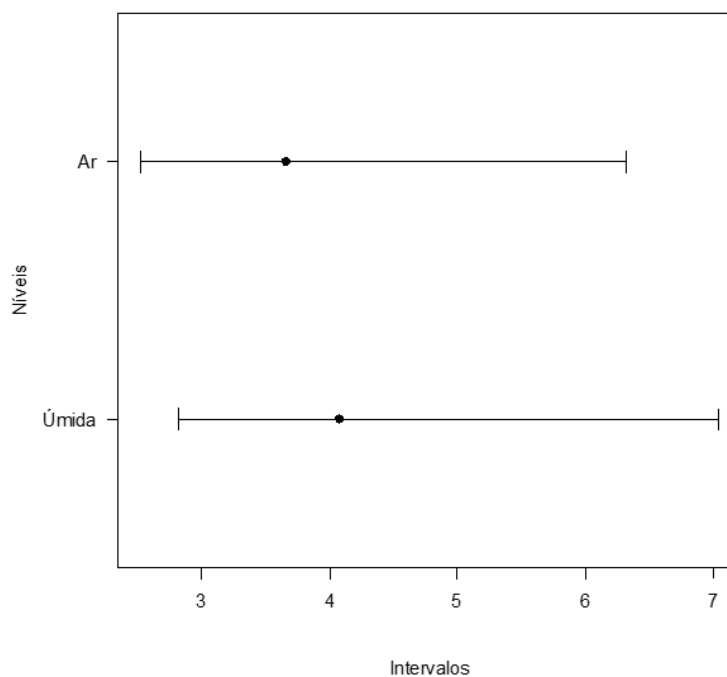
Fonte: Autor, 2024

Figura A5 – Intervalos de confiança para o desvio padrão na propriedade de resistência à compressão (7 dias – cura úmida)



Fonte: Autor, 2024

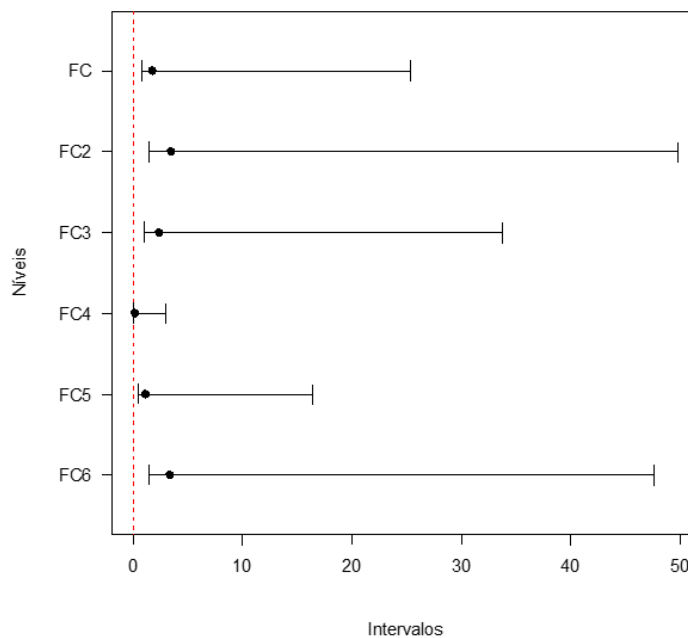
Figura A6 – Intervalos de confiança para o desvio padrão na propriedade de resistência à compressão (7 dias Ar – Úmida)



Fonte: Autor, 2024

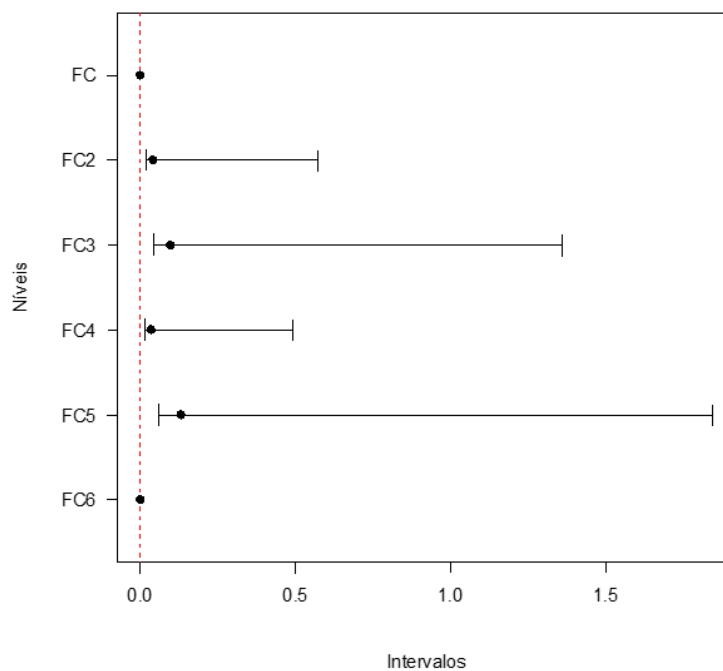
b) Teste de *Levene*

Figura A7 – Intervalos de confiança para o desvio padrão na propriedade de resistência à compressão (28 dias – cura úmida)



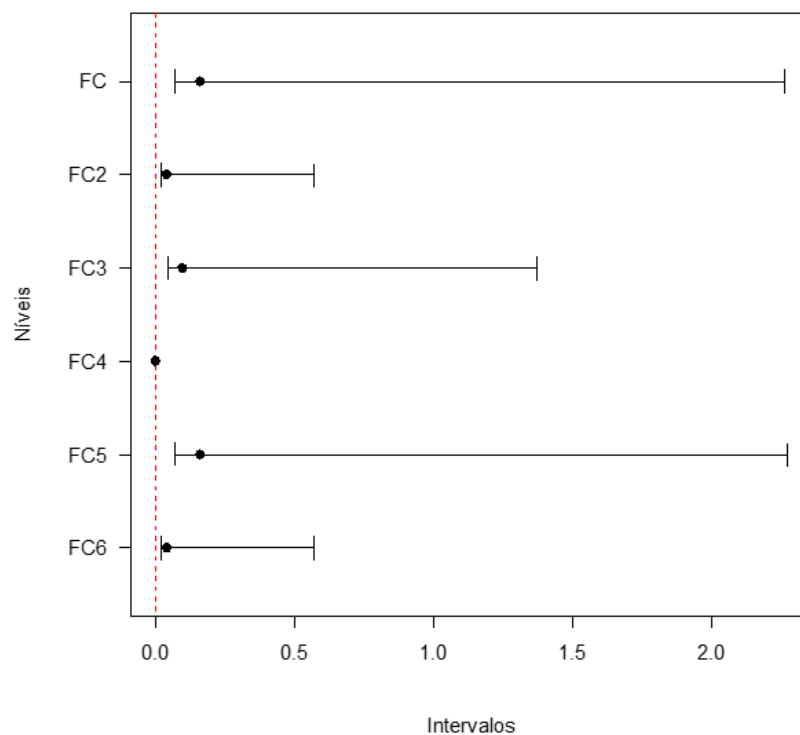
Fonte: Autor, 2024

Figura A8 – Intervalos de confiança para o desvio padrão dos dados de absorção de água por capilaridade (cura úmida – 24h)



