

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
CAMPUS A. C. SIMÕES  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

NÍVEA KAROLINE DA SILVA LIMA

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DO USO DE AGREGADO RECICLADO  
GRAÚDO MISTO EM CONCRETOS ESTRUTURAIS**

Maceió  
2024

NÍVEA KAROLINE DA SILVA LIMA

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DO USO DE AGREGADO RECICLADO  
GRAÚDO MISTO EM CONCRETOS ESTRUTURAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Civil da Universidade Federal de  
Alagoas, como requisito parcial à  
obtenção do título de Bacharelado em  
Engenharia Civil.

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Karoline Alves  
Melo Moraes

Coorientador: Júlio Cézar de  
Mendonça Uchôa

Maceió

2024

**Catálogo na Fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

- L732a    Lima, Nívea Karoline da Silva.  
          Análise da viabilidade do uso de agregado reciclado graúdo misto em  
          concretos estruturais / Nívea Karoline da Silva Lima. - 2024.  
          67 f. : il.
- Orientadora: Karoline Alves de Melo Moraes.  
          Co-orientador: Júlio César de Mendonça Uchôa.  
          Monografia (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Civil) –  
          Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2024.
- Bibliografia: f. 62-67.
1. Agregados (Materiais de construção). 2. Pré-molhagem. 3. Resistência à  
          compressão. I. Título.

CDU: 691

## Folha de Aprovação

NÍVEA KAROLINE DA SILVA LIMA

### ANÁLISE DA VIABILIDADE DO USO DE AGREGADO RECICLADO GRAÚDO MISTO EM CONCRETOS ESTRUTURAIS

Trabalho de Conclusão de Curso  
submetido à banca examinadora do  
curso de Engenharia Civil da  
Universidade Federal de Alagoas e  
aprovada em 19 de março de 2024.



Documento assinado digitalmente  
**KAROLINE ALVES DE MELO MORAES**  
Data: 22/03/2024 15:50:59-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Karoline Alves Melo Moraes (Orientadora)

#### Banca examinadora:



Documento assinado digitalmente  
**PAULO CESAR CORREIA GOMES**  
Data: 22/03/2024 21:32:45-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Paulo César Correia Gomes (Examinador Interno)



Documento assinado digitalmente  
**JORGE LUIS OLIVEIRA SILVA**  
Data: 23/03/2024 12:13:06-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Msc. Jorge Luis Oliveira Silva (Examinador Externo)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus que em sua infinita bondade me permitiu chegar até aqui. Ele é o meu sustento, minha alegria e em quem confio!

Agradeço aos meus pais, Valdineide e Raniclei, que sempre estiverem sonhando comigo e me incentivando a cada novo passo. Por priorizarem a minha formação, e com tanto amor e carinho me ensinarem as mais importantes lições. Vocês são o que tenho de mais precioso. A minha prima/irmã, Milenna, agradeço pela parceria, pelas confidências e por dividir os melhores momentos, desde a infância, com você. Agradeço a minha família pelo sorriso e alegria ao me receber em cada volta para casa e por entenderem que a ausência física era por um bem maior. Agradeço, em especial a minha avó Maria do Carmo, que sempre externa o contentamento em ver os caminhos que trilhei; ao meu avô Rubenilton que, em suas pequenas ações, demonstra muito amor; e as minhas primas, Katielle e Aryana, por poder contar com vocês.

Agradeço a minha amiga Thayná, que de maneira tão especial, foi alegria e apoio durante toda essa trajetória. A Ilma, Josemar, Thallys e Sara não têm palavras suficientes para agradecer o suporte recebido. Vocês são minha segunda família.

Agradeço aos amigos e colegas que a UFAL me presenteou. João Rosa e Marcelo, vocês marcaram a minha trajetória, trouxeram beleza para um caminho penoso e me ensinaram na prática o que é companheirismo. Juan, Rebeca e Mylena, seguraram a minha mão em momentos tão turbulentos dessa jornada. Letícia, Renata, Mayara, Matheus, João Albuquerque e Egleidson, agradeço pela leveza e empolgação nos dias comuns.

Agradeço às amigas que fiz durante o ensino médio, por permanecerem mesmo que as etapas das nossas vidas tenham mudado. Aos amigos que fiz na igreja, obrigada por tantas vezes me encorajarem em oração e por sempre me lembrarem da minha essência.

Agradeço à minha orientadora, professora Karoline Melo, pela paciência, disposição e escuta ativa no árduo processo para a produção deste trabalho. Admiro sua empatia, comprometimento e cuidado.

Agradeço a minha banca avaliadora, pela participação e contribuições num processo tão importante para o meu desenvolvimento profissional. Em

especial, agradeço ao professor Paulo Gomes pelo acolhimento e incentivo durante meu período de iniciação científica.

Agradeço ao meu co-orientador, Júlio César, por aceitar esse desafio e contribuir com o desenvolvimento deste trabalho. Como também, agradeço aos funcionários do LEMA e aos participantes do grupo de pesquisa, que estiveram empenhados nos experimentos e foram essenciais nas diversas etapas deste estudo.

Agradeço a todo o corpo docente do curso, ao centro de Tecnologia (CTEC) e a Universidade Federal de Alagoas (UFAL) pelas diversas oportunidades e experiências proporcionadas, que vão além do conhecimento técnico ofertado.

## RESUMO

LIMA, Nívea Karoline da Silva. **Análise da viabilidade do uso de agregado reciclado graúdo misto em concretos estruturais**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió.

Diante do cenário mundial, o concreto apresenta-se como o material mais usado na construção civil, em razão de sua versatilidade, durabilidade e comportamento mecânico. Apesar das inúmeras possibilidades que a indústria da construção civil viabiliza, esse setor é responsável por gerar grande quantidade de resíduos. Desse modo, o uso de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição (RCD), na produção de materiais cimentícios, é visto como uma alternativa para a redução dos impactos ambientais. Os agregados reciclados mistos (ARM) são conhecidos pela variabilidade em sua composição, heterogeneidade e por apresentar uma alta absorção de água, quando comparados com agregados naturais, devido à sua estrutura porosa. Sabe-se que a absorção de água dos ARM tem influência direta nas propriedades do concreto, assim, utiliza-se de métodos de pré-molhagem visando uma compensação da água absorvida e também para ajuste das propriedades reológicas. O presente trabalho teve como objetivo analisar o uso do ARM para produção de concreto estrutural. Além disso, verificou-se a influência de alguns tipos de pré-molhagem do agregado reciclado e do tipo de cura dos corpos de prova. A metodologia do trabalho contempla a caracterização dos agregados e a análise de suas propriedades, além da realização de estudos de dosagem e avaliação do concreto nos estados fresco e endurecido com a substituição parcial do agregado graúdo natural pelo agregado graúdo reciclado misto, em um percentual de 50%. Os agregados reciclados foram submetidos a três diferentes procedimentos de pré-molhagem: a) pré-molhagem saturada; b) pré-molhagem com 100% da água de absorção; c) pré-molhagem com 80% da água de absorção. Após a produção dos concretos foi verificada a sua trabalhabilidade por meio do abatimento do tronco de cone e foram moldados corpos de prova destinados ao ensaio de resistência à compressão para as idades de 7 e 28 dias. A partir do desenvolvimento do trabalho, observou-se, no que tange a resistência à compressão, que o menor teor de pré-molhagem testado revela-se como a melhor opção. Contudo, utilizando o mesmo valor de pré-molhagem, esse concreto, no estado fresco, apresentou-se com a trabalhabilidade comprometida. Foi possível obter valores significativos de resistência à compressão, destacando-se que, apesar de o uso dos agregados reciclados causar uma redução nessas propriedades, todos os concretos produzidos atingiram resistência à compressão maiores que 20 MPa aos 28 dias, configurando-se como concretos estruturais. O estudo demonstrou que a reciclagem de resíduos pela indústria da construção civil é um procedimento viável, que pode gerar uma mudança nas atuais práticas, visto a possibilidade de transformação de materiais que não possuem valor agregado para outros fins.

**Palavras-Chave:** agregado reciclado misto; pré-molhagem; resistência à compressão.

## ABSTRACT

In the global scenario, concrete emerges as the most widely used material in the construction industry, owing to its versatility, durability, and mechanical behavior. Despite the numerous possibilities enabled by the construction industry, this sector is responsible for generating a significant amount of waste. Thus, the use of recycled aggregates from construction and demolition waste (CDW) in the production of cementitious materials is seen as an alternative to reduce environmental impacts. Mixed recycled aggregates (MRA) are known for their variability in composition, heterogeneity, and high water absorption compared to natural aggregates, due to their porous structure. It is known that the water absorption of MRAs directly influences the properties of concrete; therefore, pre-wetting methods are used to compensate for absorbed water and to adjust rheological properties. This study aimed to analyze the use of MRAs for structural concrete production. Additionally, the influence of different types of pre-wetting of recycled aggregate and curing methods of specimens was investigated. The methodology included aggregate characterization, analysis of their properties, dosage studies, and evaluation of concrete in fresh and hardened states with partial replacement of natural coarse aggregate by mixed recycled coarse aggregate, at a rate of 50%. The recycled aggregates were subjected to three different pre-wetting procedures: a) saturated pre-wetting; b) pre-wetting with 100% absorption water; c) pre-wetting with 80% absorption water. After concrete production, workability was assessed through slump tests, and specimens were molded for compressive strength testing at 7 and 28 days. Regarding compressive strength, it was observed that the lowest pre-wetting content tested proved to be the best option. However, using the same pre-wetting content, this concrete showed compromised workability in its fresh state. Significant compressive strength values were achieved, indicating that despite the reduction caused by the use of recycled aggregates, all concretes produced attained compressive strengths greater than 20 MPa at 28 days, qualifying as structural concrete. The study demonstrated that recycling waste by the construction industry is a viable procedure that can lead to a change in current practices, given the possibility of transforming materials that lack added value for other purposes.

**Keywords:** mixed recycled aggregate; pre-wetting; compressive strength.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Geração de RCD no Brasil e por grande região - Comparativo 2021 e 2022 (toneladas) .....       | 12 |
| Figura 2 - Agregado reciclado de concreto (ARCO) .....                                                    | 15 |
| Figura 3 - Agregado reciclado misto (ARM) .....                                                           | 15 |
| Figura 4 – Fluxograma com ensaios realizados nos agregados .....                                          | 24 |
| Figura 5 - Método de pré-molhagem com agregados submersos .....                                           | 33 |
| Figura 6 - Pré-molhagem com agregados submersos .....                                                     | 34 |
| Figura 7 – Distribuição granulométrica do agregado reciclado graúdo .....                                 | 37 |
| Figura 8 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo natural .....                                   | 42 |
| Figura 9 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo natural .....                                   | 44 |
| Figura 10 - Ensaio de abatimento do tronco de cone, com pré-molhagem equivalente a 80% de absorção .....  | 47 |
| Figura 11 - Ensaio de abatimento do tronco de cone, com pré-molhagem equivalente a 100% de absorção ..... | 48 |
| Figura 12 - Ensaio de abatimento do tronco de cone, com pré-molhagem do agregado saturado .....           | 48 |
| Figura 13 - Corpos de prova antes do rompimento .....                                                     | 49 |
| Figura 14 - Corpo de prova rompido .....                                                                  | 50 |
| Figura 15 - Dados do ensaio de resistência à compressão na cura úmida .....                               | 51 |
| Figura 16 - Dados do ensaio de resistência à compressão na cura ao ar .....                               | 51 |
| Figura 17 - Representação gráfica das proporções de pré-molhagem mediante a cura úmida e ao ar .....      | 53 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Características físicas e mecânicas do cimento CP V.....                                    | 26 |
| Tabela 2 – Características químicas do cimento CP V .....                                              | 27 |
| Tabela 3 – Ficha técnica do metacaulim .....                                                           | 27 |
| Tabela 4 – Nomenclatura e composição dos concretos.....                                                | 29 |
| Tabela 5 – Valores de desvio padrão de dosagem .....                                                   | 30 |
| Tabela 6 – Determinação do consumo de água aproximada (L/m <sup>3</sup> ou kg/m <sup>3</sup> )..       | 31 |
| Tabela 7 – Determinação da porcentagem de agregado graúdo .....                                        | 31 |
| Tabela 8 – Composição das misturas de concreto.....                                                    | 33 |
| Tabela 9 - Valores de pré-molhagem adotados .....                                                      | 34 |
| Tabela 10 – Ensaio do teor de material pulverulento do agregado reciclado<br>graúdo .....              | 38 |
| Tabela 11 - Ensaio de índice de forma pelo método do paquímetro .....                                  | 39 |
| Tabela 12 - Classificação de forma dos grãos .....                                                     | 39 |
| Tabela 13 - Ensaio de resistência ao impacto e à abrasão Los Angeles .....                             | 40 |
| Tabela 14 - Ensaio de densidade e absorção da água .....                                               | 41 |
| Tabela 15 - Ensaio de massa unitária estado compactado (método A) .....                                | 41 |
| Tabela 16 - Ensaio de massa unitária estado solto (método C) .....                                     | 41 |
| Tabela 17 - Determinação da composição dos agregados reciclados graúdos<br>por análise visual.....     | 42 |
| Tabela 18 - Ensaio de massa específica e absorção de água .....                                        | 43 |
| Tabela 19 - Ensaio de massa unitária estado compactado (método A) .....                                | 44 |
| Tabela 20 - Ensaio de massa unitária estado solto (método C) .....                                     | 44 |
| Tabela 21 - Dados do ensaio de massa específica e absorção de água do<br>agregado graúdo natural ..... | 45 |
| Tabela 22 - Ensaio de massa unitária no estado compactado .....                                        | 46 |
| Tabela 23 - Ensaio de massa unitária no estado solto .....                                             | 46 |
| Tabela 24 - Ensaio de teor de argila .....                                                             | 47 |
| Tabela 25 - Ensaio de teor de material pulverulento .....                                              | 47 |

|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 26 - Dados do ensaio de abatimento do tronco de cone ..... | 47 |
|-------------------------------------------------------------------|----|

