

UFPA

PPGEC

Universidade Federal do Pará



Alan Moraes de Araújo

Estudo do Comportamento Comparativo de Matrizes Cimentícias com Agregados Reciclados Carbonatados e Sílica Ativa

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Defesa orientada pelo Professor Marcelo de Souza Picanço

Belém – Pará – Brasil

2024

Universidade Federal do Pará
Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil



Alan Moraes de Araújo

**Estudo do Comportamento Comparativo de
Matrizes Cimentícias com Agregados
Reciclados Carbonatados e Sílica Ativa**

Dissertação de Mestrado

Defesa apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para
obtenção do Título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço

Belém – Pará – Brasil

2024

Universidade Federal do Pará
Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil



Alan Moraes de Araújo

**Estudo do Comportamento Comparativo de Matrizes
Cimentícias com Agregados Reciclados
Carbonatados e Sílica Ativa**

Defesa apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre.

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço

Orientador

Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil–UFPA

Profa. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro

Examinadora Interna

Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil–UFPA

Prof. Dr. Adelson Bezerra de Medeiros

Examinador Externo

Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil–UFPA

Prof. Dr. Mateus Antônio Nogueira Oliveira

Examinador Externo

Departamento de Engenharia Civil–UFMG

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)**

D278e de Araújo, Alan Moraes.
Estudo do comportamento comparativo de matrizes
cimentícias com agregados reciclados carbonatados e sílica
ativa / Alan Moraes de Araújo. — 2024.
LXX, 70 f. : il.

Orientador(a): Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, Belém, 2024.

1. Agregado reciclado. 2. Carbonatação. 3. Sílica
Ativa. 4. Sustentabilidade. 5. Construção civil. I. Título.

CDD 624

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DE UMA MATRIZ CIMENTÍCIA COM AGREGAÇÃO MIÚDO DE CONCRETO RECICLADO CARBONATADO ADICIONADO DE SÍLICA ATIVA

AUTOR:

ALAN MORAES DE ARAÚJO

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA
EXAMINADORA APROVADA PELO
COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO PARÁ, COMO REQUISITO PARA
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA CIVIL NA ÁREA DE
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO EM: 26 / 11 / 2024.

BANCA EXAMINADORA:

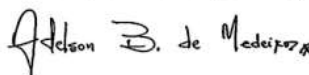


Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Orientador (UFPA)



Documento assinado digitalmente
MATEUS ANTONIO NOGUEIRA OLIVEIRA
Data: 07/01/2025 08:30:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Mateus Antônio Nogueira Oliveira
Membro Externo (UFMG)



Prof. Dr. Adelson Bezerra de Medeiros
Membro Externo (UFPA)



Documento assinado digitalmente
LUCIANA DE NAZARE PINHEIRO CORDEIRO
Data: 21/12/2024 16:02:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro
Membro Interno (UFPA)

Visto:



Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira
Coordenador do PPGE / ITEC / UFPA

*Dedico este trabalho a minha querida esposa
Nathália Jolly Araújo Soares*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela minha vida, por ter me guiado até aqui com saúde e poder estar realizando essa conquista.

E queria dizer que estou aqui, sim, pela minha própria vontade de atravessar a linha de chegada mesmo depois de longos anos tortuosos com influência da pandemia, com vários altos e baixos, porém eu não estaria aqui se não fossem algumas pessoas.

A minha esposa Nathália, que foi a minha maior incentivadora e apoiadora durante esses anos, me motivando sempre a seguir em frente, principalmente nos momentos difíceis, sem ela eu não estaria escrevendo este texto agora.

A minha mãe Mônica, meus irmãos Renan e José Flávio, ao Thiago, que me apoiaram a vida toda, me incentivando a estudar, onde me levou a estar obtendo agora o título de mestre.

Queria agradecer aos meus amigos que me apoiaram durante essa caminhada em especial ao Courtney, que me ajudou e sempre me deu forças pra continuar.

Ian e Lissandro que durante o percurso de escrita, paralelamente em outras atividades de trabalho ou não, indiretamente me ajudaram pela companhia e amizade. Albertini que além da amizade me passou grandes lições sobre persistência e não desistir.

Queria agradecer ao Maurilio, que me coorientou durante todo o processo, me ajudando com não somente um tema, mas também mudando quando foi necessário e começando tudo do zero, fazendo eu não desistir em uma hora em que eu já havia desistido.

Ao professor Marcelo e Sanny por toda a paciência e empatia durante todo esse percurso.

As professoras Isaura e Luciana, no qual tenho muito apreço e que fizeram parte da minha banca de TCC, dando luz ao caminho que a minha dissertação deveria seguir.

RESUMO

ARAÚJO, A. M. Estudo da composição física e mecânica de uma matriz cimentícia com agregado miúdo de concreto reciclado carbonatado adicionado de sílica ativa. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará. Belém, 2024.

Este trabalho investiga as propriedades físicas e mecânicas de uma matriz cimentícia composta por agregado miúdo de concreto reciclado (AMCR) carbonatado, com a adição de sílica ativa. A crescente demanda por soluções sustentáveis na construção civil motivou o uso de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. No entanto, esses agregados apresentam limitações, como baixa densidade e maior porosidade, reduzindo sua aplicabilidade em funções estruturais. A carbonatação foi aplicada para melhorar as características da argamassa antiga aderida ao agregado reciclado, reduzindo a porosidade e aumentando a resistência do material. Além disso, a sílica ativa, reconhecida por suas propriedades pozolânicas, foi adicionada em proporções de 10%, 15% e 20%, para otimizar o desempenho da matriz cimentícia. As amostras foram testadas quanto à resistência à compressão, flexão, módulo de elasticidade, absorção de água, densidade e índice de vazios, sendo comparadas com matrizes de agregado natural, de concreto reciclado não carbonatado, carbonatado e também adicionado com os terrores de sílica ativa. Os resultados mostraram que a combinação de carbonatação e sílica ativa melhorou significativamente as propriedades mecânicas e de durabilidade da matriz, aproximando o desempenho do agregado reciclado ao do agregado natural. Este estudo confirma o potencial da carbonatação acelerada, combinada com materiais pozolânicos, como uma alternativa para o reaproveitamento de resíduos na construção civil, se seguir bons parâmetros de controle e qualidade.