Fonte: Autor, 2024

Figura A9 – Intervalos de confiança para o desvio padrão dos dados de absorção de água por capilaridade (cura ao ar –24h)



Fonte: Autor, 2024

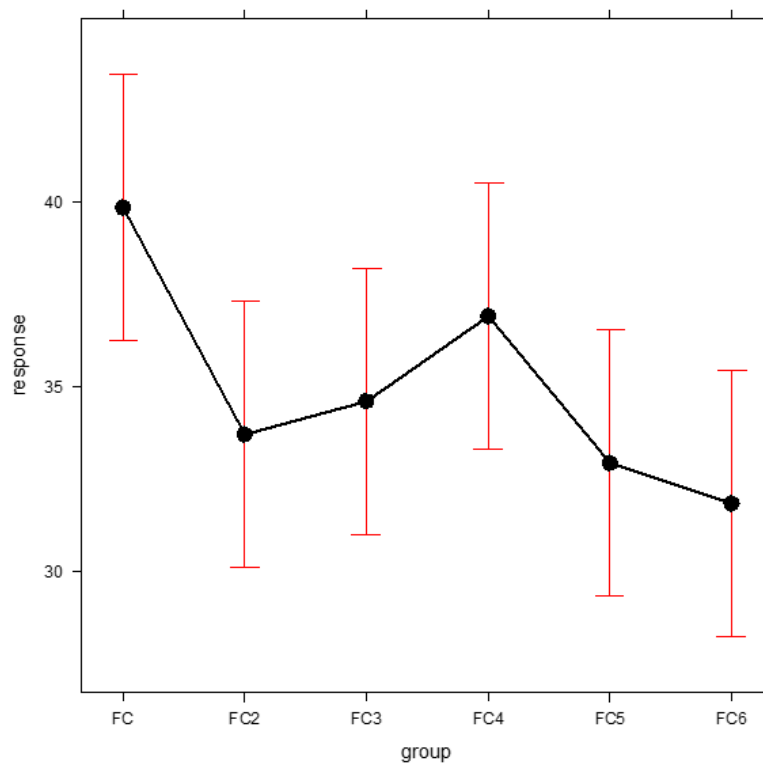
c) Teste de *Kruskal-Wallis*

Tabela A10 – Dados dos efeitos na propriedade de resistência à compressão (7 dias – cura ao ar)

Fatores	Limite Inferior	Efeito	Limite Superior
FC	36,2300	39,8333	43,4366
FC2	30,0967	33,7000	37,3033
FC3	30,9967	34,6000	38,2033
FC4	33,2967	36,9000	40,5033
FC5	29,3300	32,9333	36,5366
FC6	28,2300	31,8333	35,4366

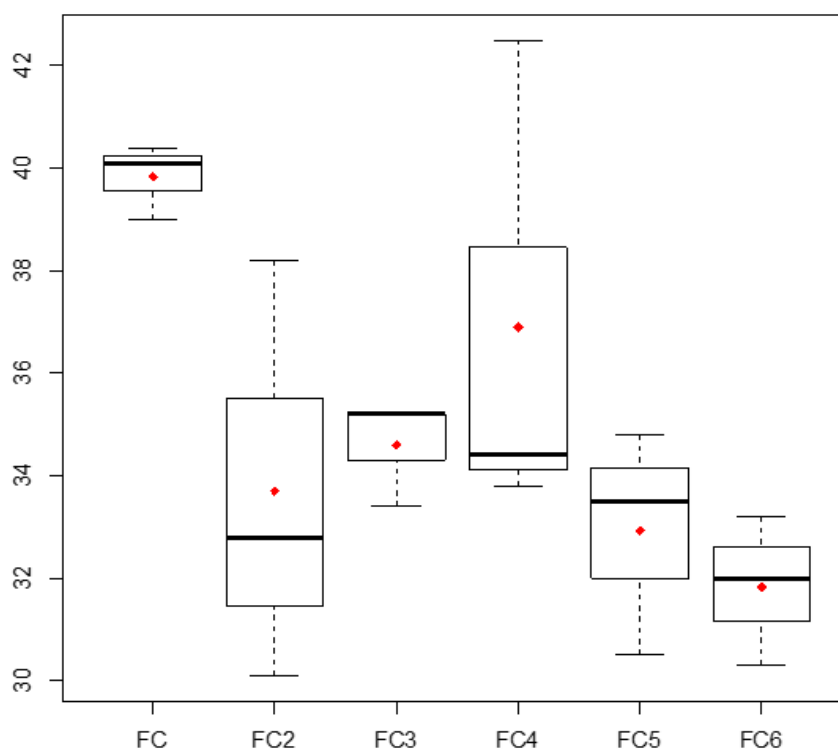
Fonte: Autor, 2024

Figura A10 – Gráfico de efeitos na propriedade de resistência à compressão (7 dias – cura ao ar)



Fonte: Autor, 2024

Figura A11 – Gráfico Boxplot resistência à compressão (7 dias – cura ao ar)



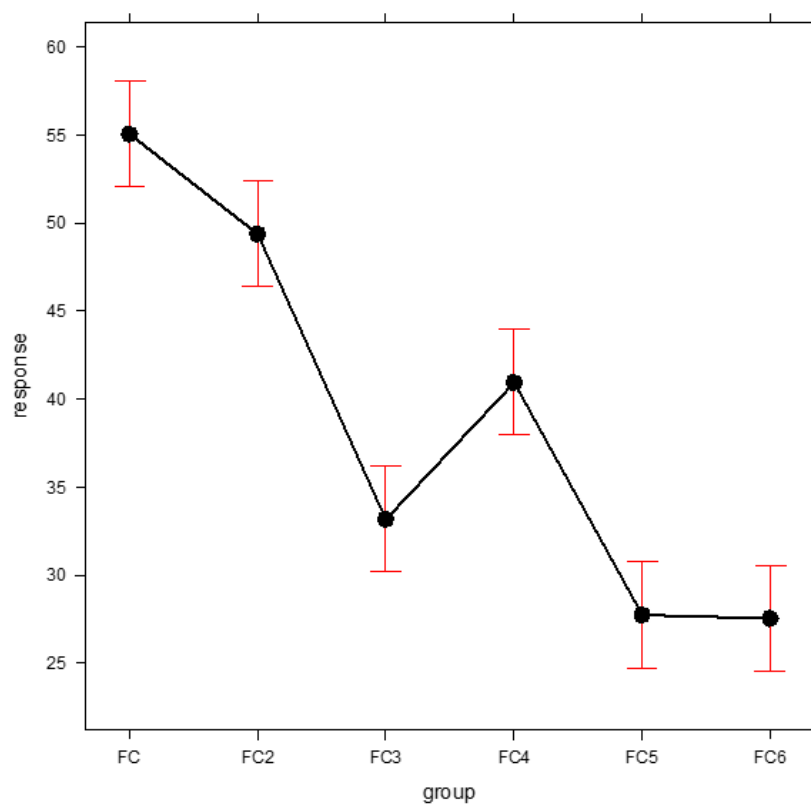
Fonte: Autor, 2024

Tabela A11 – Dados dos efeitos na propriedade de resistência à compressão (28 dias – cura úmida)