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|          |                                                                           |
|----------|---------------------------------------------------------------------------|
| ABCP     | Associação Brasileira de Cimento Portland                                 |
| ABNT     | Associação Brasileira de Normas Técnicas                                  |
| ABRELPE  | Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais |
| ABREMA   | Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente                         |
| a/c      | Fator água cimento                                                        |
| ARCI     | Agregado Reciclado Cimentício                                             |
| ARCO     | Agregado Reciclado de Concreto                                            |
| AGN      | Agregado Graúdo Natural                                                   |
| AMN      | Agregado Miúdo Natural                                                    |
| ARG      | Agregado Reciclado Graúdo                                                 |
| ARM      | Agregado Reciclado Misto                                                  |
| CONAMA   | Conselho Nacional do Meio Ambiente                                        |
| CSH      | Silicato de Cálcio Hidratado                                              |
| LEMA     | Laboratório de Estruturas e Materiais                                     |
| MK       | Metacaulim                                                                |
| NBR      | Norma Brasileira Regulamentadora                                          |
| Planares | Plano Nacional de Resíduos Sólidos                                        |
| RA2      | Redutor de Água tipo 2                                                    |
| RCC      | Resíduos de Construção Civil                                              |
| RCD      | Resíduo de Construção e Demolição                                         |
| UFAL     | Universidade Federal de Alagoas                                           |

## SUMÁRIO

|                                                                                                               |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                                                                                    | <b>9</b>  |
| 1.1 Comentários iniciais .....                                                                                | 9         |
| 1.2 Objetivos .....                                                                                           | 10        |
| 1.3 Justificativa.....                                                                                        | 10        |
| <b>2. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO .....</b>                                                            | <b>12</b> |
| 2.1. Composição dos Resíduos de construção e demolição .....                                                  | 13        |
| 2.2 Agregados reciclados produzidos a partir de RCD.....                                                      | 14        |
| <b>3. CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO .....</b>                                                               | <b>17</b> |
| 3.1 Propriedades mecânicas do concreto com agregados reciclados.....                                          | 18        |
| 3.1.1 Influência da pré-molhagem .....                                                                        | 19        |
| 3.1.2 Influência do processo de cura.....                                                                     | 20        |
| 3.2.3 Influência do uso de metacaulim .....                                                                   | 21        |
| <b>4. METODOLOGIA .....</b>                                                                                   | <b>23</b> |
| 4.1 Materiais utilizados .....                                                                                | 23        |
| 4.1.1 Agregados .....                                                                                         | 23        |
| 4.1.1.2 Agregado Reciclado Graúdo (ARG) .....                                                                 | 25        |
| 4.1.2 Cimento .....                                                                                           | 25        |
| 4.1.3 Metacaulim HP ULTRA .....                                                                               | 26        |
| 4.1.4 Aditivo.....                                                                                            | 27        |
| 4.1.5 Água.....                                                                                               | 27        |
| 4.2 Produção do concreto .....                                                                                | 27        |
| 4.2.1 Estudo de dosagem .....                                                                                 | 27        |
| 4.2.2 Procedimento de mistura.....                                                                            | 34        |
| 4.3 Ensaios realizados para a determinação das propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido ..... | 35        |
| 4.3.1 Abatimento do Tronco de Cone (Slump Test) .....                                                         | 35        |
| 4.3.2 Resistência à compressão .....                                                                          | 35        |
| <b>5. RESULTADOS.....</b>                                                                                     | <b>37</b> |

|                                             |           |
|---------------------------------------------|-----------|
| 5.1 Caracterização dos agregados.....       | 37        |
| 5.1.1 Agregado Reciclado Graúdo (ARG) ..... | 37        |
| 5.1.2 Agregado Graúdo Natural (AGN) .....   | 41        |
| 5.1.3 Agregado Miúdo Natural (AMN) .....    | 44        |
| 5.2 Análise dos concretos produzidos.....   | 46        |
| 5.2.1 Resistência à compressão .....        | 49        |
| <b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>        | <b>54</b> |
| 6.1 Sugestões para trabalho futuros .....   | 55        |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>                     | <b>56</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Comentários iniciais

Diante do cenário mundial, o concreto apresenta-se como o material mais usado na construção civil, em razão de sua versatilidade, durabilidade e um simples processo de fabricação. Pode-se também destacar que o concreto convencional é uma mistura composta de água, agregados - miúdo e graúdo - e aglomerante.

Para que haja sucesso nessa mistura, deve-se considerar a qualidade de seus componentes, ressaltando o papel dos agregados. Sbrighi (2011 *apud* Leal, 2022) expõe que no final do século XIX os agregados eram tidos como materiais inertes, e esses elementos tinham como principal função baratear a produção de concreto, apesar de ocuparem cerca de 70% a 80% do volume total do concreto convencional. Essa percepção foi deixada para trás, pois segundo Levy (2001), o agregado pode influenciar a resistência do concreto além de influenciar suas propriedades nos estados fresco e endurecido, pois agregados com características indesejáveis podem não apenas produzir um concreto pouco resistente, mas também podem comprometer a durabilidade e o desempenho estrutural do concreto.

Segundo Butler (2003), a fase agregado é de grande importância pois é a principal responsável pela massa específica, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional do concreto. A massa específica do concreto é diretamente influenciada pela massa específica do agregado graúdo, que, por sua vez, impacta diretamente a resistência mecânica. Além disso, quanto maior a porosidade (índice de vazios) do agregado, menor será sua resistência, de maneira que, torna-se o elo fraco da mistura.

Salienta-se que a indústria da construção civil apresenta grande consumo de materiais naturais, como também gera grandes impactos ambientais em suas mais variadas etapas. Para mitigar os efeitos gerados, tem-se aproveitado o grande potencial dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição (RCD) na produção de materiais cimentícios. Países desenvolvidos

como Alemanha, Japão, Holanda e Estados Unidos muito cedo perceberam a necessidade de reciclar os resíduos de construção e debruçaram-se em pesquisas, as quais permitiram atingir um padrão de qualidade dos procedimentos adotados para obtenção dos agregados reciclados (Levy, 1997).

Contudo, esse agregado difere-se do natural em alguns aspectos, que necessitam atenção para o desempenho do concreto. Algumas barreiras existentes no uso do agregado reciclado, destacadas por Angulo (2000), estão em sua heterogeneidade e variabilidade das propriedades, além da falta de controle das operações e a quantificação de fases no material por análise visual que, por ser subjetiva, não garante homogeneidade.

## **1.2 Objetivos**

Tem-se como objetivo principal analisar a viabilidade da aplicação de agregado graúdo reciclado misto (proveniente de demolição) para a produção de concretos estruturais.

Ademais, tem-se como objetivos específicos:

- Verificar a influência do procedimento de pré-molhagem na resistência à compressão dos concretos com agregado reciclado misto;
- Analisar a interferência do tipo de cura perante a resistência à compressão dos concretos com agregado reciclado misto.

## **1.3 Justificativa**

No Brasil, o cenário de crescimento econômico e o aumento populacional demandam uma extração de matéria prima cada vez maior, para atender as necessidades da população. A indústria da construção civil apresenta-se como um fortalecedor do desenvolvimento econômico de um país, responsável pela execução de diversas obras que impactam na qualidade de vida das pessoas. Contudo, destaca-se por ser uma das indústrias que mais degradam o meio ambiente, modificando de forma irreversível a biodiversidade como também a paisagem. Scott Hood (2004) afirma que a exploração de recursos naturais é essencial para continuidade das obras, porém essas atividades são consideradas insustentáveis para as gerações futuras.

A NBR 15116 (ABNT, 2021) normatiza que resíduos da construção civil são aqueles provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de

obras de construção civil e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos. A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE em seu panorama mais recente afirma que em 2021 foram coletadas mais de 45 milhões de toneladas de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) (ABRELPE, 2022). Uma alternativa adotada para solucionar esse dano ambiental está na utilização do RCD para a produção de agregado reciclado que poderá ser usado como substituto parcial do agregado natural. Isso possibilita um destino para esses resíduos, além de amenizar os impactos econômicos, pois há a transformação de materiais que não possuem valor agregado para outro fim.

No âmbito local, a partir de 2018 o afundamento dos bairros Pinheiro, Mutange, Bebedouro e Bom Parto, em Maceió-AL, provocou o deslocamento populacional de inúmeras famílias devido à atividade extrativa excessiva de sal-gema. A desocupação dessa grande área urbana gerou um volume considerável de resíduos provenientes de demolição que vem sendo objeto de estudo do Laboratório de Estruturas e Materiais (LEMA), pertencente à Universidade Federal de Alagoas (UFAL). Dentre as frentes de estudo, busca-se analisar o agregado reciclado misto e seu comportamento aplicado a diversos elementos, como: argamassa, concreto seco e elementos de concreto com função estrutural.

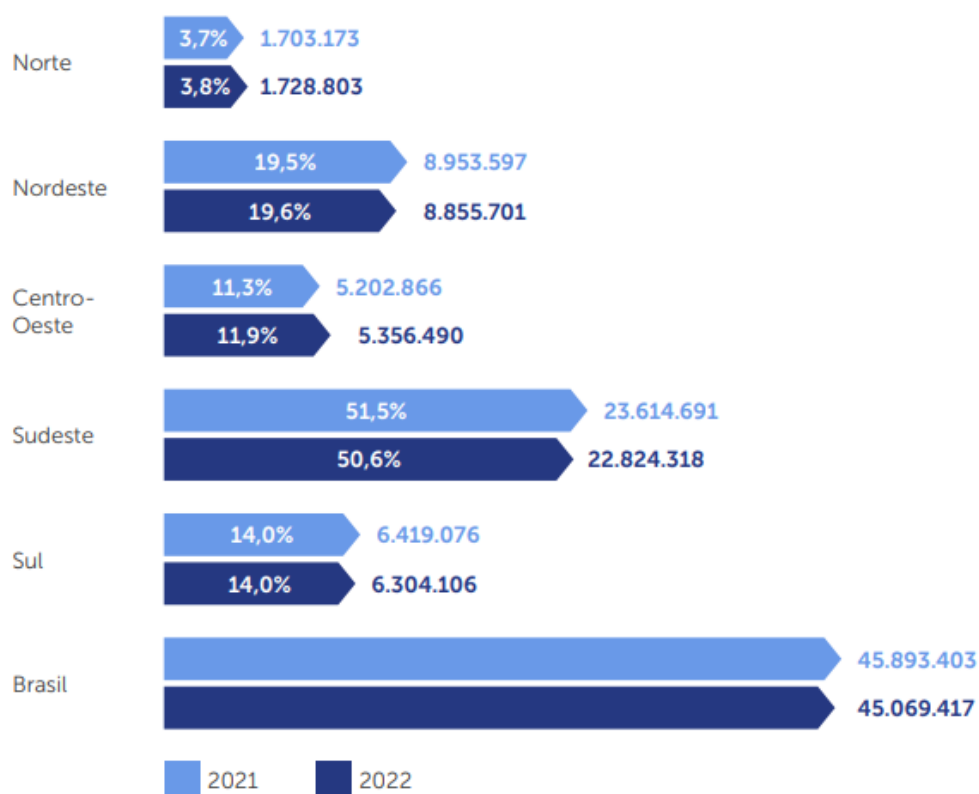
Segundo Paes (2013), o baixo uso dos resíduos de construção e demolição se dá por diversas razões, destacando-se a não aceitação e o desconhecimento do potencial dos resíduos como material de construção civil. Desse modo, torna-se relevante o estudo do concreto com agregado reciclado misto (ARM) para entendimento de suas propriedades, num cenário brasileiro com pouca utilização desse material em suas misturas, além de avaliar como esse agregado comporta-se perante as medidas atualizadas na NBR 15116 (ABNT, 2021).

A norma 15116 (ABNT, 2021) estabelece que para aplicação em concreto com função estrutural deve ser usado até 20% de agregado reciclado de concreto (ARCO). O trabalho de Silva (2023), pertencente ao grupo de pesquisa, usou ARCO em percentual de 50%, maior que o regulamentado pela norma, e conseguiu resistências para classificá-lo como concreto estrutural. Dando continuidade a esse estudo, o presente trabalho analisará a viabilidade do ARM.

## 2.RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

A Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA) registrou um comparativo em que aponta uma redução de 1,8% na produção de resíduos de construção civil (RCC) em relação ao ano anterior. Apesar da queda dos valores de geração de RCD obtidos, ainda encontram-se grandes problemáticas, visto o alto volume gerado no país, destacando-se a região sudeste, que apresenta expressivos índices de contribuição, como pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 - Geração de RCD no Brasil e por grande região - Comparativo 2021 e 2022 (toneladas)



**Fonte:** Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (2023)

Destaca-se que no ano de 2022, em termos normativos, houveram ações representativas para o setor de gestão de resíduos sólidos no Brasil. Destacando o Decreto N° 11.043, de 13 de abril de 2022, que instituiu o Plano Nacional de

Resíduos Sólidos – Planares, a qual estabelece as estratégias, diretrizes e metas para o setor dentre 20 anos, sendo um instrumento para materializar ações e metas da Política Nacional de Resíduos Sólidos. Projetou-se como meta um aumento de 25% de reciclagem dos Resíduos de Construção Civil até 2040.

Os resíduos de Construção e Demolição agrupam-se em classes, por meio da classificação determinada pela Resolução Nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA (BRASIL, 2002), sendo, portanto, a classe A aquela em que se encontram os elementos recicláveis e reutilizáveis para a produção de agregados reciclados, como por exemplo, materiais cerâmicos, argamassa, concreto e outros.

As normas que regem o uso e tratamento desses resíduos da construção são diversas, podendo-se destacar:

- NBR 15114/2004 – trata das diretrizes para projeto, implantação e operação de áreas de reciclagem de resíduos sólidos da construção civil;
- NBR 15115/2004 – trata dos parâmetros para execução de camadas de pavimentação utilizando agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil;
- NBR 15116/2021 – traz as especificações para a produção e recepção dos agregados reciclados (miúdos e graúdos) em argamassas e concretos de cimento Portland.

## **2.1. Composição dos Resíduos de construção e demolição**

Importante evidenciar que a NBR 15116 (ABNT, 2021) divide o agregado reciclado em subcategorias, são elas:

- Agregado reciclado cimentício (ARCI): este é um agregado com predominância de materiais cimentícios diversos, podendo conter teores reduzidos de cerâmica vermelha;
- Agregado reciclado de concreto (ARCO): agregado reciclado constituído por resíduos de concreto;
- Agregado reciclado misto (ARM): agregado reciclado constituído por mistura de materiais cimentícios e materiais cerâmicos.