Palavras-chave: Agregado reciclado, Carbonatação, Sílica ativa, Sustentabilidade, Construção civil.

ABSTRACT

ARAÚJO, A. M. Study of the physical and mechanical composition of a cementitious matrix with carbonated fine recycled concrete aggregate and silica fume addition. Master's Dissertation. Graduate Program in Civil Engineering. Federal University of Pará. Belém, 2024.

This work investigates the physical and mechanical properties of a cementitious matrix composed of carbonated fine recycled concrete aggregate (CFRA) with the addition of silica fume. The increasing demand for sustainable solutions in civil construction has driven the use of recycled aggregates from construction and demolition waste. However, these aggregates present limitations such as low density and higher porosity, reducing their applicability in structural functions. Carbonation was applied to improve the characteristics of the old adhered mortar in the recycled aggregate, reducing porosity and increasing the material's strength. Additionally, silica fume, known for its pozzolanic properties, was added in proportions of 10%, 15%, and 20% to optimize the matrix's performance. The samples were tested for compressive strength, flexural strength, modulus of elasticity, water absorption, density, and void index, and compared with natural aggregate matrices, non-carbonated recycled concrete, carbonated concrete, and those with silica fume additions. The results showed that the combination of carbonation and silica fume significantly improved the mechanical properties and durability of the matrix, bringing the performance of recycled aggregate closer to that of natural aggregate. This study confirms the potential of accelerated carbonation, combined with pozzolanic materials, as an alternative for reusing construction waste, provided that good control and quality parameters are followed.

Keywords: Recycled aggregate, Carbonation, Silica fume, Sustainability, Civil construction.

Sumário

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 OBJETIVOS.....	21
1.1.1 Objetivo geral.....	21
1.1.2 Objetivos específicos.....	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 COMPOSIÇÃO DO AGREGADO RECICLADO.....	22
2.2 INFLUÊNCIA DO TAMANHO DO ACR E TEOR DE ARGAMASSA ANTIGA ADERIDA.....	23
2.3.OS MÉTODOS DE TRATAMENTO DO AGREGADO DE CONCRETO RECICLADO	24
2.4 EFEITOS DA CARBONATAÇÃO NAS PROPRIEDADES DA ARGAMASSA DO AGREGADO DE CONCRETO RECICLADO	31
2.5 FATORES QUE INFLUENCIAM A EFICIÊNCIA DA CARBONATAÇÃO EM ACRS.....	34
2.6 CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS DO ACR APÓS A CARBONATAÇÃO.....	36
2.7 MECANISMO DE INTERAÇÃO ENTRE A SILICA ATIVA E O CIMENTO...	38
2.7.1 INTERAÇÃO ENTRE A SILICA ATIVA E O ACR.....	39
3. MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1 PRODUÇÃO DO AGREGADO CONCRETO RECICLADO CARBONATADO.....	47
3.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA TOTAL DO ACR	41
3.3 PRODUÇÃO E DISPONIBILIDADE DA SÍLICA ATIVA.....	41

3.4 PREPARO DAS MATRIZES DE CIMENTO.....	47
3.5 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS PARA AVALIAR OS EFEITOS NAS PROPRIEDADES MECÂNCIAS DAS DIFERENTES MATRIZES CIMENTÍCIAS.....	49
3.6 ANÁLISE DOS DADOS.....	50
4. RESULTADOS.....	51
4.1 Resistência a compressão.....	51
4.2 Resistência a Flexão.....	53
4.3 Módulo de Elasticidade.....	55
4.4 Absorção de água	57
4.5. Índice de Vazios	59
4.6. Densidade	61
5. CONCLUSÃO	63
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67

Lista de Figuras

Figura 1 – Exemplo de ACR e as zonas de transição.

Figura 2 – Microestrutura da superfície do ACR.

Figura 3 – Fortalecimento da zona de transição pós carbonatação do ACR.

Figura 4. ZTI Antiga e ZTI nova

Figura 5. ZTI nova, entre argamassa nova e antiga do concreto com ARC

Figura 6 – Microestrutura do ACR após adição de sílica ativa.

Figura 7. Fluxograma das etapas de concepção dos agregados reciclados.

Figura 8. Processo de produção do agregado concreto reciclado.

Figura 9. Curva granulométrica do agregado miúdo reciclado de concreto

Figura 10. Processo de carbonatação do agregado concreto reciclado.

Figura 11. Difrátograma do agregado miúdo reciclado de concreto antes e depois do processo de carbonatação.

Figura 12. Processo de determinação da absorção do ACR.

Figura 13. Processo de mistura das Amostras.

Figura 14. Gráfico de média das resistências a compressão das amostras com o desvio padrão.

Figura 15. Gráfico comparativo das amostras, com as resistências a compressão média, e os grupos que cada uma participa, em ordem decrescente.

Figura 16. Gráfico comparativo das amostras, com as resistências a compressão média, e os grupos que cada uma participa, em ordem decrescente.

Figura 17. Gráfico de média das resistências a compressão das amostras com o desvio padrão.

Figura 18. Gráfico comparativo das amostras, com as resistências a flexão média, e os grupos que cada uma participa, em ordem decrescente.

Figura 19. Gráfico de média dos módulos de elasticidade das amostras com o desvio padrão.

Figura 20. Gráfico comparativo das amostras, com módulos de elasticidade médios, e os grupos que cada uma participa, em ordem decrescente.

Figura 21. Gráfico de absorção de água capilar média das amostras com o desvio padrão.

Figura 22: Gráfico comparativo das amostras, com absorção de água capilar média, e os grupos que cada uma participa, em ordem decrescente.

Figura 23. Gráfico de índice de vazios médios das amostras com o desvio padrão.

Figura 24. Gráfico comparativo das amostras, com índice de vazios médios, e os grupos que cada uma participa, em ordem decrescente.

Figura 25. Gráfico de densidade média das amostras com o desvio padrão.

Figura 26. Gráfico comparativo das amostras, com densidade média e os grupos que cada uma participa, em ordem decrescente.