Fatores	Limite Inferior	Efeito	Limite Superior
FC	52,0358	55,0333	58,0309
FC2	46,3691	49,3667	52,3642
FC3	30,1691	33,1667	36,1642
FC4	37,9358	40,9333	43,9309
FC5	24,7358	27,7333	30,7309
FC6	24,5358	27,5333	30,5309

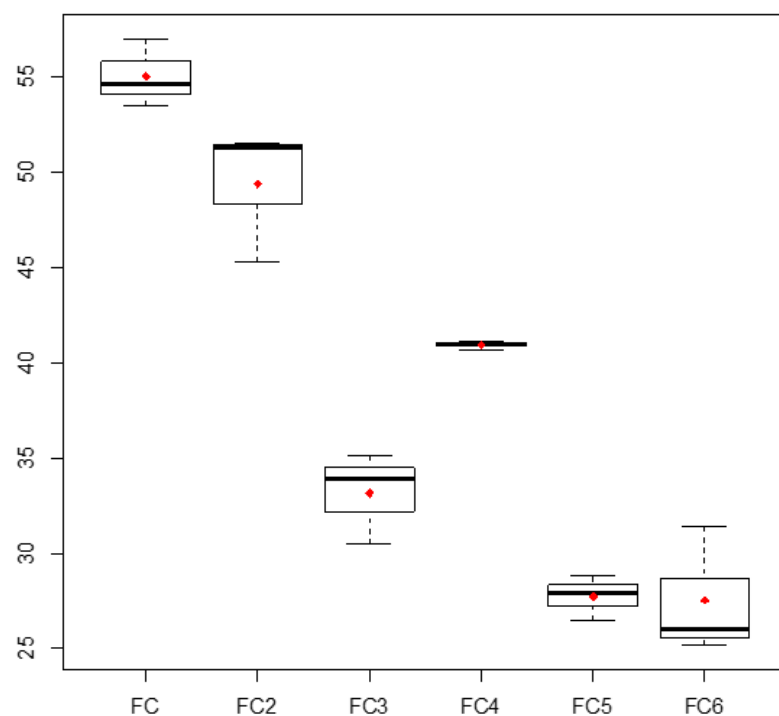
Fonte: Autor, 2024

Figura A12 – Gráfico de efeitos na propriedade de resistência à compressão (28 dias – cura úmida)



Fonte: Autor, 2024

Figura A13 – Gráfico Boxplot resistência à compressão (28 dias – cura úmida)



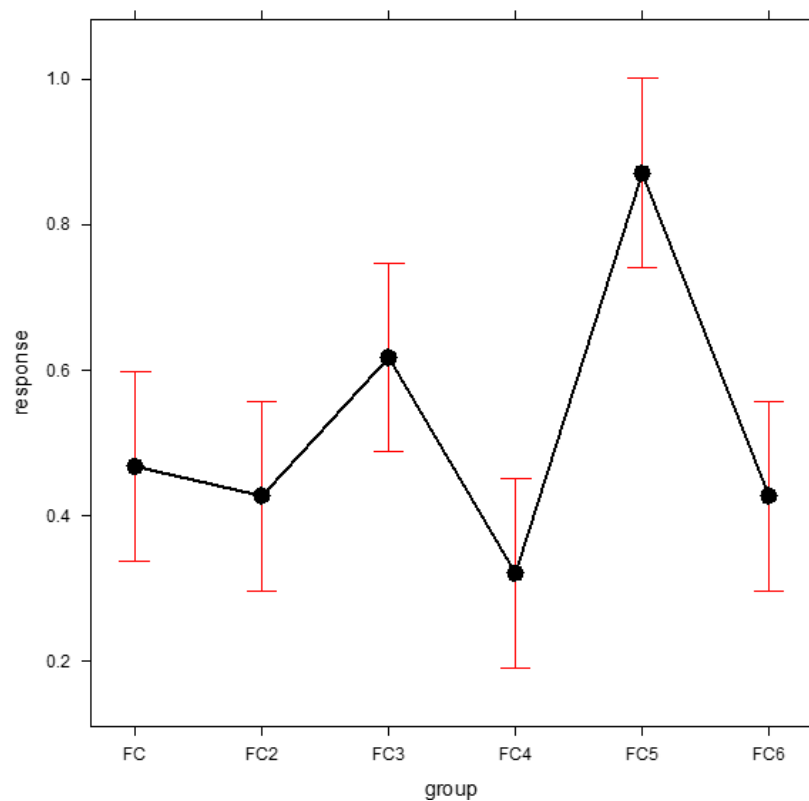
Fonte: Autor, 2024

Tabela A12 – Dados dos efeitos na propriedade de absorção de água por capilaridade (24 h – cura ao ar)

Fatores	Limite Inferior	Efeito	Limite Superior
FC	0,3367	0,4669	0,5970
FC2	0,2965	0,4267	0,5569
FC3	0,4865	0,6167	0,7469
FC4	0,1898	0,3200	0,4502
FC5	0,7398	0,8700	1,0002
FC6	0,2965	0,4267	0,5569

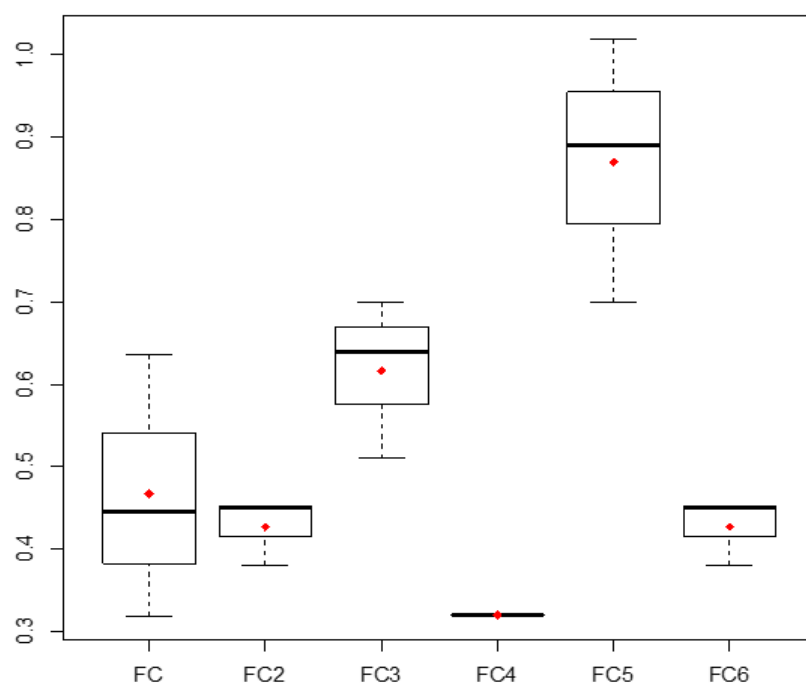
Fonte: Autor, 2024

Figura A14 – Gráfico de efeitos na propriedade de absorção de água por capilaridade (24 h – cura ao ar)