Com a atualização da NBR 15116 em 2021, apenas o agregado reciclado proveniente de concreto dispõe de recomendações normativas para utilização em concretos com fins estruturais.

No Brasil, Angulo (2004) expõe que como não existe tanta preocupação com demolição seletiva, o agregado reciclado produzido é normalmente misto. Salienta-se que, em seus estudos em 2005, Angulo atestou que o RCD mineral proveniente de demolições é misto e apresenta três materiais básicos: concreto/argamassa; cerâmicas e rochas. O autor destaca, assim, que cada uma dessas fases possui características muito variáveis.

Quebaud e Buyle-Bodin (1999) destacam que os RCD, para assegurar qualidade e facilidade em seu tratamento, devem ser selecionados e estocados de maneira correta. Também comentam sobre o controle do teor de sulfato, visto que é proveniente dos componentes do gesso, sendo necessário atenção nos diferentes estágios de britagem dos agregados.

Para que a construção se torne sustentável é necessário que haja uma cadeia integrada de gerenciamento, Pietersen *et al.* (1988 *apud* Leite, 2001) tratam sobre o ciclo de vida do produto, de maneira que o material desde sua matéria-prima possua o menor índice de descarte, favorecendo a reutilização e reciclagem. Ainda, Kibert *et al.* (2000) contribuem ressaltando que dentro da construção civil os materiais não são produzidos para um posterior desmonte, além de que alguns materiais apresentam dificuldades de reciclagem, impossibilitando um ciclo de vida tão satisfatório.

Portanto, é necessário um estudo quanto à composição do resíduo da construção civil (RCC) para conhecer os parâmetros que diretamente o influenciam, a fim de viabilizar o aproveitamento desse resíduo.

## **2.2 Agregados reciclados produzidos a partir de RCD**

O agregado reciclado é proveniente do beneficiamento do RCD, o qual pode ser constituído de materiais cerâmicos, concreto, argamassas e materiais secundários, como madeira e aço (entre 1-2%). Como comentado, o agregado reciclado pode ser proveniente de concreto ou misto, destacando que apresenta-se variável em sua composição, podendo ser quase exclusivamente constituído por concreto ou com grandes composições de material cerâmico (Angulo, 2011).

Na figura 2 e 3 apresenta-se o agregado reciclado de concreto e o agregado reciclado misto.

Figura 2 - Agregado reciclado de concreto (ARCO)



**Fonte:** Aquino *et. al.* (2023)

Figura 3 - Agregado reciclado misto (ARM)



**Fonte:** Relatório (2023a)

Devido à qualidade do agregado interferir diretamente na durabilidade do concreto, Leite (2001) ressalta a atenção que deve ser dada à composição granulométrica dos agregados reciclados para possibilitar misturas de concreto trabalháveis e com um bom grau de compacidade, permitindo o melhor desempenho técnico. Levy (2001) indica que além dos critérios granulométricos,

é importante considerar também a origem, textura e forma, visto que formas mais lamelares e texturas porosas demandam um maior consumo de água. Quando Mehta e Monteiro (1994) tratam da fase agregado, apontam que agregados alongados, achatados e grandes tendem a ter o acúmulo de água da exsudação interna, afetando a zona de transição pasta-agregado, levando a uma propensão à microfissuração.

De acordo com seus estudos, Mehta (1994) estabelece, por meio de análise visual, que a textura superficial pode ser considerada lisa, áspera ou celular. Agregados com uma superfície mais áspera e celular terão uma maior absorção de água que aqueles de superfície lisa. A textura mais rugosa e maior angulosidade dos agregados reciclados são tratadas por Leite (2001) como um ponto benéfico para a aderência pasta/agregado.

Contudo, Leite (2001) salienta que o agregado reciclado, quando incorporado ao concreto, torna a mistura muito mais coesa e conseqüentemente com menor trabalhabilidade, comparando-o a um mesmo concreto com agregado natural. Dessa maneira, apresenta uma desvantagem do uso de agregados reciclados, devido à necessidade de mais pasta de cimento para contornar a situação de trabalhabilidade, aumentando o custo. A maior área específica no material reciclado é apontada como positiva, visto que contribui com maior área de aderência entre a argamassa e o agregado.

Consoante Levy (2001), o segredo para obtenção de concretos duráveis muitas vezes reside no rigoroso controle dos componentes, portanto recomenda-se que os agregados utilizados na produção de concretos sejam selecionados dependendo de sua origem, alvenaria ou concreto, evitando-se a mistura, uma vez que ambos apresentam características diferenciadas. A bibliografia aponta variabilidade nos resultados de massa específica e de massa unitária, com materiais reciclados com composição parecidas. Leite (2001) relata que isso se dá por diversos aspectos, destacando também a composição do material, seu beneficiamento e granulometria, assim como o método utilizado para determinar as propriedades desse agregado.

### 3. CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO

O concreto com agregados reciclados é produzido mediante britagem dos resíduos, substituindo parcial ou totalmente os agregados convencionais. Tem-se que os agregados reciclados são mais porosos que os agregados naturais. Dessa forma, Angulo (2011) afirma que a resistência e durabilidade deste outro tipo de concreto são controladas, não apenas pela porosidade da pasta de cimento, mas também pela porosidade do agregado, que facilmente ultrapassa os 10%. Assim, a principal diferença entre um concreto convencional e um concreto com agregado reciclado é a porosidade.

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), as propriedades do concreto podem se relacionar com as propriedades do agregado, agrupando-se da seguinte forma:

- influenciam no estado fresco: porosidade ou massa específica, composição granulométrica, forma e textura superficial;
- influenciam no estado endurecido: porosidade, composição.

Dentre a literatura, os concretos confeccionados com agregados reciclados apresentam menor consistência (medida pelo abatimento do tronco de cone) que concretos convencionais de mesmo traço.

A consistência é afetada por vários fatores (Guimarães, 2005):

- a) consumo de água;
- b) consumo de cimento;
- c) relação água/cimento, relação agregado/cimento e consumo de cimento;
- d) adições;
- e) aditivos;
- f) agregados.

A seguir será abordado sobre as propriedades mecânicas do concreto com agregado reciclado, tendo em vista o objetivo do presente trabalho de produzir concretos estruturais. Também será tratado sobre os fatores analisados no que diz respeito à sua influência no desenvolvimento da resistência à compressão, sendo o principal deles a pré-molhagem.

### 3.1 Propriedades mecânicas do concreto com agregados reciclados

Segundo os estudos produzidos por Devenny e Khalaf (1999), concretos produzidos com agregado graúdo reciclado de tijolos cerâmicos britados forneceram valores de massa específica 13% a 15% menores quando comparados aos concretos de referência. Percebeu-se também que um aumento na densidade dos concretos leva ao aumento da resistência à compressão, notando, assim, uma interação entre as duas propriedades.

A análise de alguns estudos (Levy, 1997; Zordan, 1997; Dessy *et al.*, 1998 *apud* Angulo, 2000) apontam que para uma mesma resistência à compressão de concretos plásticos é necessário aumentar o consumo de cimento dos concretos com agregados de RCD reciclados. Dessa forma, tem-se um emprego maior de partículas finas, as quais demandam uma maior quantidade de água, devido à alta capacidade de absorção.

Dentre a análise de Barra (1997, *apud* Angulo, 2000) observou-se que, no estado fresco de concretos com agregados reciclados, devido ao processo de absorção, a água tende a ficar na superfície dos agregados de RCD não saturados. Ao incorporar o cimento à mistura, grande quantidade das partículas do cimento ficam retidas nos grãos, colaborando a aderência pasta-agregado. Além disso, Barra (1996, *apud* Angulo, 2000) afirma que os processos de produção influem na qualidade da zona de transição entre a pasta nova e o agregado reciclado.

Observou-se também pouca influência dos agregados reciclados na resistência do concreto em altas relações água/cimento, quando comparados com concretos de agregados naturais, nas análises realizadas por Levy (1997).

Gallias (1998 *apud* Angulo, 2000) considerou que, quando os agregados de RCD reciclados são pré-saturados antes da aplicação, a água absorvida não participa da trabalhabilidade nem das reações de hidratação do cimento.

As resistências à tração e à flexão dos concretos reciclados ficaram 10% inferiores às dos concretos convencionais, segundo as análises realizadas por Levy (1997). Quanto ao módulo de elasticidade, os valores apresentaram-se inferiores aos dos concretos convencionais.

Em misturas com a relação água/cimento fixada, ao substituir os agregados naturais por agregados reciclados, tem-se uma diminuição da

resistência à compressão, diretamente proporcional ao aumento do teor de substituição (Oliveira, 2021). Padovan (2013), em seus estudos, analisa um teor de substituição de até 50% do agregado graúdo natural pelo agregado graúdo reciclado de concreto, pois valores maiores tornam-se inviáveis, visto a influência direta na resistência mecânica do concreto. Observando a pesquisa de Matias *et al.* (2013), observou que os concretos produzidos com a substituição de até 50% de agregados graúdos reciclados com a utilização de aditivo superplastificante redutor de água durante a dosagem do concreto, alcançaram as resistências à compressão semelhante aos concretos de referência.

### 3.1.1 Influência da pré-molhagem

Gerin, Sales e Nardin (2019) e Lima (1999) salientam que para compensar a água absorvida pelo agregado reciclado, o método de pré-saturação pode ser utilizado, como também a adição de água no amassamento para que não haja diminuição da plasticidade no concreto fresco. A literatura sugere valores, para água de pré-molhagem, superiores a 50% do valor de absorção total do agregado reciclado, como pontua Leite (2001) e Etxeberria *et al.* (2007). Ângulo e Figueiredo (2011) sugerem uma abordagem mais clássica para contornar a perda de consistência do concreto, com nível de pré-molhagem variando entre 80% e 90%, evitando-se o uso de aditivos. Enquanto alguns autores utilizam-se de um tempo entre 10-15 minutos (Leite, 2001), outros autores sugerem que para minimizar a elevada absorção dos grãos dos agregados reciclados, a etapa de pré-saturação deve ocorrer por volta de 30 minutos (Correia, 2006 *apud* Tomasi, 2021). Lovato (2007) pontua que a NBR 15116 (ABNT, 2004) trazia recomendações com adição suplementar de água de pré-molhagem, com valores em torno de 80%, sem tempo referido. A atual NBR 15116 (ABNT, 2021) tem uma equação proposta para a pré-saturação, a fim de determinar a quantidade necessária de água para pré-molhagem e compensação de água. Como também, traz expressões para estabelecer a quantidade de água efetiva da argamassa ou concreto e para a relação água/cimento efetiva.

Reis (2013, *apud* Tomasi, 2021) correlaciona a taxa de pré-molhagem aos resultados de abatimento, após usar a pré-molhagem nos níveis de 60%, 80% e 100% do valor total de absorção do agregado. O autor concluiu que as menores

taxas de pré-saturação promovem maior absorção de água no estado fresco do concreto, o que, por consequência, aumenta a perda de trabalhabilidade.

Ao avaliar agregados graúdos reciclados, em concretos com e sem aditivo, Padovan (2013) observou que a pré-molhagem influencia pouco na perda de trabalhabilidade.

### 3.1.2 Influência do processo de cura

Os estudos de Cabral *et al.* (2007) afirmam que a água disponível na mistura, proveniente também da etapa de umidificação do agregado reciclado, torna-se capaz de hidratar partículas de cimento que não foram hidratadas e contribuir durante a cura do concreto. Dessa maneira, a presença de água no agregado gera uma região de melhor transição entre o agregado reciclado e a pasta de cimento.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), o concreto irá reagir às tensões aplicadas conforme o tipo de tensão, mas além disso, de acordo com o somatório de vários aspectos que afetam a porosidade dos diferentes componentes estruturais do concretos. Entre esses fatores estão: propriedades e proporções dos materiais, grau de compactação e as condições de cura.

Os estudos de Bauer *et al.* (1998) buscavam verificar a resistência à compressão em concretos com agregados naturais em diferentes tipos de cura. Estes foram produzidos com CP V-ARI e aos 28 dias apresentaram resultados, na cura ao ar, 11% inferiores quando comparados com os corpos de prova que estiveram 28 dias em cura úmida.

Dolara *et al.* (1998, *apud* Leite, 2001) analisou a resistência à compressão de concretos com substituição do agregado natural pelo agregado reciclado de concreto em 50% e 100% e qual a influência do tipo de cura nesses resultados. Houve o apontamento de um aumento de 10% na resistência, quando comparada a cura úmida com a cura ao ar.

Ballista e Machado Jr. (2000) em suas pesquisas para concretos com agregados graúdos reciclados mistos com adição de polímero em diversos teores, testaram alguns tipos de cura. Percebeu-se que os mais bem avaliados foram aqueles que permaneceram em cura úmida por 6 dias e 21 dias na cura ao ar.

### 3.2.3 Influência do uso de metacaulim

Além dos esforços sustentáveis quanto ao agregado utilizado, quantidade significativa de emissão de CO<sub>2</sub> devido a fabricação de cimento Portland traz grande preocupação. Por isso, busca-se a substituição de parte da massa de cimento por outros componentes que proporcionem as mesmas características técnicas e econômicas, ou até mesmo atributos superiores. Segundo Perlot *et al.*, (2013 *apud* Teixeira *et al.* 2020), o metacaulim pode reduzir o impacto ambiental de concretos devido à sua menor emissão de dióxido de carbono do que o clínquer. Acrescentam, ainda, que o metacaulim é uma adição mineral que tem alcançado destaque conforme os resultados alcançados.

Propriedades mecânicas e de durabilidade são influenciadas pela reação pozolânica do metacaulim, a qual produz mais silicato de cálcio hidratado (CSH) que garante o desenvolvimento da pasta de cimento e da resistência do concreto, e é a principal razão para essas melhorias na resistência (Abbas, *et al.*, 2010; Basu *et al.*, 2000 *apud* Younis, 2020).