Figura 26. Gráfico comparativo de Dispersão entre a resistência a compressão e a densidade aparente

Figura 27. Gráfico comparativo de Dispersão entre a resistência a compressão e o módulo de elasticidade

Figura 28. Gráfico comparativo de Dispersão entre o índice de vazios e densidade aparente

Figura 29. Gráfico comparativo de Dispersão entre a absorção de água e densidade aparente.

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Características dos modelos de tratamento de RA.

Tabela 2. Consumo dos materiais utilizados na produção das Amostras.

Lista de Abreviações

AMCRC – Agregado Miúdo de Concreto Reciclado Carbonatado

AMCRNC - Agregado Miúdo de Concreto Reciclado Não Carbonatado

AN – Agregado Natural

ACR – Agregado de Concreto Reciclado

AMCRC10SA – Agregado Miúdo de Concreto Reciclado Carbonatado com 10% de adição de Sílica Ativa

AMCRC15SA - Agregado Miúdo de Concreto Reciclado Carbonatado com 15% de adição de Sílica Ativa

AMCRC20SA – Agregado Miúdo de Concreto Reciclado Carbonatado com 20% de adição de Sílica Ativa

AR – Agregado Reciclado

1. INTRODUÇÃO

A carbonatação e a sílica ativa quando aplicados como método de tratamento de aprimoramento em agregado de concreto reciclado (ACR), expectativas são criadas quanto a melhora das propriedades mecânicas e de durabilidade de sua respectiva matriz cimentícia, quando comparada com outras composições que se estima uma melhora, como as não tratadas e somente com agregados naturais. E por essa possibilidade de otimização, ser de viés sustentável, algumas questões foram levantadas para serem compreendidas e respondidas de acordo com o presente estudo.

Diante disso, desde o entendimento da composição do ACR, até análises dos produtos de hidratação, são levados em consideração, quais seus pontos fracos, qual a química que envolve a penetração do CO_2 neste tipo de agregado e buscar entender no que isto resulta, assim como o impacto da adição da sílica ativa neste material carbonatado, para assim fechar um ciclo lógico de pensamento, que se interligue com os resultados encontrados

Portanto, não é de hoje que o crescimento da urbanização, a construção de edifícios tem aumentado consideravelmente, gerando grandes quantidades de resíduos de obras civis. Diante disso, a demanda por agregados naturais utilizados como componentes de construção tem aumentado significativamente, onde a extração desses materiais causa danos ambientais graves. Por isso, a busca por alternativas sustentáveis para esta situação é cada vez mais necessária (LIANG et al., 2020).

Na busca por essas soluções, os agregados de concreto reciclado (ACR), surgem como uma proposta alternativa, por serem oriundos de resíduos da construção e demolição, porém, com algumas considerações, que podem afetar suas propriedades, como suas zonas de transição interfaciais adicionais, local onde está sua fragilidade, devido a serem compostos de agregados naturais (AN) e antiga mistura de cimento aderida. (Wang et al., 2017)

Essa argamassa antiga aderida acaba proporcionando uma menor densidade, maior porosidade, absorção de água e menor resistência à abrasão do que uma

matriz cimentícia com somente AN. Devido a essas características, o uso de agregados reciclados geralmente é limitado a pavimentos rodoviários e concreto não estrutural (SILVA et al., 2019).

Entendendo então as características dos agregados reciclados e sua composição, existem dois principais métodos de tratamento nesta área que se destacam, sendo eles no aprimoramento ou na remoção da antiga mistura de cimento aderida, a fim de otimizar seu desempenho para aplicações estruturais.

Por isso, diversas abordagens têm sido estudadas, incluindo métodos mecânicos para remover a argamassa de cimento antiga e aprimorar a qualidade dos agregados reciclados, assim como técnicas de incorporação de aditivos e materiais pozzolânicos, para aprimorar as propriedades físicas e mecânicas do material aderido (SIDDIQUE, 2011).

Diante disso, um aspecto importante a ser considerado neste contexto é um método de aprimoramento baseado na captura de CO₂, visto que o setor da construção é responsável por uma parcela significativa das emissões globais de dióxido de carbono. Este tratamento, pode contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa e, conseqüentemente, para a sustentabilidade do setor (Gartner, 2004; Wang et al., 2017).

A carbonatação, um fenômeno natural que ocorre ao longo do tempo em materiais de concreto, pode ser explorada como um método de tratamento de forma acelerada nos ACR's para melhorar antiga mistura de cimento aderida, uma vez que a reação de carbonatação pode diminuir a porosidade e aumentar a densidade do material aderido (KOU; POON, 2012).

Autores como Xuan et al. (2016) e Gholizadeh-Vayghan et al. (2020) realizaram estudos sobre o uso da carbonatação para melhorar as propriedades dos agregados reciclados de concreto. Em um dos estudos, Xuan et al. (2016) aplicaram a técnica de carbonatação em agregados reciclados de concreto e verificaram uma melhoria significativa na resistência à compressão e módulo de elasticidade dos agregados carbonatados em comparação com os agregados não tratados. Já em outro estudo, Gholizadeh-Vayghan et al. (2020) utilizaram a técnica de carbonatação em agregados de concreto reciclado misturados com

diferentes teores de cinzas volantes, e observaram uma melhora significativa na resistência mecânica e durabilidade dos agregados carbonatados.

Levando tudo o que já foi comentado em consideração e buscando algo a mais, que diferencie este estudo, como opção promissora para atuar em conjunto com a carbonatação no aprimoramento da antiga mistura de cimento aderida aos agregados reciclados, pode ser o uso da sílica ativa, uma adição suplementar amplamente utilizada em pesquisas devido às suas propriedades únicas. Porosa, altamente reativa e composta principalmente de dióxido de silício amorfo (SiO_2), com elevada finura, grande superfície específica e excelente estabilidade térmica, é popular para aplicações como adição, que promovem satisfatória resistência mecânica, baixa porosidade e alta resistência à corrosão (Abdalla; Otieno, 2022).