Fonte: Autor, 2024

Figura A15 – Gráfico Boxplot absorção de água por capilaridade (24 h – cura ao ar)



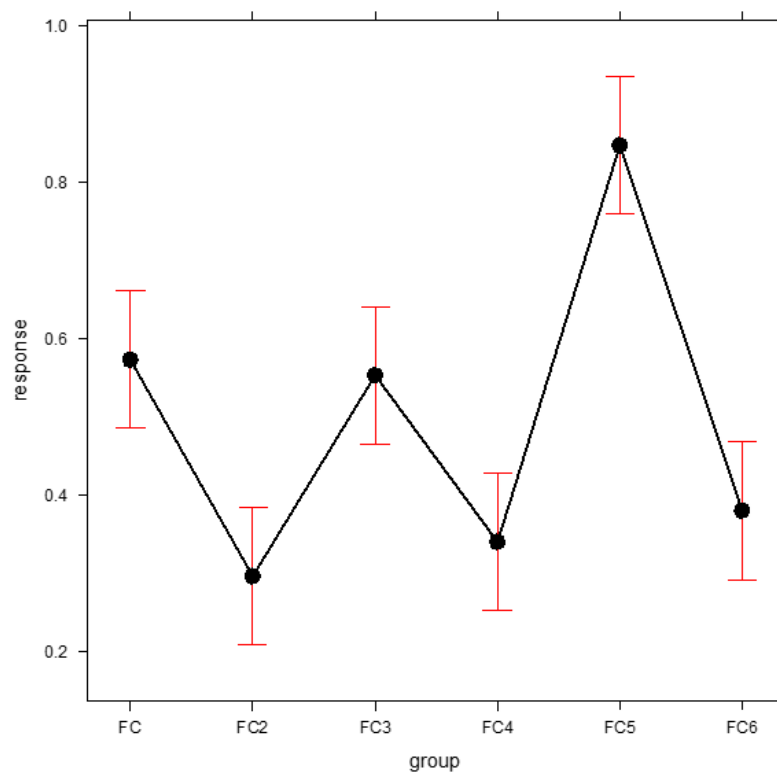
Fonte: Autor, 2024

Tabela A13 – Dados dos efeitos na propriedade de absorção de água por capilaridade (24 h – cura úmida)

Fatores	Limite Inferior	Efeito	Limite Superior
FC	0,4854	0,5730	0,6606
FC2	0,2091	0,2967	0,3843
FC3	0,4657	0,5533	0,6409
FC4	0,2524	0,3400	0,4276
FC5	0,7591	0,8467	0,9343
FC6	0,2924	0,3800	0,4676

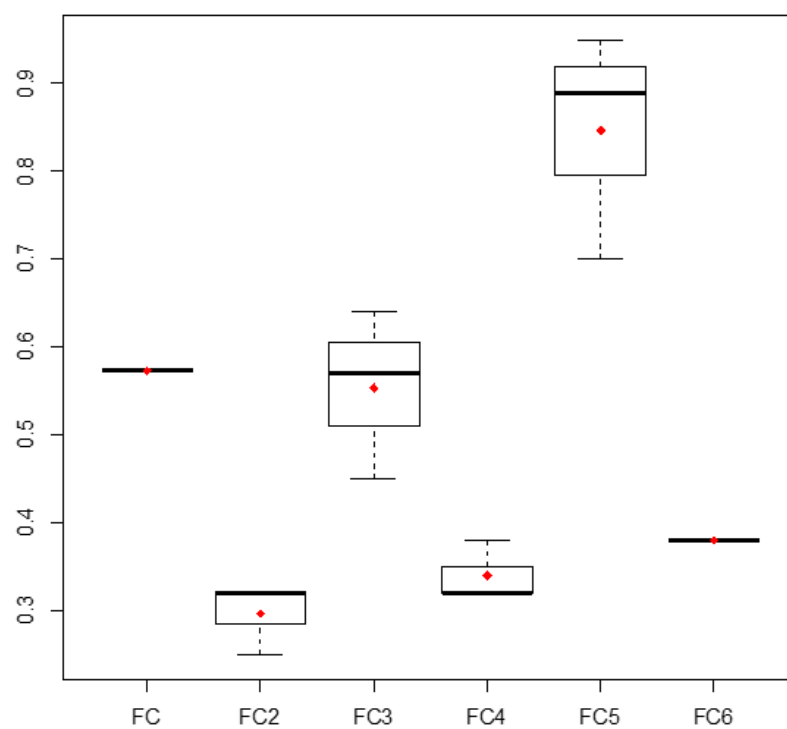
Fonte: Autor, 2024

Figura A16 – Gráfico de efeitos na propriedade de absorção de água por capilaridade (24 h – cura úmida)



Fonte: Autor, 2024

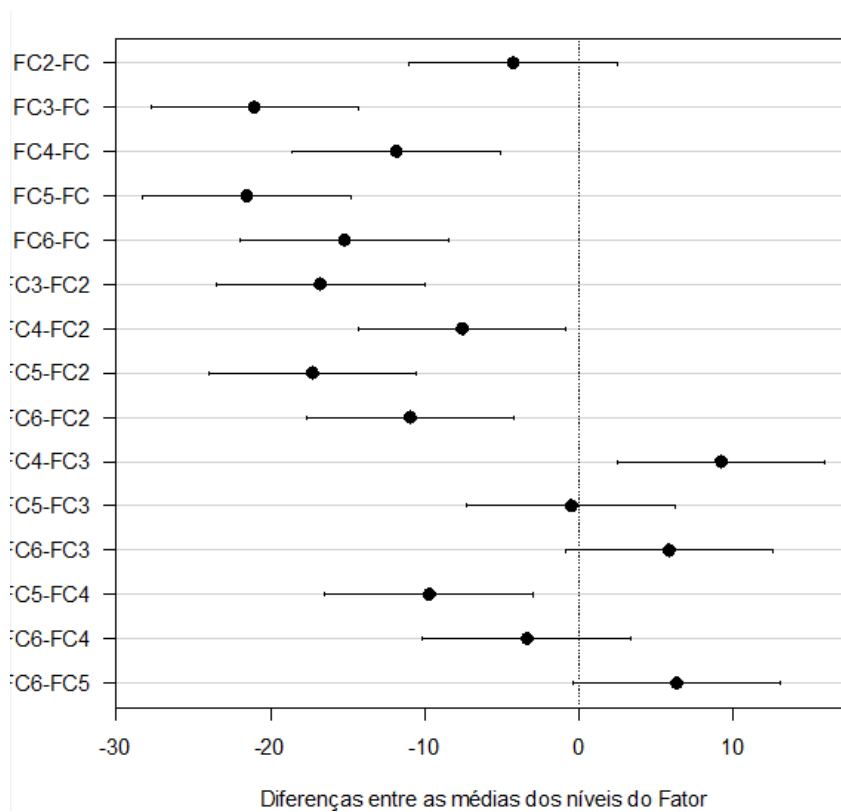
Figura A17 – Gráfico Boxplot absorção de água por capilaridade (24 h – cura úmida)