Em seus estudos, Sri *et. al.* (2022) utilizaram-se de substituição parcial do cimento por metacaulim em diferentes teores, fazendo testes com o agregado graúdo reciclado em porcentagens de substituição de 0, 50% e 100%. Dentre os resultados obtidos é importante ressaltar que, o concreto produzido com 50% de substituição do agregado reciclado e com 15% de substituição de metacaulim obteve teores de resistência semelhantes ao concreto produzido com agregado natural e o mesmo teor de substituição de metacaulim. Enquanto o concreto com a substituição de 50% do agregado reciclado e sem o metacaulim, obteve uma redução na resistência, aos 7 e 28 dias, de quase 30%.

Durante os estudos de Teixeira *et al.* (2020), os concretos preparados com metacaulim, em substituição parcial ao cimento, melhoraram as propriedades macroestruturais dos concretos em relação à referência, mesmo utilizando agregados reciclados provenientes de demolição. Por meio dos resultados de Yaba *et. al.* (2021), destaca-se que o agregado graúdo reciclado, devido a sua alta capacidade de absorção de água, reduziu a trabalhabilidade do concreto em até 50%. No concreto com agregado reciclado e substituição do metacaulim em até 20%, obteve-se resistência à compressão semelhante ao

concreto referência. O autor ressalta que a principal razão para o aumento de resistência é a reação pozolânica das partículas do metacaulim.

## **4.METODOLOGIA**

Inicialmente, o trabalho contou com a etapa de revisão bibliográfica, a qual consistia na busca de referenciais que pudessem contribuir com as informações e técnicas necessárias para o embasamento no assunto. Assim, o programa experimental apresentado traz a caracterização dos materiais utilizados para a composição dos concretos produzidos.

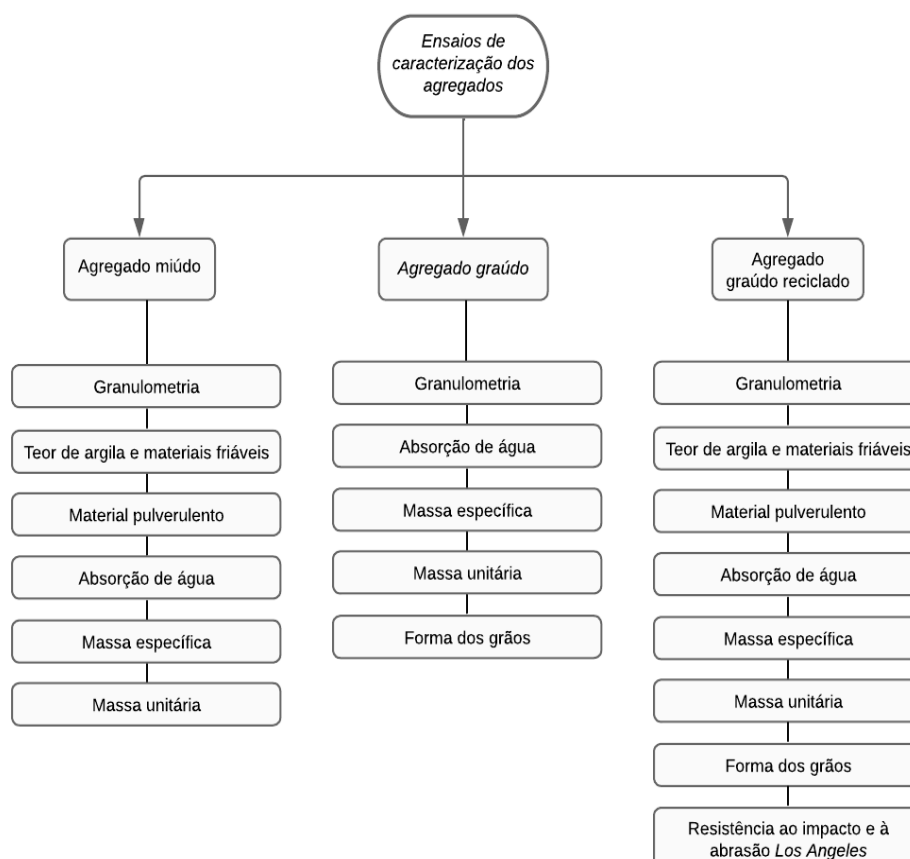
### **4.1 Materiais utilizados**

Os materiais utilizados estavam alocados no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEMA) pertencente à Universidade Federal de Alagoas (UFAL), no Campus A. C. Simões. A seguir tem-se descritas as características dos materiais, como também os procedimentos usados.

#### **4.1.1 Agregados**

O agregado graúdo natural (AGN) e o agregado miúdo natural (AMN) são oriundos de jazidas do estado de Alagoas. Tratando do agregado reciclado graúdo (ARG) tem-se que é proveniente da área de demolição da cidade de Maceió, proveniente do bairro Mutange, disponibilizado para estudo. Este material foi peneirado e separado nas categorias de miúdo e graúdo, obtendo-se uma dimensão máxima de 25 mm. Os principais ensaios realizados com os agregados estão sintetizados na figura 4, apresentados por meio de fluxograma. Ademais, esses processos foram realizados por intermédio de grupo de pesquisa com colaboração da autora.

Figura 4 – Fluxograma com ensaios realizados nos agregados



**Fonte:** Autora (2024)

Destaca-se que para os agregados, tanto o miúdo natural quanto o graúdo natural e o graúdo reciclado, foram realizados os ensaios de granulometria, determinação do material fino, material pulverulento, massa unitária, absorção de água e massa específica, teor de argila e materiais friáveis; embasados, respectivamente, pelas normas vigentes no período: NBR 17054 (ABNT, 2022e), NBR 16973 (ABNT, 2021), NBR 16972 (ABNT, 2021), NBR 16916 (ABNT, 2021) e NBR 7218 (ABNT, 2010). Apenas para as amostras de agregado graúdo foi feito também o ensaio de índice de forma, prescrito na NBR 7809 (ABNT, 2019) e NBR 5564 (ABNT, 2021), além da resistência ao impacto e à abrasão *Los Angeles*, expresso na NBR 16974 (ABNT, 2022).

#### 4.1.1.2 Agregado Reciclado Graúdo (ARG)

Inicialmente empregou-se o método Chevron (Chaves, 2012) para a formação de pilhas, visando homogeneizá-las. Cada fase de quarteamento foi realizada conforme as diretrizes da norma NBR 16915 (ABNT, 2021c), para a segregação das amostras utilizou-se do quarteador tipo Jones, destinando o material para os devidos ensaios de caracterização.

O ARG utilizado tem como dimensão máxima 25 mm e passou por um processo de britagem ainda no canteiro de demolição.

#### 4.1.2 Cimento

O cimento escolhido foi o CP V - ARI, devido à sua principal característica que é a alta resistência inicial, importante para o andamento das análises e para obtenção de parâmetros voltados à resistência mecânica. A tabela 1 apresenta suas características físicas e mecânicas, enquanto a tabela 2 contém dados de suas características químicas. Segundo o fabricante, o cimento atende às exigências estabelecidas na NBR 16697 (ABNT, 2018b).

Tabela 1 – Características físicas e mecânicas do cimento CP V

| Ensaio                                      | Período                   | 12/04/2023<br>28/04/2023 | 02/05/2023<br>31/05/2023 | Limites NBR 16697<br>(ABNT, 2018b) |
|---------------------------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------------------|
| Blaine (cm <sup>2</sup> /g)                 | NBR NM 76<br>(ABNT, 1998) | 4817                     | 4859                     | -                                  |
| # 200 (%)                                   | NBR 11579<br>(ABNT, 2012) | 3,8                      | 3,6                      | ≤ 6                                |
| Início de<br>pega (min)                     | NBR NM 65<br>(ABNT, 2003) | 150,0                    | 141,0                    | ≤ 7                                |
| Água de<br>consistência<br>(%)              | NBR NM 43<br>(ABNT, 2003) | 29,6                     | 30,1                     | -                                  |
| Massa<br>específica<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | NBR NM 23<br>(ABNT, 2001) |                          | 3,04                     | -                                  |
| Massa<br>Unitária (kg/l)                    | NBR NM 23<br>(ABNT, 2001) |                          | 1,07                     | -                                  |

Fonte: Adaptação do fabricante (2023)

Tabela 2 – Características químicas do cimento CP V

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

Fonte: Adaptação do fabricante (2023)

#### 4.1.3 Metacaulim HP ULTRA

O metacaulim do Brasil foi a empresa fornecedora do Metacaulim HP - ULTRA utilizado. Sua composição está disposta na tabela 3 e apresenta-se em conformidade com a NBR 15894-1 (ABNT, 2010 b).

Tabela 3 – Ficha técnica do metacaulim

| Propriedades Físico-Químicas    | Valores típicos               | Valores limites NBR 15894-1 (ABNT, 2010b) |
|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------|
| SiO <sub>2</sub>                | 57%                           | 44% a 65%                                 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 34%                           | 32% a 46%                                 |
| CaO + MgO                       | < 0,1%                        | < 1,5%                                    |
| SO <sub>3</sub>                 | < 0,1%                        | < 1,0%                                    |
| Na <sub>2</sub> O               | < 0,1%                        | < 0,5%                                    |
| Eq.Alcalino Na <sub>2</sub> O   | < 1,5%                        | < 1,5%                                    |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 2%                            | -                                         |
| TiO <sub>2</sub>                | 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) <sub>2</sub> /g | > 750 mg Ca(OH) <sub>2</sub> /g           |
| Área Específica BET             | 230000 cm <sup>2</sup> /g     | > 150000 cm <sup>2</sup> /g               |
| Massa Específica                | 2,56 kg/dm <sup>3</sup>       | -                                         |

Fonte: Adaptação de Metacaulim do Brasil (2023)

#### 4.1.4 Aditivo

O aditivo utilizado durante as produções foi o MC-PowerFlow 4001, no qual é um aditivo redutor de água tipo 2 - RA2, mais conhecido como superplastificante PCE de pega normal. Pelo fabricante, tem um valor de dosagem recomendado entre o intervalo de  $\geq 0,2\% \leq 5,0\%$ , sobre o peso do cimento.

#### 4.1.5 Água

Durante as produções dos concretos foi utilizada água potável proveniente do sistema de abastecimento da Universidade Federal de Alagoas.

### 4.2 Produção do concreto

#### 4.2.1 Estudo de dosagem

Para a etapa de estudo de dosagem, optou-se pelo método proposto pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). Dentre algumas determinações do método, tem-se a fixação da relação água/cimento, além da determinação do consumo de materiais (água, cimento e agregados), para então resultar na proporção dos elementos. No cálculo de dosagem foi considerada a utilização do agregado natural, e para as misturas contendo o ARM houve apenas a substituição do agregado natural pelo reciclado, em um percentual de 50%.

Como a inclusão do agregado reciclado deverá ocasionar uma perda de resistência à compressão dos concretos, optou-se trabalhar com uma resistência à compressão elevada, que foi fixada em 40 MPa, aos 28 dias, para os concretos de referência. A fim de atender também a critérios de durabilidade, tendo em vista, ainda, a relação do presente trabalho com outros trabalhos que estão em desenvolvimento no grupo de pesquisa, o fator água cimento (a/c) foi fixado em 0,45.

Durante o estudo de dosagem, a pré-molhagem indicada pela NBR 15116 (ABNT, 2021) foi testada. Obteve-se um concreto com baixo nível de trabalhabilidade, mesmo elevando o teor de aditivo para 0,7%. Diante disso,

optou-se por submeter os agregados reciclados a três diferentes procedimentos de pré-molhagem: a) pré-molhagem saturada; b) pré-molhagem com 100% da água de absorção; c) pré-molhagem com 80% da água de absorção.

Os tipos de concreto produzidos e as nomenclaturas adotadas estão presentes na tabela 4.

Tabela 4 – Nomenclatura e composição dos concretos

| <b>Legenda</b>  | <b>Substituição do metacaulim</b> | <b>Substituição do ARG</b> | <b>Pré-molhagem do ARM</b> | <b>Teor de aditivo</b> |
|-----------------|-----------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------|
| CCV             | -                                 | -                          | -                          | -                      |
| CCV 20 MK       | 20%                               | -                          | -                          | 0,40%                  |
| CR 50 ARG 20 MK | 20%                               | 50%                        | 100%                       | 0,40%                  |
| CR 50 ARG 20 MK | 20%                               | 50%                        | 80%                        | 0,40%                  |
| CR 50 ARG 20 MK | 20%                               | 50%                        | saturado                   | 0,40%                  |

**Fonte:** Autora (2024)

A abreviatura CR refere-se ao concreto reciclado, enquanto CCV trata do concreto convencional. Os numerais expressos informam as porcentagens de substituição, que serão 50% de agregado reciclado e 20% para metacaulim. Além disso, a sigla ARG revela a presença de agregado reciclado na composição e o termo MK significa que há metacaulim. A inclusão do metacaulim se deu para que fosse possível atingir maiores valores de resistência à compressão, compensando a perda atribuída ao uso dos agregados reciclados, conforme apontado na literatura. Como também, através do metacaulim, buscou-se reduzir o alto consumo de cimento. Deseja-se, portanto, experienciar sua utilização frente a composições com o ARM.

Foi produzido 8 corpos de prova com o concreto nomeado de CCV, tinha como finalidade validar o traço adotado e este permaneceu nas análises. Para o concreto convencional “CCV 20 MK” também foram moldados 8 corpos de prova. Pode-se avaliar a resistência à compressão aos 7 dias dos concretos convencionais, tanto em cura úmida quanto na cura ao ar (em laboratório). Poucos estudos trabalham com a cura ao ar de concretos com agregado reciclado misto e buscou-se verificar o desempenho da mistura frente a essa variável. Como também, para a mistura CR 50 ARG 20 MK foram produzidos 16 corpos de prova para cada tipo de pré-molhagem, sendo moldados corpos de

prova destinados ao ensaio de resistência à compressão para as idades de 7 e 28 dias. Para essa composição, os corpos de prova também foram avaliados pelos dois tipos de cura referidos.

Por meio da equação 1 pode-se calcular a resistência de dosagem, como abordado na NBR 12655 (ABNT, 2022), considerando os 28 dias de cura. A resistência calculada foi:

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65 S_d$$

$$f_{cj} = 40 + 1,65 \cdot 4 = 46,6 \text{ MPa} \quad (1)$$

Onde:

$f_{cj}$ : é a resistência do concreto à compressão, prevista para a idade  $j$  dias, expressa em megaPascal (MPa);

$f_{ck}$ : é a resistência característica de concreto à compressão, aos  $j$  dias, expressa em megaPascal (MPa);

$S_d$  - desvio padrão de dosagem, que pode variar em três condições distintas (A, B e C), em função do controle de produção do concreto, conforme apresentado na tabela 5.