Neste estudo então, investigamos o desempenho de uma matriz cimentícia com agregados miúdos de concreto reciclado que foram carbonatados em uma câmara de carbonatação de forma acelerada e controlada, tendo posteriormente, a sílica ativa adicionada na etapa da mistura, como uma adição. A pesquisa se concentra na análise das propriedades físicas e mecânicas da matriz cimentícia em relação as amostras produzidas e ensaiadas, para realizar a comparação dos resultados entre si e principalmente confrontando os dados das matrizes com, 100% de agregados naturais (AN) e com agregado miúdo concreto reciclado não carbonatado (AMCRNC). E por fim ser utilizada como objeto de estudo científico, de análise bruta dos dados, sem uma função específica de uso tecnológico no momento, para expandir o entendimento acerca da viabilidade e aplicabilidade dessas matrizes. Assim, este trabalho contribui como base inicial, fomentando estudos que explorem as possibilidades de utilização de agregados reciclados tratados na construção civil de maneira sustentável e eficaz."

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

- Investigar as propriedades físicas e mecânicas de uma matriz cimentícia com agregado miúdo de concreto reciclado carbonatado, adicionada de sílica ativa, estimando que se obtenha resultados positivos perante aos dados analisados comparados com outras matrizes, de viés científico, visando uma proposta sustentável.

1.1.2 Objetivo Específico

Analisar e comparar os resultados das seguintes amostras:

- Matriz cimentícia com AN – Agregado Natural;
- Matriz cimentícia com AMCR - Agregado miúdo de concreto reciclado;
- Matriz cimentícia com AMCRC - Agregado miúdo de concreto reciclado carbonatado;
- Matriz cimentícia com AMCRC10SA – Adição de 10% de Sílica Ativa;
- Matriz cimentícia com AMCRC15SA – Adição de 15% de Sílica Ativa;
- Matriz cimentícia com AMCRCSA – Adição de 20% de Sílica Ativa;

Avaliar o impacto da carbonatação e da adição de sílica ativa nas seguintes propriedades: resistência à compressão, porosidade, densidade, absorção de água e durabilidade das matrizes cimentícias. Busca-se verificar se as matrizes tratadas apresentam desempenho superior às matrizes não tratadas e se seus resultados se aproximam ou superam as propriedades observadas na matriz com agregado natural.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 COMPOSIÇÃO DO AGREGADO RECICLADO

Um agregado reciclado (AR) é composto principalmente por partículas derivadas de resíduos de construção, incluindo concreto, argamassa, tijolos, cerâmicas, blocos, entre outros materiais (LEVY et al., 2012). Além desses componentes, também podem estar presentes impurezas como madeira, plásticos e metais em menor proporção. Em termos de composição mineralógica, os agregados reciclados contêm uma mistura de diferentes minerais, como quartzo, feldspatos e argilominerais, que variam de acordo com as matérias-primas usadas na construção original (RODRIGUES et al., 2013). Esses agregados apresentam variações significativas em suas propriedades físicas e químicas. Silva et al. (2014) destacam que a composição do agregado reciclado pode incluir até 60% de argamassa aderida, influenciando diretamente suas propriedades mecânicas e de durabilidade.

Devido à sua composição complexa, os ARs possuem uma zona de transição interfacial frágil, também chamada de "antiga Z.T.I.", onde a mistura de cimento aderida interage com o agregado natural original do AR e a nova matriz cimentícia. Este é o ponto de maior fragilidade do material, apresentando altos índices de vazios (BAZAZ; KHAYATI, 2016).



Figura 1: Exemplo de ACR e as zonas de transição. (Zhang et al. 2015).

Conhecer a origem dos agregados reciclados é crucial para garantir a qualidade, consistência e adequação do material para aplicações na construção civil (RODRIGUES et al., 2013). A origem dos agregados reciclados influencia diretamente sua composição e propriedades, como a granulometria, a presença

de impurezas e a natureza da antiga argamassa de cimento aderida (LEVY et al., 2012).

O processo de trituração e peneiramento é essencial para obter agregados reciclados de qualidade. Durante a trituração, os resíduos de construção civil são transformados em fragmentos menores e mais homogêneos, facilitando sua utilização em novas misturas de concreto (TRIVEDI et al., 2023). O peneiramento classifica esses fragmentos por tamanho, permitindo a escolha do agregado reciclado mais adequado para cada aplicação. Geralmente, os ARs têm uma granulometria mais irregular do que os agregados naturais, o que pode afetar a quantidade de cimento necessária para atingir a mesma resistência do concreto ou argamassa (PALLAPOTHU et al., 2024).

Os resíduos de construção e demolição variam significativamente em composição, originados de diversas fontes como demolições de edifícios, reformas e novos projetos de construção. Esses materiais são processados em plantas de reciclagem onde são triturados e separados, mas a qualidade do processo pode variar, resultando em agregados com diferentes propriedades físicas e químicas. A heterogeneidade na composição dos agregados reciclados, que pode incluir concreto, argamassa, tijolos, cerâmicas e outros materiais, influencia diretamente a densidade e qualidade dos ARs. Diferentes porções de materiais apresentam variações em propriedades como absorção de água, resistência à compressão e durabilidade (ZHANG; WANG, 2019). Essas variações podem impactar negativamente a consistência e o desempenho dos concretos produzidos com esses agregados, tornando essencial a caracterização detalhada e o rigoroso controle de qualidade durante o processo de reciclagem e utilização dos ARs.

2.2 INFLUÊNCIA DO TAMANHO DO ACR E TEOR DE ARGAMASSA ANTIGA ADERIDA

De acordo com os resultados experimentais de Sánchez de Juan e Alaejos Gutiérrez (2009), a fração de 4/8 mm do agregado possui um teor de material cimentício antigo aderido de 33% a 55%, enquanto a fração de 8/16 mm varia de 23% a 44%. Na literatura, encontra-se uma variação geral entre 25% a 64%, considerando o intervalo geral de ambos os tamanhos citados acima. Duan e

Poon (2014) observaram que agregados com menos de 10 mm de diâmetro apresentavam uma quantidade de argamassa aderida superior a 50%, impactando negativamente na resistência à compressão do concreto produzido com esses agregados.