Fonte: Autor, 2024

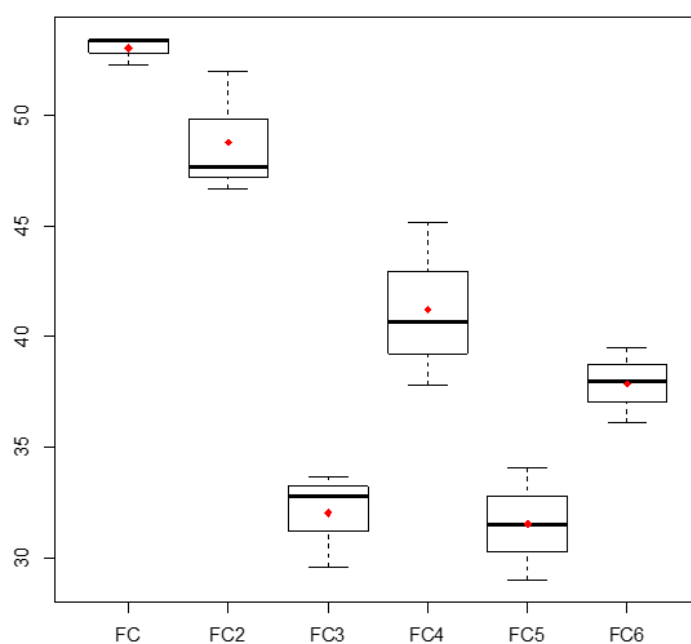
d) Teste de *Tukey*

Figura A18 – Intervalos de confiança (95%) na propriedade de resistência à compressão (28 dias – cura ao ar)



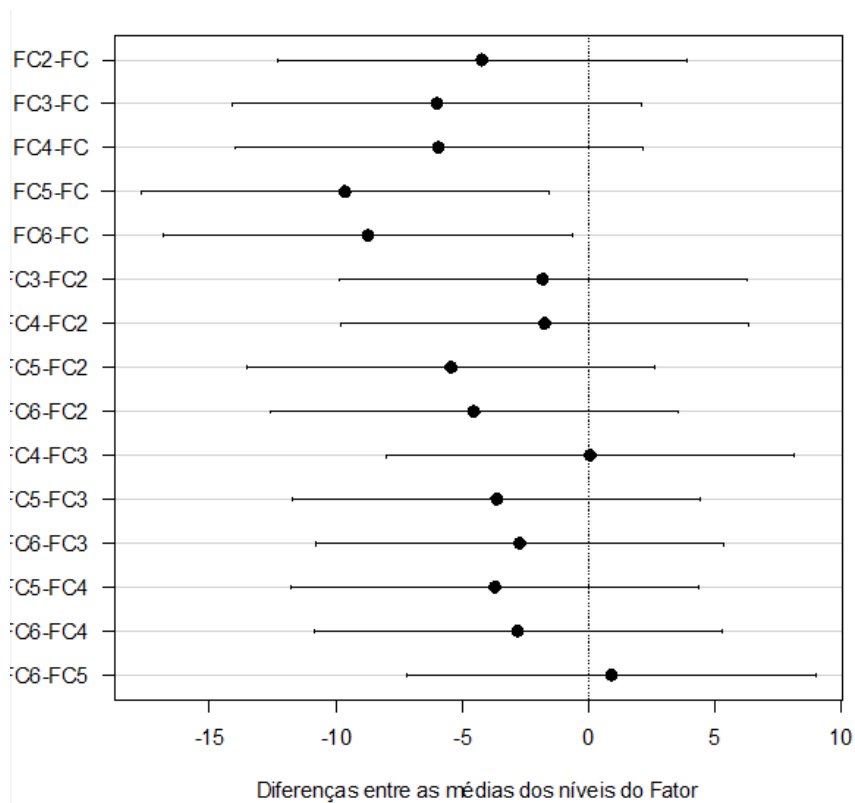
Fonte: Autor, 2024

Figura A19 – Gráfico Boxplot resistência à compressão (28 dias – cura ao ar)



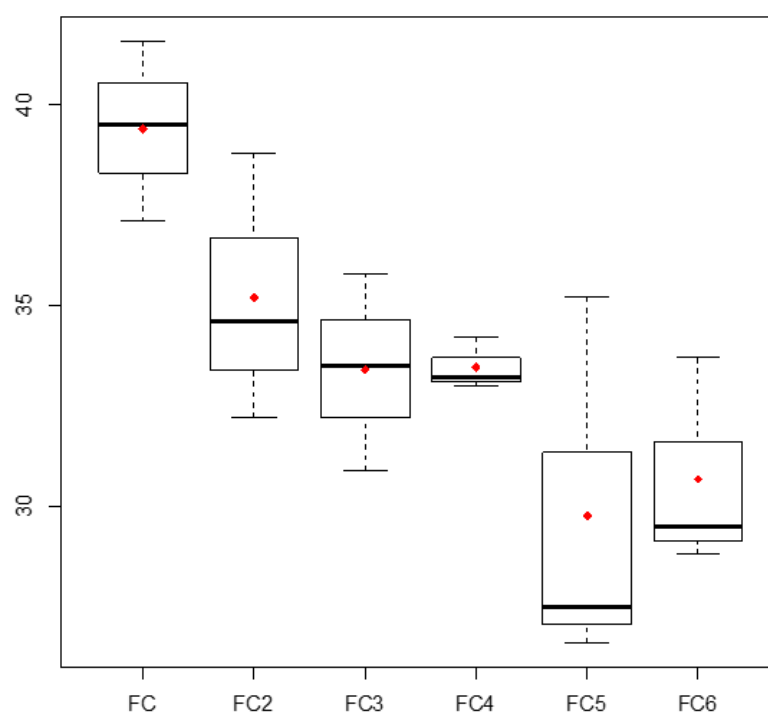
Fonte: Autor, 2024

Figura A20 – Intervalos de confiança (95%) na propriedade de resistência à compressão (7 dias – cura úmida)