Tabela 5 – Valores de desvio padrão de dosagem

|                   |                         |                                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Condição A</b> | $S_d = 4 \text{ MPa}$   | Materiais dosados em massa e água de amassamento é corrigida em função da correção da umidade dos agregados. Classe C10 a C80.                                                                                   |
| <b>Condição B</b> | $S_d = 5,5 \text{ MPa}$ | Cimento dosado em massa, agregados dosados em massa combinada com volume, a umidade do agregado gráúdo é determinada e o volume do agregado gráúdo é corrigido através da curva de inchamento. Classe C10 a C25. |
| <b>Condição C</b> | $S_d = 7 \text{ MPa}$   | Cimento medido em massa, agregados e água em volume, umidade dos agregados estimada. Classe C10 a C15.                                                                                                           |

**Fonte:** NBR 12655 (ABNT, 2023)

Continuando o passo-a-passo do método ABCP, pode-se determinar o consumo de água ( $C_a$ ), na qual o valor estimado para o ensaio de abatimento do tronco de cone (slump test) é definido conforme o tamanho máximo do agregado gráúdo utilizado, conforme a tabela 6.

Tabela 6 – Determinação do consumo de água aproximada (L/m³ ou kg/m³)

| Abatimento<br>(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:** Adaptação de ABCP online (2023)

Considerando que a dimensão máxima encontrada no ensaio de granulometria foi de 19 mm e sendo adotado um abatimento entre 80 a 100 mm, foi encontrado o consumo de água aproximado de 205 litros.

Sabendo que o valor do fator água/cimento (a/c) e o consumo de água (Ca) é de 0,45 e 205 L, respectivamente, na equação 2 tem-se a expressão para estimar o consumo de cimento, encontrando-se o valor de consumo de cimento de 455,56 kg para cada metro cúbico de concreto.

$$Cc = \frac{Ca}{a/c}$$

$$Cc = \frac{205}{0,45} = 455,56 \text{ kg/m}^3 \quad (2)$$

Onde:

Cc: consumo de cimento (kg/m³);

Ca: consumo de água (L/m³);

a/c: fator água cimento.

Na tabela 7 há a relação do diâmetro máximo do agregado graúdo utilizado e o módulo de finura da areia, a qual servirá para determinar o consumo de agregado.

Tabela 7 – Determinação da porcentagem de agregado graúdo

| MF  | Dimensão máxima (mm)        |      |       |      |       |
|-----|-----------------------------|------|-------|------|-------|
|     | 9,5                         | 19,0 | 25,0  | 32,0 | 38,0  |
|     | (%) de agregado graúdo (Vb) |      |       |      |       |
| 1,8 | 0,645                       | 0,77 | 0,795 | 0,82 | 0,845 |
| 2   | 0,625                       | 0,75 | 0,775 | 0,8  | 0,825 |
| 2,2 | 0,605                       | 0,73 | 0,755 | 0,78 | 0,805 |
| 2,4 | 0,585                       | 0,71 | 0,735 | 0,76 | 0,785 |
| 2,6 | 0,565                       | 0,69 | 0,715 | 0,74 | 0,765 |
| 2,8 | 0,545                       | 0,67 | 0,695 | 0,72 | 0,745 |
| 3   | 0,525                       | 0,65 | 0,675 | 0,7  | 0,725 |
| 3,2 | 0,505                       | 0,63 | 0,655 | 0,68 | 0,705 |

Fonte: Adaptação de ABCP online (2023)

Utilizando-se de Dimensão máxima de 19 mm e um módulo de finura que é 2,449, por meio de interpolação, o valor encontrado para o volume compactado seco de agregado graúdo (Vb) é de 0,7051. Com isso, o consumo de brita encontrado, através da equação 3, é de 1078,80 kg/m<sup>3</sup>.

$$Cb = Vb \cdot Mu$$

$$Vb = 0,7051 \cdot 1530 = 1078,80 \text{ kg/m}^3 \quad (3)$$

Onde:

Cb: consumo de agregado graúdo;

Vb: volume do agregado graúdo seco por m<sup>3</sup> de concreto;

Mu: Massa unitária compactada do agregado graúdo.

Logo, com os valores já obtidos, é possível estimar o volume do agregado miúdo da mistura, utilizando os consumos anteriormente estimados e as massas específicas dos materiais, conforme a equação 4.

$$Vm = 1 - \frac{Cc}{\gamma_c} + \frac{Cb}{\gamma_b} + \frac{Ca}{\gamma_a}$$

$$Vm = 1 - \frac{455,56}{3040} + \frac{1078,80}{2670} + \frac{205}{1000} = 0,241 \text{ m}^3 \quad (4)$$

Onde:

Vm: volume de areia;

Cc: consumo de cimento;

$\gamma_c$ : massa específica do cimento;

Cb: consumo de brita;

$\gamma_b$ : massa específica da brita;

Ca: consumo de água;

$\gamma_a$ : massa específica da água.

Dado o volume ocupado pelo agregado miúdo de 0,241 m<sup>3</sup>, tem-se o consumo de agregado miúdo para a mistura determinado pela equação 5.

$$C_m = \gamma_m \cdot V_m$$

$$C_m = 2510 \cdot 0,241 = 603,87 \text{ kg/m}^3 \quad (5)$$

Onde:

Cm: consumo de agregado miúdo;

$\gamma_c$ : massa específica da areia;

Por fim, com todos os consumos estimados, tem-se a proporção da mistura em relação à massa de cimento disposta na equação 6.

$$\frac{C_c}{C_c} : \frac{C_m}{C_c} : \frac{C_b}{C_c} : \frac{C_a}{C_c}$$

$$\frac{455,56}{455,56} : \frac{603,87}{455,56} : \frac{1078,80}{455,56} : \frac{205}{455,56} = 1 : 1,33 : 2,37 : 0,45 \quad (6)$$

Na tabela 8 tem-se os traços conforme definido em dosagem.

Tabela 8 – Composição das misturas de concreto

| Legenda         | Cimento | AMN   | AGN   | ARG   | Metacaulim | Quantidade de água total |
|-----------------|---------|-------|-------|-------|------------|--------------------------|
| CCV             | 13,67   | 18,12 | 32,36 | -     | -          | 6,15                     |
| CCV 20 MK       | 10,94   | 18,12 | 32,36 | -     | 2,73       | 6,15                     |
| CR 50 ARG 20 MK | 10,94   | 18,12 | 16,18 | 16,18 | 2,73       | 6,15                     |

Fonte: Autora (2024)

O uso do agregado reciclado misto interfere diretamente na trabalhabilidade do concreto, sabendo disso foi necessária a inclusão de aditivo superplastificante. Este elemento pode proporcionar significativo aumento no abatimento, sem alterar o consumo de água estabelecido. No período de estudo de dosagem algumas porcentagens do aditivo foram testadas e a que mais se

adequou ao traço usado foi o valor de 0,4% que corresponde a uma quantidade de 61,51 g do superplastificante.

Sabe-se que a absorção desse agregado é de 12,5% e na tabela 9 encontra-se a quantidade de água pelo método de pré-molhagem escolhido.

Tabela 9 - Valores de pré-molhagem adotados

| Pré-molhagem do ARM | Quantidade de água |
|---------------------|--------------------|
| 100%                | 2,02               |
| 80%                 | 1,62               |
| Saturado            | livre              |

**Fonte:** Autora (2024)

O procedimento adotado para a saturação do agregado foi deixá-lo em um recipiente, durante 24 horas, com quantidade de água suficiente para que todos os agregados estivessem submersos, como na figura 5. Após o referido tempo, retirou-se o excesso superficial com pano.

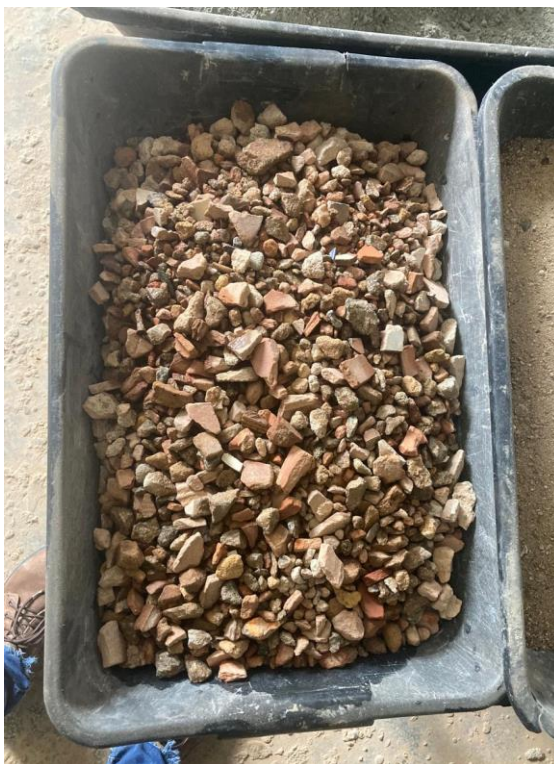
Figura 5 - Método de pré-molhagem com agregados submersos



**Fonte:** Autora (2024)

Para os agregados com 100% e 80% da água de absorção, a água calculada é inserida e, após 15 minutos, o ARM é retirado e a mistura pode ser realizada. A figura 6 exibe o ARM durante a pré-molhagem com valor de 100%.

Figura 6 - Pré-molhagem com agregados submersos



**Fonte:** Autora (2024)

#### 4.2.2 Procedimento de mistura

Nessa etapa utilizou-se de betoneira de eixo inclinado, com frequência de 34 rotações por minuto e que possui capacidade de 150 litros. O procedimento para mistura dos materiais está descrito a seguir:

- Etapa de pré-molhagem dos agregados reciclados graúdos, adicionando-os em recipientes e distribuindo a quantidade de água determinada. Essa etapa tem duração de apenas 15 minutos e, caso haja excesso de água, é retirado.
- Pré-umidificação da face interna do tambor da betoneira, retirando o volume excedente de água.

- Coloca-se 100% do agregado graúdo, natural e/ou reciclado, ao misturador parado.
- Adiciona-se 50% da água da mistura, e liga o misturador por 1 minuto.
- Com o misturador parado, adiciona-se o cimento e o metacaulim, e mistura por 2 minutos.
- Incorpora à mistura o agregado miúdo.
- Insere os 50% restante da água de mistura e liga o misturador por 3 minutos.
- Necessária a parada do misturador, para a limpeza, que ocorre em 2 minutos, com auxílio de uma colher de pedreiro, removendo o material aderido nas paredes do misturador.
- Finalizando, então, com o misturador acionado durante mais 1 minuto.

### **4.3 Ensaios realizados para a determinação das propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido**

#### **4.3.1 Abatimento do Tronco de Cone (Slump Test)**

O ensaio de Abatimento do Tronco de Cone é parametrizado pela NBR 16889 (ABNT, 2020b), sendo utilizado para avaliar a consistência e trabalhabilidade do concreto. O ensaio é realizado preenchendo o Cone de Abrams (molde tronco-cônico) em três camadas. A camada preenchida é adensada por meio de 25 golpes uniformes, com auxílio de uma haste de aço. Por fim, o molde é retirado em movimento contínuo e disposto invertido ao lado da amostra de concreto, medindo-se a altura do centro geométrico da amostra até a superfície inferior da haste, que corresponde ao abatimento do concreto, em centímetros.

#### **4.3.2 Resistência à compressão**

O ensaio de resistência à compressão está descrito na NBR 5739 (ABNT, 2018), a qual traz determinações quanto à aparelhagem, preparação dos corpos de prova e execução do ensaio. Para cada tipo de pré-molhagem, foram moldados 16 corpos de prova, para a realização do ensaio nas idades de 7 e 28

dias, conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018a). Desse modo, para cada idade e tipo de cura, foram analisados quatro corpos de prova. Para a apresentação e análise dos resultados foi desconsiderado o valor mais distante da média, sendo o valor médio o resultado de três corpos de prova.

De maneira geral, foram moldados 64 corpos de prova, em formato cilíndrico e com dimensões de diâmetro e altura de 10 e 20 centímetros, respectivamente. Os moldes foram devidamente inspecionados e passaram pela etapa de limpeza e aplicação do óleo vegetal, buscando um desmolde facilitado. O procedimento de moldagem e adensamento ocorreu conforme a NBR 5738 (ABNT, 2016), tendo seguido os parâmetros para o adensamento mecânico. Logo após a moldagem, os corpos de prova descansaram por 24 horas, e então, puderam ser desmoldados e identificados. Com isso, parte deles foi direcionada à cura úmida, que ocorre pela imersão dos corpos de prova em tanque com água saturada de cal hidratada. Outros corpos de prova, permaneceram em ambiente controlado, para que ocorresse a cura ao ar. Após o tempo de 7 e 28 dias, os corpos de prova foram retificados, para então haver o rompimento na prensa AMSLER, com capacidade de carga de 200 tf, pertencente ao LEMA.