Existem diferentes métodos de ensaio para determinar o teor de argamassa aderida aos agregados reciclados. Alguns desses métodos incluem o tratamento com solução de ácido clorídrico, a produção de um novo concreto e o tratamento térmico. No entanto, é importante ressaltar que os resultados do teor de argamassa podem variar dependendo do método de ensaio utilizado (Sánchez de Juan; Alaejos Gutiérrez, 2009). Sabendo disso, o tamanho do ACR tem uma influência significativa no teor de argamassa presente. Conforme observado, quanto menor o tamanho da fração, maior é o teor de argamassa aderida aos agregados reciclados. Isso ocorre porque partículas menores possuem uma área de superfície específica maior, proporcionando mais espaço para a argamassa aderir. Além disso, durante a britagem, partículas menores resultam da ruptura da argamassa entre agregados maiores, mantendo mais fragmentos de argamassa (Sánchez de Juan; Alaejos Gutiérrez, 2009).

2.3 OS MÉTODOS DE TRATAMENTO DO AGREGADO DE CONCRETO RECICLADO

Os agregados de concreto reciclado (ACRs) possuem propriedades inferiores às dos agregados naturais, especialmente para aplicações estruturais, devido à presença de argamassa antiga aderida, que apresenta alta porosidade e baixa resistência. Para superar essas limitações, diversas técnicas de modificação têm sido desenvolvidas nos últimos anos, com o objetivo de melhorar o desempenho dos ACRs. Segundo Shi et al. (2016), essas técnicas podem ser agrupadas em dois métodos principais: a remoção da argamassa antiga aderida e a valorização dessa argamassa, transformando-a em uma parte funcional do agregado.

2.3.1 Remoção da argamassa antiga aderida

A remoção da argamassa antiga aderida é uma abordagem amplamente utilizada para melhorar as propriedades dos agregados reciclados. Essa técnica envolve processos que visam separar a argamassa residual do agregado

original, reduzindo sua porosidade e melhorando a compatibilidade com a matriz cimentícia. Os principais tratamentos incluem a moagem mecânica (SHABAN et al., 2019), o aquecimento tradicional (SHUI et al., 2008), o aquecimento por micro-ondas (AKBARNEZHAD et al., 2011) e a pré-imersão em solução ácida (ISMAIL; KWAN; RAMLI, 2017; TAM; TAM, 2007). Esses métodos são fundamentais para preparar os ACRs para aplicações de maior desempenho, melhorando sua resistência e durabilidade.

2.3.2 Valorização da argamassa antiga aderida

Em vez de removê-la, a valorização da argamassa antiga aderida busca aprimorar suas propriedades, tornando-a uma parte integrada e funcional do agregado reciclado. Para isso, são utilizados tratamentos que densificam a matriz da argamassa e fortalecem a zona de transição interfacial. Os principais métodos incluem o uso de materiais pozolânicos, como a sílica ativa (BUI; SATOMI; TAKAHASHI, 2018; KONG et al., 2010), tratamentos com polímeros (KOU; POON, 2010; SPAETH; DJERBI TEGGUER, 2013), biodeposição de carbonato de cálcio (FENG et al., 2020; WANG et al., 2017) e soluções de silicato de sódio (CHEN et al., 2017). Além disso, o método de carbonatação acelerada tem ganhado destaque como uma abordagem sustentável. (LEEMANN et al., 2023).

A remoção e a valorização da argamassa aderida são essenciais para o reaproveitamento eficiente dos agregados reciclados na construção civil. Essas técnicas aumentam a resistência e a durabilidade dos materiais, promovendo práticas mais sustentáveis ao reduzir o desperdício e incentivar a reciclagem. Métodos como a carbonatação acelerada, em conjunto com o uso de sílica ativa, têm demonstrado grande potencial para aprimorar as propriedades mecânicas e químicas dos ACRs, consolidando-se como alternativas inovadoras no campo da construção sustentável.

2.4 EFEITOS DA CARBONATAÇÃO NAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS DO AGREGADO RECICLADO.

Os principais produtos de hidratação encontrados na argamassa aderida do agregado de concreto reciclado (ACR) são o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e o

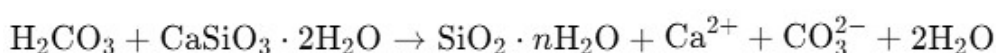
silicato de cálcio hidratado (C-S-H). A carbonatação ocorre quando o dióxido de carbono (CO_2) penetra nos poros e vazios da argamassa e interage com esses produtos de hidratação (Leemann et al., 2023).

Na carbonatação do hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), o CO_2 reage com esse composto na argamassa, formando carbonato de cálcio (CaCO_3). Esse novo material preenche os poros e vazios da argamassa, fortalecendo uma área previamente vulnerável (Lu et al., 2019).

Na carbonatação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), ocorre a descalcificação, que é a remoção dos íons de cálcio (Ca^{2+}) da estrutura do C-S-H. Esse processo inicia-se quando o dióxido de carbono (CO_2) reage com a umidade nos poros, formando ácido carbônico. O ácido dissolve o cálcio, que então se combina com íons de carbonato (CO_3^{2-}) para formar carbonato de cálcio (CaCO_3).

A perda de cálcio cria grupos Si-OH, que formam uma sílica em gel. Esse gel melhora a densidade da argamassa antiga aderida e reforça a ligação entre o agregado de concreto reciclado (ACR) e a nova matriz de cimento, fortalecendo a estrutura. Assim, a descalcificação contribui para uma argamassa mais resistente e coesa. (Lu et al., 2019). Segue abaixo as reações químicas:

Equação básica da descalcificação do C-S-H:



Equação da descalcificação do C-S-H – Carbonato de cálcio e Sílica Gel:



Zhang et al. (2015) tentaram melhorar a qualidade do ACR através da carbonatação da argamassa aderida. O ACR foi tratado em uma concentração de CO_2 de 20% sob uma pressão de 0,2 megapascal (MPa) por 7 dias. Os resultados indicaram que o tratamento de carbonatação aumentou a densidade em até 5% e diminuiu a absorção de água em até 28%. Além disso, o tratamento de carbonatação não só melhorou as novas ZTIs entre a argamassa aderida antiga e a argamassa nova, mas também melhorou as ZTIs antigas entre o agregado e a argamassa aderida antiga (Zhang et al., 2015).