Fonte: Autor, 2024

Figura A21 – Gráfico Boxplot resistência à compressão (7 dias – cura úmida)



Fonte: Autor, 2024

APÊNDICE B – Resultados dos ensaios no estado endurecido dos concretos e a estatística desses resultados do campo

Tabela B1 – Dados brutos da propriedade de resistência à compressão (Campo - Obra)

Misturas	Resistência à compressão (MPa)	
	7 dias	28 dias
FC	36,7	39,1
	35,6	38,5
	27,5	37,1
Média	33,3	38,2
Desvio Padrão	4,1	0,8
CV (%)	12,3	2,2
FC2	35,6	48,7
	35,2	37,2
	36,2	41,5
Média	35,6	42,5
Desvio Padrão	0,4	4,7
CV (%)	1,2	11,2
FC3	29,6	40,6
	34,6	38,3
	29,4	38,7
Média	31,2	39,2
Desvio Padrão	2,4	1,0
CV (%)	7,6	2,5
FC4	39,6	39,2
	40,4	39,6
	39,3	41,1
Média	39,8	40,0
Desvio Padrão	0,4	0,8
CV (%)	1,1	2,0
FC5	25,4	27,2
	25,4	30,4
	27,0	27,5
Média	25,9	28,4
Desvio Padrão	0,8	1,4
CV (%)	3,0	5,0

continua

conclusão

Misturas	Resistência à compressão (MPa)	
	7 dias	28 dias
FC6	27,7	34,3
	32,2	34,1
	26,0	33,5
Média	28,6	34,0
Desvio Padrão	2,6	0,3
CV (%)	9,1	0,9

Fonte: Autor, 2024

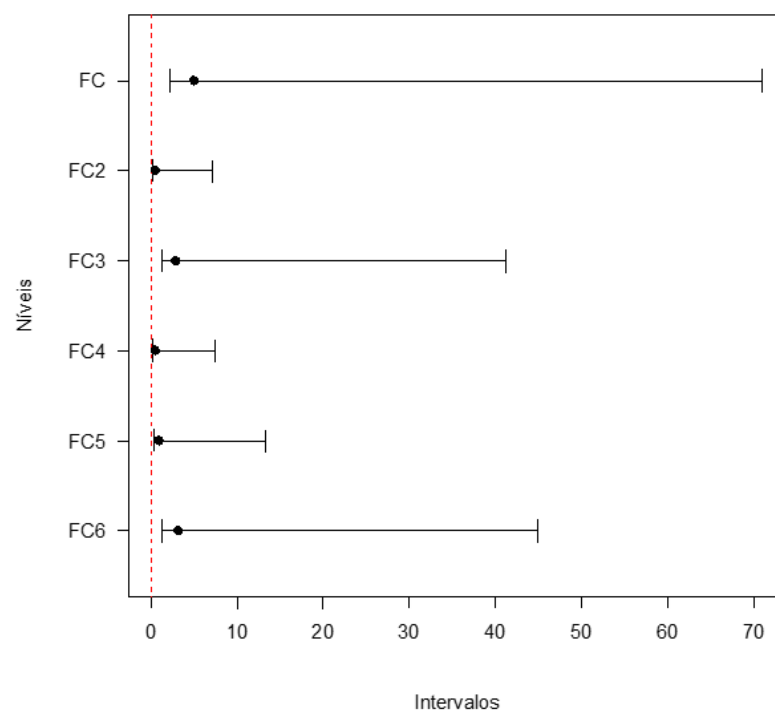
Tabela B2 – Dados brutos de resistência à compressão como um todo (Obra)

Resistência à compressão (MPa)		
Campo	7 dias	28 dias
Obra	36,7	39,1
	35,6	38,5
	27,5	37,1
	35,6	48,7
	35,2	37,2
	36,2	41,5
	29,6	40,6
	34,6	38,3
	29,4	38,7
	39,6	39,2
	40,4	39,6
	39,3	41,1
	25,4	27,2
	25,4	30,4
	27,0	27,5
	27,7	34,3
	32,2	34,1
	26,0	33,5
Média	32,4	37,0
Desvio Padrão	5,1	5,1
CV (%)	15,6	13,7

Fonte: Autor, 2024

a) Teste de *Levene*

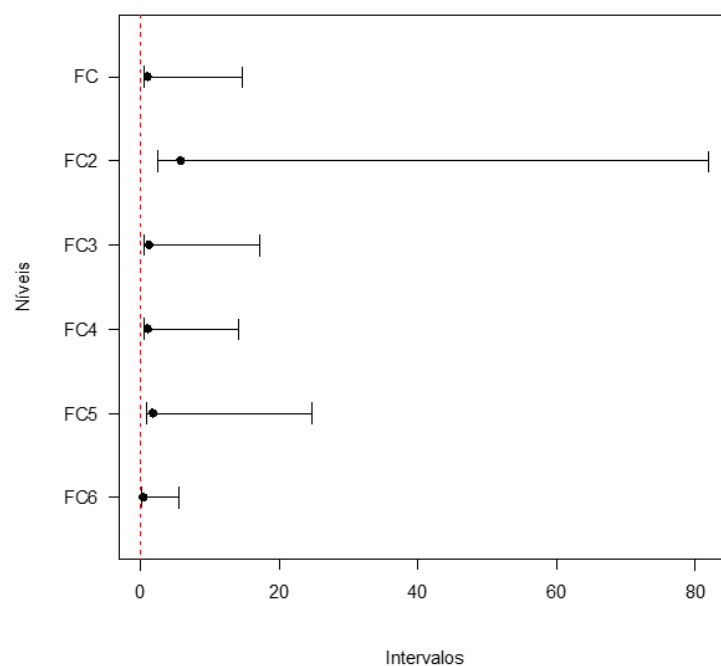
Figura B1 – Intervalos de confiança para o desvio padrão (7 dias – Obra)



Fonte: Autor, 2024

b) Teste de *Bartlett*

Figura B2 – Intervalos de confiança para o desvio padrão (28 dias – Obra)