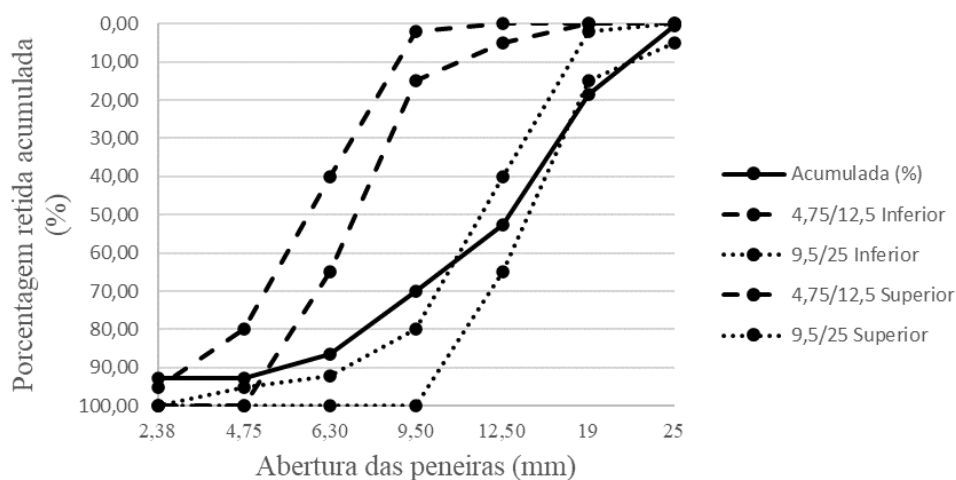
## 5. RESULTADOS

### 5.1 Caracterização dos agregados

#### 5.1.1 Agregado Reciclado Graúdo (ARG)

Em conformidade com os requisitos estabelecidos pela norma NBR 7211 (ABNT, 2022a) para a distribuição do agregado graúdo, foi confeccionada a curva granulométrica, apresentada na Figura 7. A dimensão máxima característica corresponde a 25 mm e o módulo de finura a 4,21. O gráfico evidencia que a granulometria do ARG estende-se até uma abertura de 9,5 mm, situada na transição entre as zonas de 4,75/12,5 e 9,25/25, isso demonstra que não está enquadrada perfeitamente em nenhuma delas.

Figura 7 – Distribuição granulométrica do agregado reciclado graúdo



Fonte: Relatório (2023a)

Mediante os parâmetros da NBR 15116 (ABNT, 2021) para agregado graúdo, o ensaio de substâncias nocivas atestou que o teor de finos é adequado, visto que a diferença dos teores de materiais pulverulentos obtidos nas duas mostras não ultrapassou 0,5%. Os dados do teor de material pulverulento estão na tabela 10.

Tabela 10 – Ensaio do teor de material pulverulento do agregado reciclado  
gráúdo

| <b>Amostras do material pulverulento gráúdo</b> | <b>Massa</b> |
|-------------------------------------------------|--------------|
| Massa 1 (material inicial)                      | 3773,36 g    |
| Massa 2 (material inicial)                      | 3768,48 g    |
| Massa 1 (material seco na estufa)               | 3623,3 g     |
| Massa 2 (material seco na estufa)               | 3599,61 g    |
| m1 (teor de material pulverulento da amostra 1) | 4,00%        |
| m1 (teor de material pulverulento da amostra 1) | 4,50%        |

**Fonte:** Relatório (2023a)

Quanto à forma dos grãos, tem-se como base a dimensão máxima de 25 mm identificada na análise granulométrica, na qual há material retido até a peneira de 19 mm. O ensaio foi conduzido em cinco frações granulométricas: 4,75 mm, 6,3 mm, 9,5 mm, 12,5 mm e 19 mm. O peneiramento foi realizado em uma amostra de 10 kg, resultando na distribuição das mencionadas frações e proporcionando um total de 200 grãos para iniciar o ensaio. A tabela 11 é referente a este ensaio e apresentam que o agregado atende o requisito de forma determinado pela NBR 7211 (ABNT, 2022).

Tabela 11 - Ensaio de índice de forma pelo método do paquímetro

| <b>Frações granulométricas</b>            | <b>Número de grãos</b> | <b>Índice de forma</b> |
|-------------------------------------------|------------------------|------------------------|
| #19                                       | 32                     | 2,76                   |
| #12,5                                     | 79                     | 2,72                   |
| #9,5                                      | 33                     | 2,72                   |
| #6,3                                      | 42                     | 2,67                   |
| #4,75                                     | 14                     | 2,80                   |
| <b>Índice de forma do agregado gráúdo</b> |                        | 2,72                   |

**Fonte:** Relatório (2023a)

Seguindo os parâmetros estabelecidos para a classificação de forma dos grãos (cúbica, lamelar, alongada e alongada-lamelar) conforme detalhado no Anexo A da norma NBR 5564 (ABNT, 2021a), utilizou-se do paquímetro, para obter as três dimensões dos agregados gráúdos (largura, espessura e comprimento). Os dados deste ensaio estão dispostos na tabela 12 e, por meio

dos dados, observa-se que apesar da existência de grãos lamelares e alongados, há uma predominância de grãos cúbicos nas frações, sendo um bom parâmetro para a forma.

Tabela 12 - Classificação de forma dos grãos

| Frações<br>(mm) | Forma dos grãos |    |         |    |          |    |                       |   | Total de<br>grãos |
|-----------------|-----------------|----|---------|----|----------|----|-----------------------|---|-------------------|
|                 | Cúbica          |    | Lamelar |    | Alongada |    | Alongada -<br>Lamelar |   |                   |
|                 | Nº              | %  | Nº      | %  | Nº       | %  | Nº                    | % |                   |
| 19,0            | 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)

Para o ensaio de resistência ao impacto e à abrasão *Los Angeles* utilizou-se uma amostra de 20 kg, a qual passou por quarteamento até atingir a massa de 5 kg requerida pela norma, para uma dimensão máxima de 25 mm. Observou-se que a graduação B foi a mais adequada às características do agregado e os parâmetros usados, para uma massa inicial de 5000 g, foram 500 rotações do tambor, com 11 esferas de aço para o procedimento. Conforme designa a norma, antes de ser inserida a amostra no tambor, houve a separação das classes granulométricas nos seguintes intervalos: #19,0 - 12,5 mm e #12,5 - 9,5 mm. Necessitou-se repetir o procedimento de quarteamento, para que houvesse 2,5 kg nos intervalos granulométricos. A tabela 13 contém os resultados deste ensaio, podendo-se destacar que, as amostras apresentaram perda de massa por abrasão maior de 50%. Apesar da NBR 7211 (ABNT, 2022) recomendar para agregados naturais um índice de desgaste inferior a 50%, esse resultado é esperado em agregados reciclados, visto que apresentam uma menor resistência ao desgaste.

Tabela 13 - Ensaio de resistência ao impacto e à abrasão *Los Angeles*

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

**Fonte:** Relatório (2023a)

Por meio da NBR 16917 (ABNT, 2021e), tem-se o método para determinar a densidade e a absorção de água. Os resultados do ensaio estão dispostos na tabela 14. Quando analisado os resultados, a absorção de água demonstra-se elevada do que é comumente encontrado para agregados naturais, assim como valores inferiores para massa específica. Entende-se que esses valores são decorrentes da porosidade do ARM.

A NBR 15116 (ABNT, 2021) traz como limite para a absorção de água do agregado reciclado misto, utilizado em misturas cimentícias, o valor de 12%. Logo, o ARM utilizado apresenta uma absorção um pouco maior que a recomendada.

Tabela 14 - Ensaio de densidade e absorção da água

| <b>Amostras</b> | <b>Massa saturada (g)</b> | <b>Massa submersa (g)</b> | <b>Densidade na condição seca (g/cm³)</b> | <b>Densidade na condição saturada superfície seca (g/cm³)</b> | <b>Absorção de água (%)</b> |
|-----------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| 1               | 8538,30                   | 4580,00                   | 1,92                                      | 2,16                                                          | 12,10                       |
| 2               | 8722,00                   | 4661,00                   | 1,90                                      | 2,15                                                          | 12,90                       |
| Média           | 8630,15                   | 4620,50                   | 1,91                                      | 2,16                                                          | 12,50                       |

**Fonte:** Relatório (2023a)

Tratando do ensaio de massa unitária, a NBR 16972 (ABNT, 2021f) parametriza dois métodos, A e B, referentes aos estados compactado e solto, respectivamente. Os valores obtidos neste ensaio estão exibidos nas tabelas 15 e 16. Como esperado, os resultados apresentam-se um pouco baixo, em relação os valores de agregados naturais. Isso se deve à porosidade dos agregados reciclados.

Tabela 15 - Ensaio de massa unitária estado compactado (método A)

| <b>Amostras</b> | <b>Massa unitária no estado compactado (kg/cm³)</b> |
|-----------------|-----------------------------------------------------|
| 1               | 1140                                                |
| 2               | 1170                                                |
| 3               | 1170                                                |
| Média           | 1160                                                |

**Fonte:** Relatório (2023a)

Tabela 16 - Ensaio de massa unitária estado solto (método C)

| <b>Amostras</b> | <b>Massa unitária no estado solto (kg/cm³)</b> |
|-----------------|------------------------------------------------|
| 1               | 1090                                           |
| 2               | 1100                                           |
| 3               | 1110                                           |
| Média           | 1100                                           |

**Fonte:** Relatório (2023a)

Ademais, visando avaliar a qualidade do agregado graúdo reciclado, a NBR 15116 (ABNT, 2021b) traz o método para determinação da composição dos agregados reciclados graúdos por análise visual. Esse ensaio também foi realizado e os dados estão apresentados na tabela 17. As amostras utilizadas, somadas, totalizam 11,6 kg e obteve-se por meio do parâmetro “G3” que as amostras estão classificadas como “Classe ARM” (Classe Agregado Reciclado Misto).

Tabela 17 - Determinação da composição dos agregados reciclados graúdos por análise visual

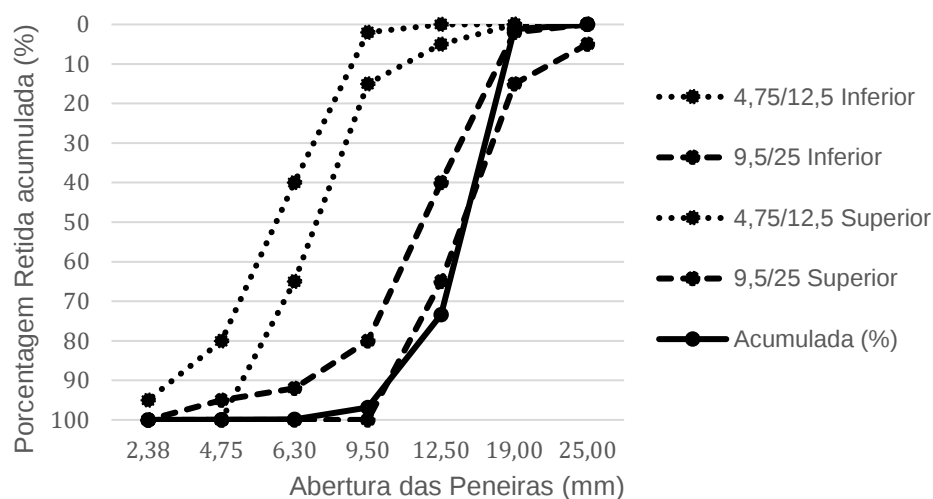
| <b>Grupos</b>                             | <b>Massa (g)</b> | <b>Percentual (%)</b> |
|-------------------------------------------|------------------|-----------------------|
| G1 (fragmentos de massa de cimento)       | 4900             | 42,34                 |
| G2 (fragmentos de rocha)       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

**Fonte:** Relatório (2023a)

### 5.1.2 Agregado Graúdo Natural (AGN)

A granulometria do AGN é caracterizada por um ponto na faixa superior de 4,75/12,5, um ponto na faixa inferior de 9,5/25 e três pontos na faixa superior de 9,5/25. O diâmetro máximo do agregado é de 19 mm e seu módulo de finura do agregado é de 4,712. Na figura 8 está representada a distribuição granulométrica do AGN.

Figura 8 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo natural



Fonte: Relatório (2023a)

Os resultados do ensaio de massa específica e absorção de água estão na Tabela 18. Além disso, observou-se que os limites normativos de 0,02 de diferença entre os resultados de massa específica e 0,2 de diferença entre os resultados de absorção foram respeitados entre as amostras 1 e 2.

Tabela 18 - Ensaio de massa específica e absorção de água

| Amostras                         | Densidade na condição seca (g/cm <sup>3</sup> ) | Densidade na condição saturada na superfície seca (g/cm <sup>3</sup> ) | Absorção de água (%) |
|----------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| 1                                | 2,67                                            | 2,68                                                                   | 0,3                  |
| 2                                | 2,67                                            | 2,68                                                                   | 0,4                  |
| Média (resultados mais próximos) | 2,67                                            | 2,68                                                                   | 0,3                  |

Fonte: Relatório (2023a)

Conforme a NBR 16972 (ABNT, 2021) obteve-se os valores de massa unitária tanto no estado compactado quanto no estado solto, apresentado na tabela 19 e 20.

Tabela 19 - Ensaio de massa unitária estado compactado (método A)

| Determinações | Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> ) | Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> ) com aproximação de 10 kg/m <sup>3</sup> |
|---------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| 1             | 1530                                | 1530                                                                        |
| 2             | 1523                                | 1530                                                                        |
| 3             | 1523                                | 1530                                                                        |
| 4             | 1510                                | 1510                                                                        |
| Média         | 1522                                | 1530                                                                        |
| Desvio padrão | 8,4808                              | 10                                                                          |
| COV           | 0,0056                              | 0,0065                                                                      |

Fonte: Relatório (2023a)

Tabela 20 - Ensaio de massa unitária estado solto (método C)

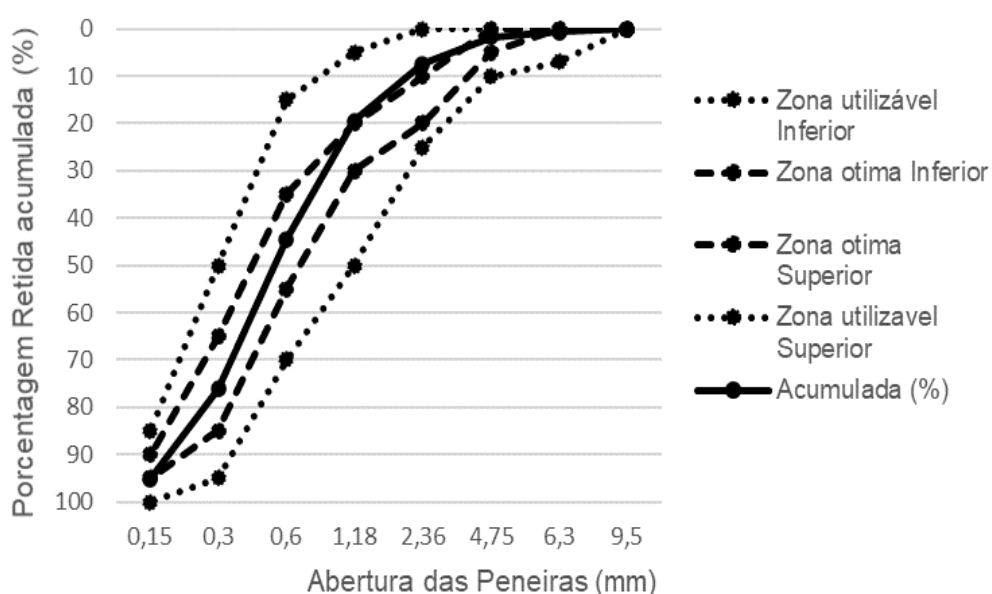
| Determinações | Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> ) | Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> ) com aproximação de 10 kg/m <sup>3</sup> |
|---------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| 1             | 1409                                | 1410                                                                        |
| 2             | 1442                                | 1450                                                                        |
| 3             | 1449                                | 1450                                                                        |
| 4             | 1469                                | 1470                                                                        |
| Média         | 1442                                | 1450                                                                        |
| Desvio padrão | 25,2183                             | 25,1661                                                                     |
| COV           | 0,0175                              | 0,0174                                                                      |

Fonte: Relatório (2023a)

### 5.1.3 Agregado Miúdo Natural (AMN)

O agregado miúdo natural, pela granulometria, apresentou-se dentro do limite de zona ótima na peneira 2,36 mm, como a representação gráfica demonstrada na figura 9.