Esses achados concordaram com Leemann et al. (2023), que explicaram que o tratamento de carbonatação melhorou a qualidade das ZTIs antigas e novas, alcançando uma maior microdureza e uma estrutura mais densa. A carbonatação também pode reduzir a reatividade álcali-agregado e aumentar a durabilidade do concreto. Lu et al. (2019) relataram que a carbonatação aumentou a resistência à compressão em 20% e reduziu a porosidade em 15%. Xuan et al. (2023) estudaram as propriedades de durabilidade do ACR preparado com ACR carbonatado em ambiente 100% CO₂. Os resultados indicaram que o tratamento com CO₂ teve um efeito benéfico maior nas propriedades de durabilidade do ACR, com melhoria da impermeabilidade para o concreto tratado em 15,1%, 36,4% e 42,4% para condutividade elétrica em massa, permeabilidade ao íon cloreto (Cl⁻) e permeabilidade ao gás, respectivamente.

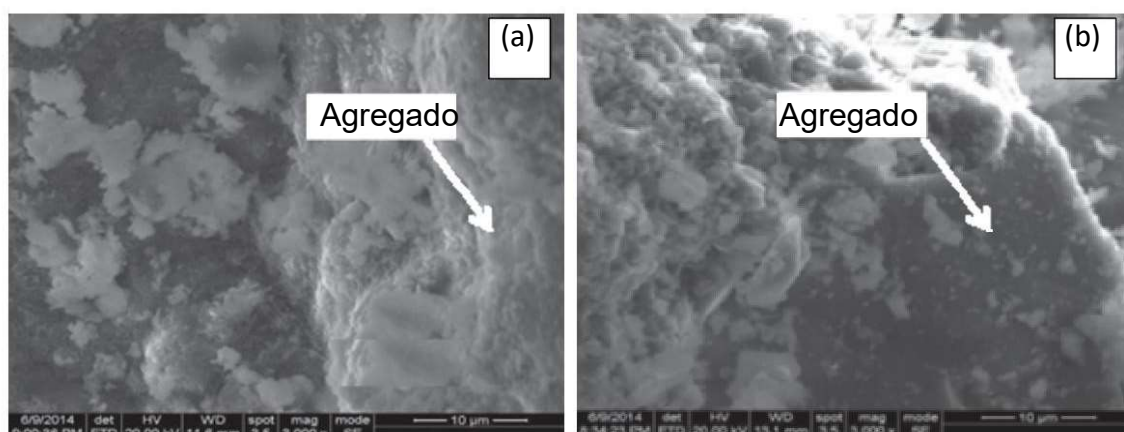


Fig. 2 Microestrutura da superfície ACR: (a) ACR não carbonatada; (b) ACR carbonatada. (Zhang et al. 2015).



Figura 3 – Fortalecimento da zona de transição pós carbonatação do AR. (Zhang et al. 2015).

Embora a carbonatação melhore as propriedades do agregado reciclado, a formação de uma capa protetora de carbonato de cálcio durante o processo pode mascarar o nível de carbonatação no núcleo do material. Esse efeito dificulta a análise completa do estado de carbonatação por métodos como a Difração de Raios X (DRX), já que a camada superficial, ao reagir com o dióxido de carbono, reduz a penetração e pode impedir a detecção de alterações internas.

De acordo com Zhang et al. (2015), a formação dessa camada superficial de carbonato de cálcio após a carbonatação dificulta a avaliação das propriedades internas do concreto reciclado, limitando a eficácia de técnicas analíticas como a DRX para identificar carbonatação completa.

O método de tratamento de aprimoramento por carbonatação em argamassas aderidas de agregado de concreto reciclado apresenta algumas dificuldades para a sua aplicação em grande escala. Um dos principais desafios é o controle da qualidade da matriz cimentícia durante a produção e o manuseio. É necessário garantir a dosagem adequada dos materiais e a umidade correta para a carbonatação, de modo a evitar a fissuração dela. Além disso, a proteção da matriz contra a exposição direta a intempéries é essencial, o que pode demandar investimentos em infraestrutura de proteção durante o método. (WANG et al., 2019).

No entanto, de acordo com os estudos citados, embora a carbonatação melhore as propriedades dos agregados reciclados em comparação com seu estado não tratado, raramente esses agregados tratados superam completamente as propriedades dos agregados naturais em todas as métricas. Vários estudos na literatura reforçam que, apesar das melhorias trazidas pela carbonatação, os agregados reciclados ainda não superam os agregados naturais em termos de desempenho global.

Zhang e Wang (2019) demonstram que, embora a carbonatação reduza a porosidade dos agregados reciclados, estes continuam a apresentar menor resistência à compressão em comparação aos agregados naturais. Da mesma forma, Silva et al. (2015) observam que a absorção de água, um indicativo crítico da durabilidade, permanece mais elevada nos agregados reciclados tratados do que nos naturais. Poon et al. (2006) apontam que, embora o tratamento por

carbonatação melhora a resistência à compressão, a aderência entre os agregados reciclados e a matriz de cimento ainda é inferior à observada nos agregados naturais. Tam e Tam (2007) corroboram esses achados, destacando que os agregados reciclados tratados não alcançam a mesma resistência à tração que os agregados naturais. Finalmente, Evangelista e de Brito (2007) evidenciam que, mesmo com a carbonatação, os agregados reciclados apresentam maior variação nas propriedades mecânicas, o que pode comprometer a confiabilidade do concreto produzido com eles em comparação ao concreto feito com agregados naturais.

2.5 FATORES QUE INFLUENCIAM A EFICIÊNCIA DA CARBONATAÇÃO EM ACRS

A eficiência da carbonatação em agregados de concreto reciclado (ACR) é influenciada por diversos fatores. A quantidade de argamassa antiga aderida, por exemplo, facilita a penetração de CO_2 , promovendo a melhoria do material (Leemann et al., 2023). O tamanho das partículas também é crucial: partículas menores apresentam maior área de superfície específica, aumentando a eficiência da carbonatação (Xuan et al., 2023; Lu et al., 2019). Já o teor de água no ACR é essencial para dissolver o CO_2 e os íons de cálcio, mas tanto a falta quanto o excesso de água podem reduzir a eficácia do processo (Lu et al., 2019).