Fonte: Autor, 2024

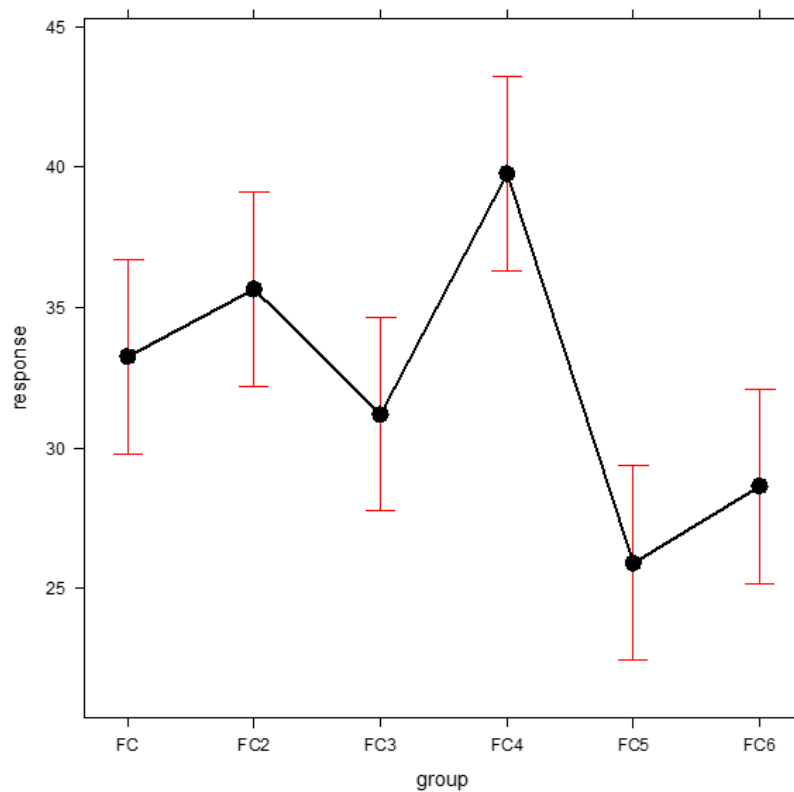
c) Teste de *Kruskal-Wallis*

Tabela B3 – Dados dos efeitos na propriedade de resistência à compressão (7 dias – Obra)

Fatores	Limite Inferior	Efeito	Limite Superior
FC	29,7985	33,2536	36,7087
FC2	32,1948	35,6499	39,105
FC3	27,7386	31,1937	34,6487
FC4	36,3147	39,7698	43,2249
FC5	22,4415	25,8966	29,3517
FC6	25,1741	28,6292	32,0843

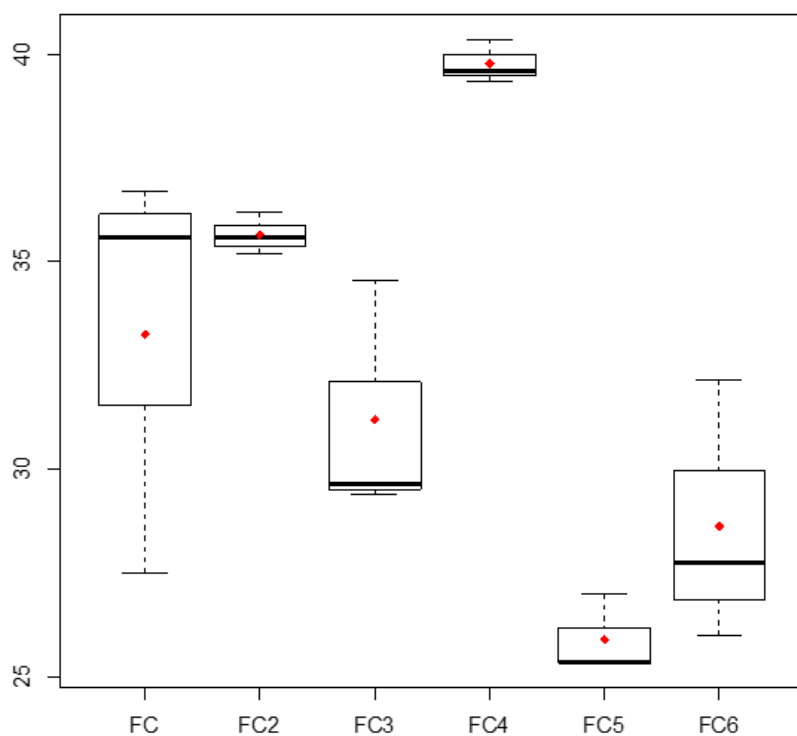
Fonte: Autor, 2024

Figura B3 – Gráfico de efeitos na propriedade de resistência à compressão (7 dias – Obra)



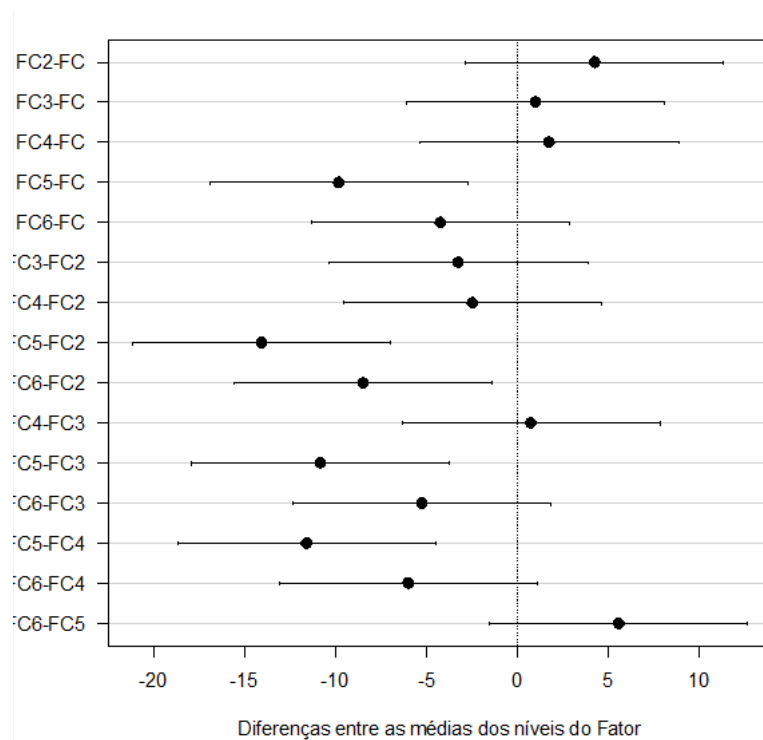
Fonte: Autor, 2024

Figura B4 – Gráfico Boxplot resistência à compressão (7 dias – Obra)



d) Teste de *Tukey*

Figura B5 – Intervalos de confiança (95%) na propriedade de resistência à compressão (28 dias – Obra)