Figura 9 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo natural



Fonte: Relatório (2023a)

O módulo de finura do AMN é 2,449 e com diâmetro máximo de 4,75 mm. Além disso, o ensaio de massa específica e absorção de água demonstra que os resultados encontrados estão conforme a NBR 16916 (ABNT, 2021d). A tabela 21 revela os dados obtidos.

Tabela 21 - Dados do ensaio de massa específica e absorção de água do agregado graúdo natural

| Amostras | Volume de água (cm <sup>3</sup> ) | Densidade na condição seca (g/cm <sup>3</sup> ) | Densidade na condição saturada na superfície seca (g/cm <sup>3</sup> ) | Absorção de água (%) |
|----------|-----------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| 1        | 302,26                            | 2,52                                            | 2,53                                                                   | 0,5                  |
| 2        | 301,05                            | 2,50                                            | 2,51                                                                   | 0,7                  |
| Média    | 301,65                            | 2,51                                            | 2,52                                                                   | 0,6                  |

Fonte: Relatório (2023a)

O ensaio de massa unitária foi realizado, tanto no estado compactado, quanto no estado solto. Os resultados obtidos estão dispostos na tabela 22 e na tabela 23.

Tabela 22 - Ensaio de massa unitária no estado compactado (método A)

| Determinações | Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> ) | Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> ) com aproximação de 10 kg/m <sup>3</sup> |
|---------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| 1             | 1611                                | 1620                                                                        |
| 2             | 1611                                | 1620                                                                        |
| 3             | 1611                                | 1620                                                                        |
| 4             | 1597                                | 1600                                                                        |
| Média         | 1607                                | 1620                                                                        |
| Desvio padrão | 6,7399                              | 10,00                                                                       |
| COV           | 0,0042                              | 0,0062                                                                      |

Fonte: Relatório (2023a)

Tabela 23 - Ensaio de massa unitária no estado solto (método C)

| Determinações | Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> ) | Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> ) com aproximação de 10 kg/m <sup>3</sup> |
|---------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| 1             | 1490                                | 1490                                                                        |
| 2             | 1490                                | 1490                                                                        |
| 3             | 1503                                | 1510                                                                        |
| 4             | 1496                                | 1500                                                                        |
| Média         | 1496                                | 1500                                                                        |
| Desvio padrão | 6,4529                              | 9,57                                                                        |
| COV           | 0,0043                              | 0,0064                                                                      |

Fonte: Relatório (2023a)

Por fim, os ensaios de teor de argila e de teor de material pulverulento tem seus resultados apresentados nas tabelas 24 e 25, respectivamente, sendo possível verificar seus valores por meio delas. No ensaio de materiais pulverulentos, a diferença dos teores nas amostras não ultrapassou 1%, sendo conforme a determinação da norma.

Tabela 24 - Ensaio de teor de argila

| <b>Amostras</b> | <b>Massa inicial (g)</b> | <b>Massa do material retido (g)</b> | <b>Teor de argila (%)</b> |
|-----------------|--------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| 1               | 540,0                    | 520,0                               | 3,7                       |
| 2               | 540,0                    | 535,0                               | 0,9                       |
| 3               | 540,0                    | 530,0                               | 1,9                       |
| Média           | 540,0                    | 528,3                               | 2,2                       |

**Fonte:** Relatório (2023a)

Tabela 25 - Ensaio de teor de material pulverulento

| <b>Amostras</b> | <b>Massa à temperatura ambiente (g)</b> | <b>Massa final da amostra após lavagem e secagem (g)</b> | <b>Material pulverulento (%)</b> |
|-----------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------|
| 1               | 500,0                                   | 486,2                                                    | 2,76                             |
| 2               | 500,0                                   | 487,0                                                    | 2,60                             |
| 3               | 500,0                                   | 489,9                                                    | 2,02                             |
| Média           | 500,0                                   | 486,6                                                    | 2,68                             |

**Fonte:** Relatório (2023a)

## 5.2 Análise dos concretos produzidos

Após a produção do concreto, com uma porção da mistura, foi possível realizar o ensaio de abatimento do tronco de cone (slump test). Na tabela 26, estão os valores obtidos na caracterização do concreto em estado fresco.

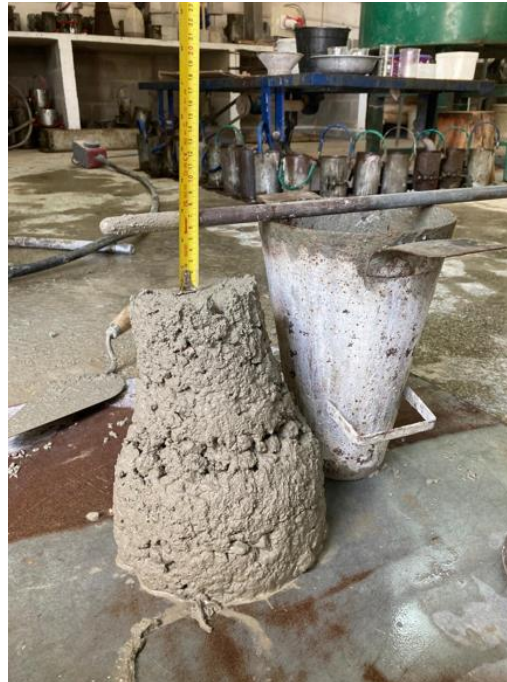
Tabela 26 - Dados do ensaio de abatimento do tronco de cone

| <b>Legenda</b>  | <b>Pré-molhagem do ARM</b> | <b>Slump test (cm)</b> |
|-----------------|----------------------------|------------------------|
| CCV             | -                          | 2,5                    |
| CCV 20 MK       | -                          | 5,0                    |
| CR 50 ARG 20 MK | 100%                       | 6,5                    |
| CR 50 ARG 20 MK | 80%                        | 3,5                    |
| CR 50 ARG 20 MK | Saturado                   | 18,0                   |

**Fonte:** Autora (2024)

Por meio dos valores obtidos, percebeu-se que nas misturas com o agregado reciclado misto, a quantidade de água de pré-molhagem adicionada influencia diretamente na fluidez e trabalhabilidade do concreto fresco. O valor elevado para a condição do ARM saturado, exemplifica essa influência, visto que, nas misturas com o qual foi comparado, estava estabelecida o mesmo fator a/c com a mesma porcentagem de aditivo. Tal fato demonstra que na pré-molhagem saturada, sobrepõe-se a capacidade de absorção do agregado, e essa incompatibilidade acaba tornando a mistura ainda mais fluida. Ademais, acrescenta que por meio da pré-molhagem saturada não há um controle da água adicionada através desse agregado. Nas figuras 10, 11 e 12 mostra-se a condição do concreto neste ensaio.

Figura 10 - Ensaio de abatimento do tronco de cone, com pré-molhagem equivalente a 80% de absorção



**Fonte:** Autora (2024)

Figura 11 - Ensaio de abatimento do tronco de cone, com pré-molhagem equivalente a 100% de absorção



**Fonte:** Autora (2024)

Figura 12 - Ensaio de abatimento do tronco de cone, com pré-molhagem do agregado saturado



**Fonte:** Autora (2024)

Acrescenta-se que os valores obtidos para consistência, podem se relacionar com os diversos usos do concreto, direcionando o concreto mais fluido para peças densamente armadas ou estruturas mais esbeltas. Porém, a quantidade de água pode interferir na resistência mecânica, como também no adensamento do material.

#### 5.2.1 Resistência à compressão

Neste trabalho foram analisados os resultados de resistência à compressão aos 7 e 28 dias, submetidos à cura úmida e ao ar, com diferentes procedimentos de pré-molhagem. Nas figuras 13 e 14 podem ser observados os corpos de prova antes e depois do rompimento.

Figura 13 - Corpos de prova antes do rompimento



Fonte: Autora (2024)

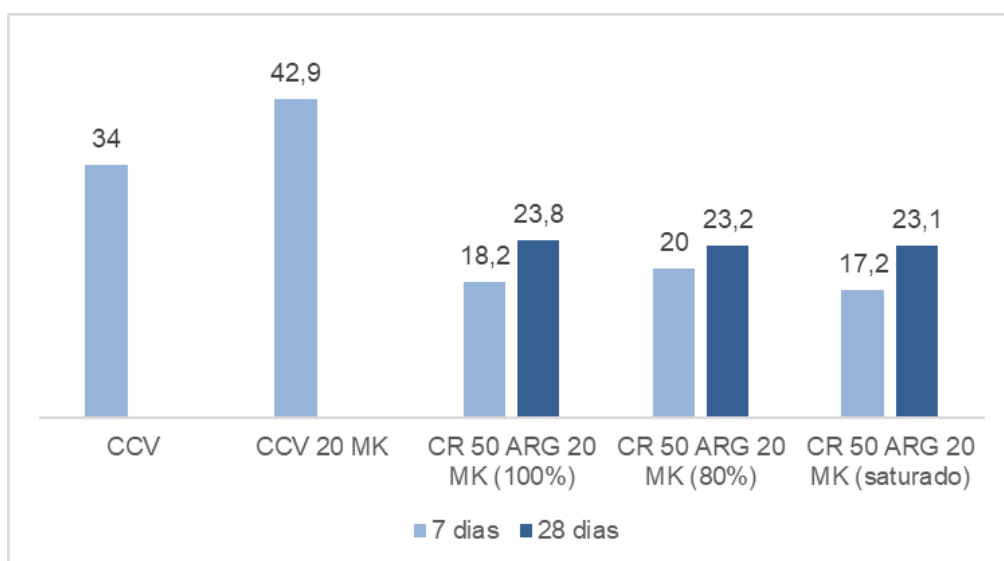
Figura 14 - Corpo de prova rompido



Fonte: Autora (2024)

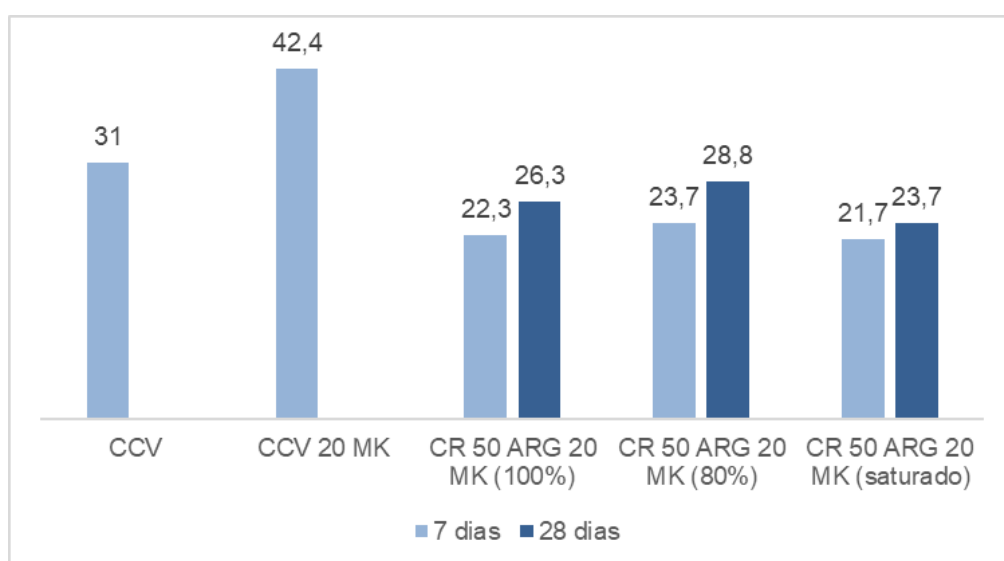
Os resultados obtidos no ensaio estão apresentados na figura 15 e 16. Nota-se que na idade de 28 dias todos os concretos atingiram mais do que 20 MPa, enquadrando-se como concretos estruturais.