Outro fator determinante é a concentração de CO_2 . Níveis moderados, como 10% a 20%, são mais eficientes, enquanto concentrações muito altas, como 100%, oferecem ganhos limitados (Leemann et al., 2023; Lu et al., 2019). O tempo também desempenha um papel importante, sendo que a maior parte do processo ocorre nas primeiras 24 horas, atingindo estabilidade em até 28 dias (Lu et al., 2019). Além disso, temperaturas entre 20°C e 80°C favorecem o processo, enquanto a umidade relativa ideal varia entre 40% e 80%, com melhores resultados em torno de 50% (Lu et al., 2019; Wu et al., 2022).

2.6 CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS DO ACR PÓS CARBONATAÇÃO

O agregado de concreto reciclado (ACR) adquire características fundamentais após o tratamento de carbonatação, que são importantes para avaliar a eficácia desse processo. Essas características incluem densidade aparente, absorção de

água, estrutura dos poros e as propriedades da Zona de Transição Interfacial (ZTI). Analisar essas propriedades é essencial para determinar o impacto da carbonatação na melhoria das qualidades do ACR, garantindo seu desempenho otimizado em aplicações estruturais. O preenchimento dos poros e fissuras na argamassa antiga aderida com carbonato de cálcio (CaCO_3) e gel de sílica durante a carbonatação é um dos principais mecanismos que contribuem para essas melhorias.

2.6.1 Densidade Aparente

Estudos conduzidos por Zhang (2015) indicam que o método de tratamento com CO_2 influencia positivamente a densidade aparente do ACR. Suas descobertas destacam um aumento após o tratamento com CO_2 , variando de 5,6% a 7,8%, em comparação com o estado prévio ao tratamento, o qual era apenas 1,5% a 2,6% inferior ao do agregado natural. Zhang (2015) também explorou o efeito do tamanho de partícula do ACR no aumento da densidade aparente durante o tratamento com CO_2 , observando que partículas menores, na faixa de 5-10 mm e 10-20 mm, resultaram em aumentos de 4,9% e 3,2%, respectivamente, em concretos originais que variaram a resistência entre 30 a 80 megapascal (MPa).

2.6.2 Absorção de Água

O tamanho das partículas de ACR também influenciou a absorção de água, sendo que partículas de 5-10 mm e 10-20 mm apresentaram reduções de 20,6% e 15,2%, respectivamente, após o método com CO_2 , conforme relatado por Lu et al. (2019). Resultados de Wu et al. (2022) indicaram reduções de 11,2% e 16,7% na absorção de água do ACR após o mesmo tratamento.

2.6.3 Estrutura dos Poros

Lu et al. (2019) observaram que o tratamento de carbonatação dos agregados reciclados de concreto (RCA) resultou em uma significativa densificação da estrutura dos poros. Este processo envolveu a formação de carbonato de cálcio (CaCO_3) e gel de sílica, que preenchem os poros e microfissuras dentro do agregado, levando a uma diminuição da porosidade. A redução da porosidade foi particularmente evidente nos agregados menores, de 5-10 mm, onde a

densificação foi mais acentuada, contribuindo para uma microestrutura mais compacta e uma zona de transição interfacial (ZTI) menos porosa.

2.6.4 Redução do pH pelo processo de carbonatação

O processo de carbonatação reduz o pH dos materiais cimentícios, principalmente pela descalcificação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) presente nas argamassas antigas aderidas. Durante essa reação, ocorre a liberação de íons cálcio, que reagem com o dióxido de carbono para formar carbonato de cálcio, reduzindo a alcalinidade do sistema. Essa alteração no pH é especialmente relevante em aplicações estruturais, pois pode comprometer a passivação das armaduras de aço, aumentando o risco de corrosão.

Qian et al. (2023) exploraram esses efeitos ao revisitar o impacto da carbonatação no concreto reciclado. Utilizando um método cíclico de carbonatação baseado no pH, os autores verificaram que o pH do material diminui significativamente à medida que o C-S-H é descalcificado, modificando as propriedades químicas do material e influenciando sua durabilidade.

2.6.5 Propriedades da ZTI

A zona de transição interfacial (ZTI) entre os agregados e a matriz de cimento desempenha um papel fundamental na determinação das propriedades mecânicas e da durabilidade do concreto. No caso do concreto reciclado, essa região é ainda mais crítica devido à coexistência de transições antigas e novas, o que pode resultar em áreas de fraqueza e maior porosidade. Uma ZTI fortalecida é crucial para garantir a integridade estrutural do concreto, pois ela atua como a "cola" que une os agregados à matriz de cimento. A presença de porosidades e microfissuras na ZTI pode comprometer a coesão interna, levando a uma diminuição da resistência à compressão e uma maior susceptibilidade a danos por fatores ambientais. (LEEMANN et al., 2023).