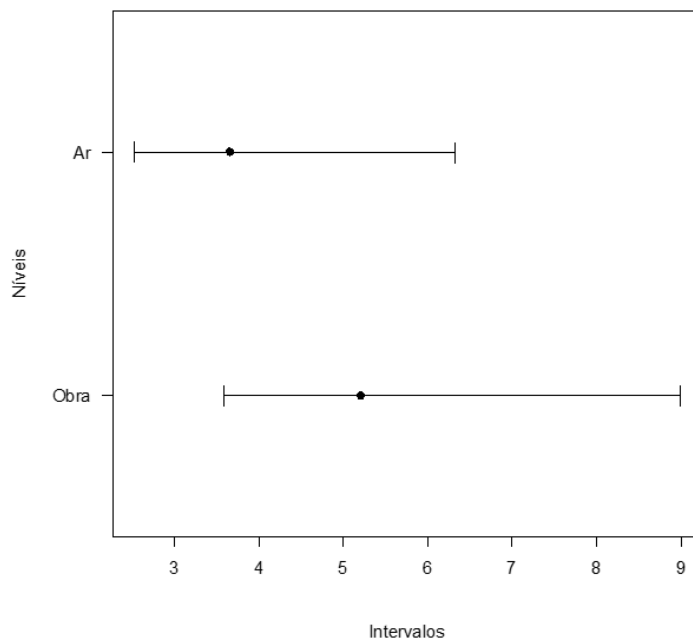


Fonte: Autor, 2024

APÊNDICE C – Resultados dos ensaios no estado endurecido dos concretos e a estatística desses resultados do laboratório *versus* campo

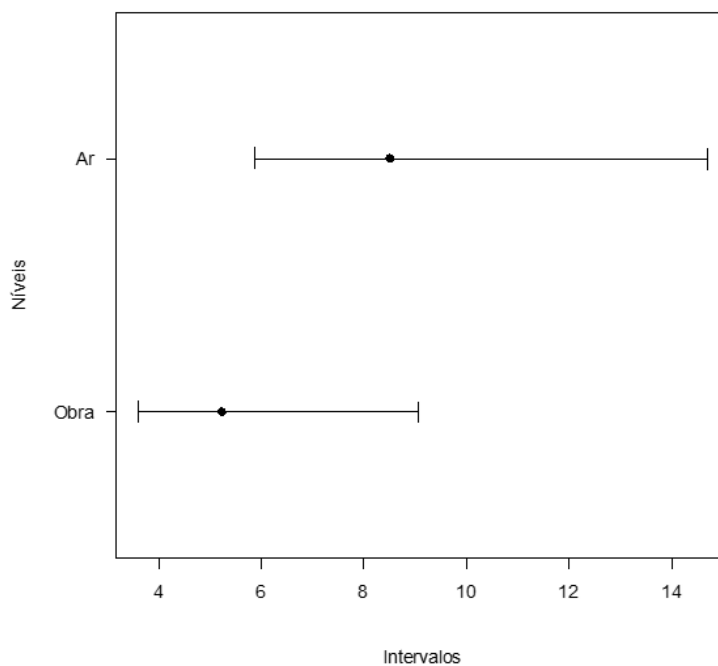
a) Teste de *Bartlett*

Figura C1 – Intervalos de confiança para o desvio padrão (7 dias – Laboratório (cura ao ar) *versus* Campo (obra))



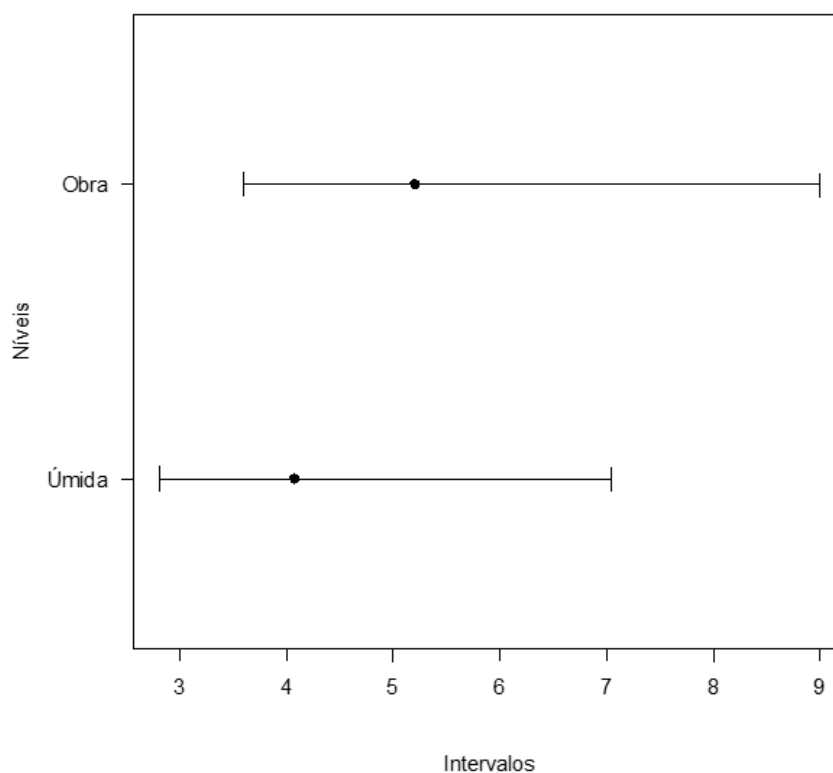
Fonte: Autor, 2024

Figura C2 – Intervalos de confiança para o desvio padrão (28 dias – Laboratório (cura ao ar) *versus* Campo (obra))



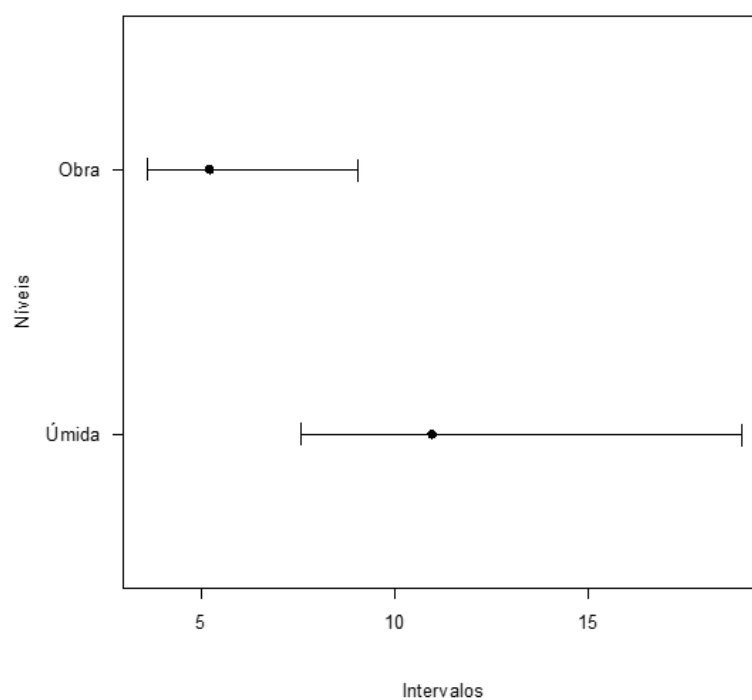
Fonte: Autor, 2024

Figura C3 – Intervalos de confiança para o desvio padrão (7 dias – Laboratório (cura úmida) *versus* Campo (obra))



Fonte: Autor, 2024

Figura C4 – Intervalos de confiança para o desvio padrão (28 dias – Laboratório (cura úmida) *versus* Campo (obra))



Fonte: Autor, 2024