Figura 15 - Dados do ensaio de resistência à compressão na cura úmida



Fonte: Autora (2024)

Figura 16 - Dados do ensaio de resistência à compressão na cura ao ar



Fonte: Autora (2024)

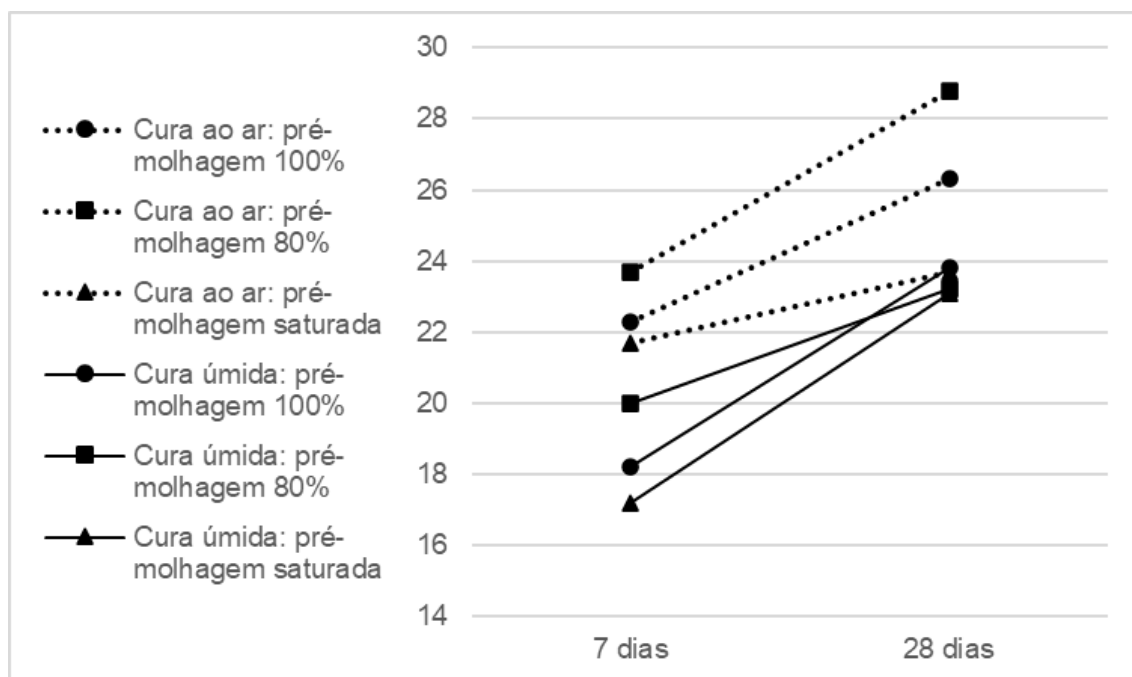
Os valores de resistência à compressão obtidos demonstram, como esperado, uma redução significativa nos concretos com uso do agregado reciclado graúdo. Salienta-se que, para os concretos convencionais, o tipo de cura não alterou expressivamente suas condições, principalmente naquele com substituição do metacaulim. Quanto ao uso do metacaulim, apesar de ser um material pozolânico, este demonstrou bons resultados frente aos 7 dias, com aumento de resistência que chega até 36% na cura ao ar, em relação ao concreto CCV (sem metacaulim). Além de não ter a incorporação de metacaulim, o concreto de referência também não possui aditivo superplastificante, porém não se atribui esse ganho de resistência ao aditivo, pois ele não foi usado com a intenção de reduzir a quantidade de água, tendo todos os concretos a mesma relação a/c.

Analisando os corpos de prova compostos por ARM e submersos em água, tem-se, na idade inicial de 7 dias, uma resistência maior alcançada pela pré-molhagem de 80%. Contudo, aos 28 dias essa resistência iguala-se, demonstrando que os diferentes percentuais de pré-molhagem utilizados não foram suficientes para influenciar o comportamento do concreto no seu estado endurecido.

Os resultados do concreto em cura ao ar, diferentemente da cura úmida, em suas idades iniciais apresentaram-se com resistências aproximadas. Contudo, aos 28 dias, demonstrou um cenário animador para o concreto pré-saturado com 80% da água de absorção, cuja resistência teve um ganho de 5,6 MPa, quando comparado ao outro tipo de cura.

No cenário dos corpos de prova de cura ao ar, notou-se que a pré-molhagem saturada interferiu diretamente no desempenho mecânico, obtendo um ganho mínimo de resistência entre as idades de 7 e 28 dias, além de mostrar-se com resultados inferiores quando comparados com os outros métodos de pré-saturação. Isso demonstra que, no uso de agregados heterogêneos e porosos, como os agregados reciclados mistos, esta não é uma técnica de pré-molhagem tão eficaz. A figura 17, traz em forma de gráfico, o comparativo de pré-molhagem conforme os tipos de cura.

Figura 17 - Representação gráfica das proporções de pré-molhagem mediante a cura úmida e ao ar



Fonte: Autora (2024)

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os objetivos propostos foram alcançados, visto que todos os concretos produzidos atingiram uma resistência à compressão maior que 20 MPa. Os resultados obtidos comprovam a viabilidade da utilização do agregado reciclado graúdo misto para obtenção de concreto estrutural e apontam o potencial que há nesse elemento.

Quanto à análise no estado fresco, por meio do abatimento do tronco de cone, os resultados obtidos demonstram-se coerentes com o que a literatura aborda, apresentando um concreto com menor trabalhabilidade devido ao uso do agregado reciclado misto. Ademais, foi possível verificar que as propriedades do agregado reciclado influenciam diretamente na mistura no estado fresco, destacando a alta absorção de água. Pontua-se que, quanto mais água adotada na pré-molhagem, maiores foram os valores de abatimento.

Tratando da resistência à compressão, como previsto, houve redução desse parâmetro quando utilizado o ARM. A substituição de 50% do agregado graúdo natural pelo agregado reciclado misto reduziu significativamente sua resistência quando comparado ao concreto de referência, contudo, é possível fazer algumas observações. Dentre os métodos de pré-molhagem observou-se que dentre os 3 níveis estudados, aos 28 dias em cura úmida, não houve alteração expressiva do nível de resistência. Isso demonstra que, no estado endurecido, não há interferência direta no valor da quantidade de água usada na pré-molhagem. A cura ao ar demonstrou um ganho significativo quando utilizada a pré-molhagem no valor de absorção de 80%, aos 28 dias. Comparando com a mistura de agregado saturado, também avaliado aos 28 dias neste tipo de cura, há um ganho de resistência em torno de 17%. O metacaulim, observado nos concretos referência, demonstra a sua potencialidade para aumento de resistência, sendo destaque até mesmo nas idades iniciais, recomendado assim, mais estudos acerca da interferência em agregados reciclados. Salienta-se que o cimento CP V – ARI utilizado contribuiu para a melhoria na resistência dos concretos produzidos.

Vale destacar que um aspecto negativo da produção desse concreto com agregado reciclado graúdo misto foi o alto consumo de cimento. Necessita-se de pesquisas voltadas para a otimização e redução da proporção cimento/agregado, de maneira a contribuir com um desenvolvimento sustentável.

Conforme os resultados expostos, destaca-se que a substituição do agregado natural por agregado reciclado é uma aplicação promissora e que necessita de mais estudos voltados à porcentagem de substituição para que possa avançar em melhorias. Apesar da pré-saturação não interferir em grandes proporções na resistência à compressão, quando avaliado o concreto e sua pré-molhagem para o estado fresco, ele interfere diretamente na trabalhabilidade e fluidez. Devido a isso, recomenda-se o uso de pré-molhagem com quantidade de água equivalente ao valor de 100% da absorção do agregado reciclado usado.

### **6.1 Sugestões para trabalho futuros**

Como sugestões para futuras pesquisas, lista-se:

- Analisar a influência do metacaulim no concreto com agregado reciclado misto;
- Diminuição do consumo de cimento na produção de concretos estruturais com ARM;
- Uso de agregado miúdo reciclado misto em concretos estruturais.

## REFERÊNCIAS

ANGULO, S.C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento mecânico de concretos**. São Paulo, 2005. 167 p.

ANGULO, S.C.; FIGUEIREDO, A.D. **Concreto com agregados reciclados**. In: Concreto: Ciência e tecnologia. 2. Ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto. IBRACON, p. 1731-1767, jan. 2011. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/293811678\\_CONCRETO\\_COM\\_AGRREGADOS\\_RECICLADOS](https://www.researchgate.net/publication/293811678_CONCRETO_COM_AGRREGADOS_RECICLADOS)>. Acesso em: 14 set. 2023.

ANGULO, S.C.; JOHN, V. M. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil, Brasil, v. 1, n. 1, o. 22-32, 2004.

ANGULO, S.C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. São Paulo, 2000. 155p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

AQUINO, L. A. B. *et. al.* **Reaproveitamento Sustentável de Resíduos de Concreto: Alternativas para Agregados Graúdos na Construção Civil**. Minas Gerais: 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. (2022) **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022**. São Paulo: ABRELPE.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE – ABREMA. (2023) **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023**. Brasil: ABREMA.

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

\_\_\_\_\_ **NBR 15114:** Resíduos sólidos da construção civil - Áreas de reciclagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_ **NBR 15115:** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004.

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

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

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

\_\_\_\_\_ **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 — Ensaio 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.

BALLISTA, L. P. Z.; MACHADO, E. F.; **Concreto com agregado reciclado modificado com latéx estireno-butadieno. Determinação da condição ótima de cura.** In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 29., 2000, Punta del Este, Uruguai.

BARRA, M. **Dosagem de concretos com agregados reciclados: aspectos particulares.** In: Reciclagem na Construção Civil, Alternativa Econômica para Proteção Ambiental, 1997, São Paulo. PCC-USP, 1997

BARRA, M. **Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón armado.** 1996. 223p. Tese (Doutorado). Universitat Politècnica de la Catalunya. Barcelona, 1996.

BAUER. R. J. F.; CURTI, R.; MARTINS, A.; TAKASHIMA, S. **Estudo de característica física e mecânica do concreto pelo efeito de vários tipos de cura.** Salvador, 1999. In: REIBRAC, 41, ago 1999.

BRASIL. **Resolução Conama nº 307, de 5 de julho de 2002.** CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Diário Oficial da União, Brasília, n. 136, p. 95-96, 17 jul. 2002.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos – Planares** [recursos eletrônico] / coordenação de André Luiz Felisberto França ... [et. Al.]. – Brasília, DF: MMA, 2022.

BUTTLER. A. M. (2003). **Concreto com Agregados Graúdos Reciclados de Concreto - Influência da Idade de Reciclagem nas Propriedades dos Agregados e Concretos Reciclados.** São Carlos, 2003. 199p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

CABRAL, A.E.B.; SCHALCH, V.; DAL MOLIN, D.C.C.; RIBEIRO, J.L.D. **Modelagem da resistência à compressão de concretos produzidos com agregados reciclados de RCD.** Minerva. v. 4 (1), p. 75-84, 2007.

CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. **Teoria e prática do tratamento de minérios: britagem, peneiramento e moagem.** São Paulo: Signus, 2012.

DEVENNY, A. KHALAF, F. M. **The use of crushed brick as coarse aggregate in concrete.** Mansory International, v. 12, n. 3, p. 81-84, 1999.

ETXEBERRIA, M. et al. **Influence of Amount of Recycled Coarse Aggregates and Production Process and Properties of Recycled Aggregate Concrete.** Cement and Concrete Research, v. 37, n. 5, p. 735-742, 2007

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

GUIMARÃES, A. T. C. **Propriedades do concreto fresco.** In: ISAIA, Geraldo Cechella. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: Ibracon, 2005. 2v.

KIBERT, C. J.; SENDZIMIR, J.; GUY, G. B. **Construction ecology and metabolism**. In: CIB SYMPOSIUM IN CONSTRUCTION AND ENVIRONMENT: THEORY INTO PRACTICE, 2000, São Paulo, Brazil. Proceedings... [CD-ROM]. São Paulo: CIB, 2000. 8p.

LEAL, C.E.F.; MEDEIROS, W.A.; MAEBARA, A.K., et al. **Influência do tipo de agregado na resistência e deformabilidade de blocos estruturais produzidos com concreto seco: estudo numérico, experimental e estatístico**. Revista Matéria, v.27, n.3, 2022

LEITE, M. B. **Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição**. 2001. 270 f. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. Escola Politécnica. 2001. 208p. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001

LEVY, S. M. **Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos**. São Paulo 1997. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo PCC/USP.

LIMA, J. A. R. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos**. 1999. 240 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

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.

MATIAS, D.; BRITO, J.; ROSA, A. PEDRO, D. **Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates – Influence of the use of superplasticizers**. Construction and Building Materials, v. 44, p. 101-109, 2013.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo:PINI, 1994. 573p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

OLIVEIRA, T. M. **Análise estatística da resistência à compressão e módulo de elasticidade de concretos com agregados de resíduos**. São Carlos, 2021.

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.

PIETERSEN, H. S.; FRAAY, A. L. A. **Performance of concrete with recycled aggregates.** In: MATERIALS AND TECHNOLOGIES FOR SUSTAINABLE CONSTRUCTION - CIB WORLD BUILDING CONGRESS, 1998, Gävle, Sweden. Proceedings... Gävle: Kickan Fahlsted, KTH, 1998. Symposium A., p. 425-434.

QUEBAUD, M.R.; BUYLE-BODIN, F. **A reciclagem de materiais de demolição: utilização dos agregados reciclados no concreto.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO(CBC), 5. São Paulo, 1999. Anais. São Paulo, 1999. 14p.

RELATÓRIO parcial de ensaios com agregados reciclados primários limpos miúdo (ARPLM) e graúdo (ARPLG) de resíduos de demolição. **Relatório de pesquisa.** LEMA/UFAL. Maceió, 2023a.

RELATÓRIO de ensaios com agregados reciclados secundários miúdo e graúdo provenientes de resíduos de demolição. **Relatório de pesquisa.** LEMA/UFAL. Maceió, 2023b.

SCOTT HOOD, R. S. **Análise da Viabilidade Técnica da Utilização de Resíduos de Construção e Demolição como Agregado Miúdo Reciclado na Confecção de Blocos de Concreto para Pavimentação.** - UFRGS. Porto Alegre, 2006.

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.

SRI, A. M., CHANDRAMOULI, K., HYMAVATHI, G., CHAITANYA, J. S. N., TEJA, B. S. N. **Strength studies on concrete with recycled aggregates and cement with metakaolin.** International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology, p. 549–552, 2022.

TEIXEIRA, E. C.; MEDEIROS, C. M.; PATRIOTA, A. L. S.; PADILHA JUNIOR, M. A. **Estudo de concretos preparados com rcd e metacaulim.** Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 6, n. 8, p. 63407-63414, ago./2020.

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.

VIEGAS, M. E. F. S.; SANTOS, C. J. S. **Cidade, capitalismo e sofrimento.** In: III SIMPÓSIO NACIONAL DE GESTÃO E ENGENHARIA URBANA:

SINGEURB, 2021, Maceió. Anais...Porto Alegre: ANTAC, 2021.p. 61-66.  
Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/singeurb/issue/view/14>

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.

YABA, K. H., NAJI, H. S., YOUNIS, K. H., IBRAHIM, T. K. Compressive and flexural strengths of recycled aggregate concrete: Effect of different contents of metakaolin. **Materials Today: Proceedings**, v. 45, 2021, Pages 4719-4723, disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.164>.