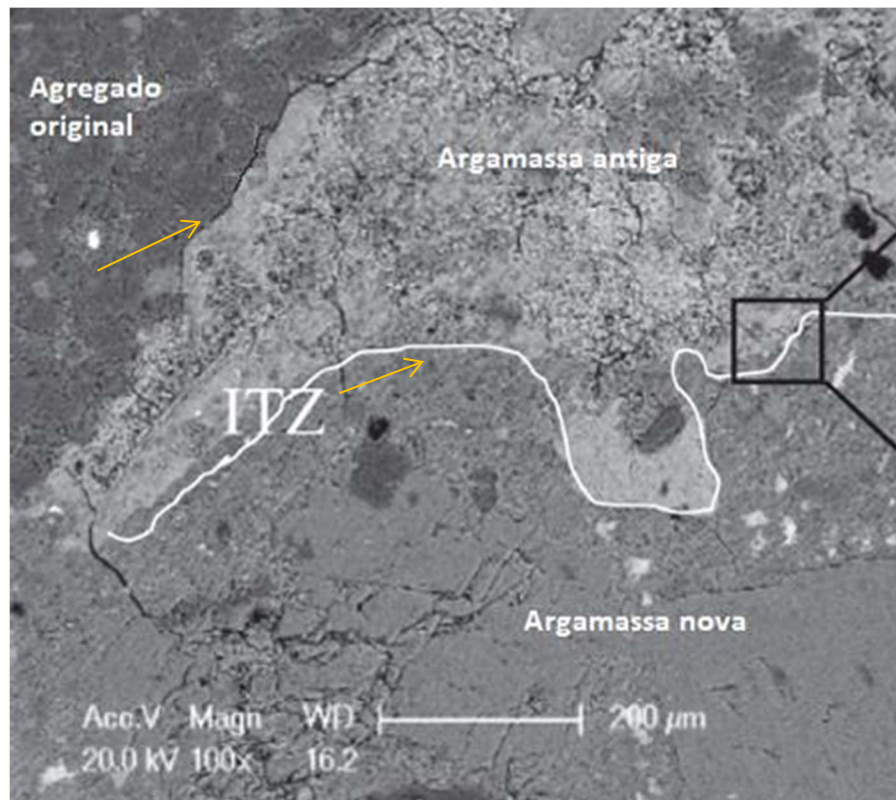


Figura 4. ZTI Antiga e ZTI nova (Wang, et al., 2019).

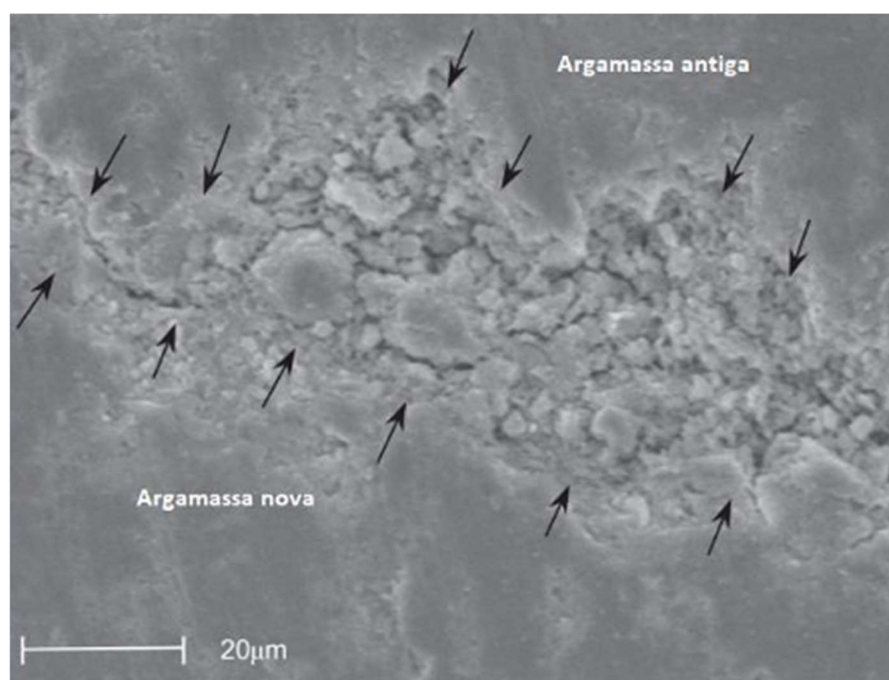


Figura 5. ZTI nova, entre argamassa nova e antiga do concreto com ARC (Wang, et al., 2019).

O processo de carbonatação é particularmente importante para fortalecer essa região vulnerável. Leemann et al. (2023) demonstram que a introdução

controlada de dióxido de carbono (CO_2) pode promover a formação de carbonato de cálcio (CaCO_3) na ZTI, preenchendo os poros e microfissuras. Esse fortalecimento da ZTI não só melhora a adesão entre os agregados reciclados e a nova matriz de cimento, mas também aumenta a resistência global do concreto. LU et al. (2019) acrescentam que uma ZTI mais densa e coesa resulta em concreto reciclado com maior durabilidade, menor permeabilidade e melhor resistência à fissuração. Portanto, o fortalecimento da ZTI é um fator chave para o desempenho a longo prazo do concreto reciclado, especialmente em aplicações estruturais exigentes.

2.7 MECANISMO DE INTERAÇÃO ENTRE A SILICA ATIVA E O CIMENTO.

Como mecanismo cimentício de interação suplementar nesse estudo, o uso da sílica ativa, vem como uma alternativa de adição a matriz cimentícia para impulsionar melhorias no ACRC, onde ela quimicamente reage com o hidróxido de cálcio promovendo uma maior produção de C-S-H que contribui mais para o ganho de resistência, além de fisicamente promover uma redução na porosidade evitando a entrada de agentes externos. (POSSAN, 2004).

A adição da sílica ativa promove uma melhor reatividade ao ser implementada por apresentar uma maior superfície de contato devido ao pequeno tamanho dos grãos. Fazendo também que com uma maior reatividade seja produzido uma maior quantidade de produtos de hidratação, como C-S-H que é responsável pelo ganho da resistência, assim também como a portlandita que terá uma maior reatividade com o CO_2 , na formação do carbonato de cálcio, que promove uma diminuição da porosidade e também contribui no ganho de resistência. (Siddique, 2011) .

Estudos indicam que existe um teor ótimo de sílica ativa que maximiza as melhorias nas propriedades mecânicas do concreto. Mazloom, Ramezaniapour e Brooks (2004) observaram que a adição de sílica ativa aumentou significativamente a resistência à compressão do concreto, proporcionando um equilíbrio ideal entre a formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e a manutenção de uma matriz cimentícia homogênea e densa.

Da mesma forma, Khan e Siddique (2011) relataram que teores mais elevados de sílica ativa podem levar à aglomeração de partículas. Quando a quantidade de sílica ativa excede o teor ótimo, as partículas finas de sílica podem se aglomerar, criando áreas localizadas de concentração excessiva de material. Essas aglomerações podem formar zonas de fraqueza na matriz cimentícia, onde a distribuição não homogênea do material cria pontos vulneráveis que podem comprometer a integridade estrutural do concreto. Além disso, a aglomeração de partículas pode aumentar a porosidade, pois os espaços intersticiais entre as partículas aglomeradas não são preenchidos de maneira eficiente, resultando em uma matriz mais porosa e, conseqüentemente, menos densa. Portanto, a adição de sílica ativa em uma quantidade bem ajustada é ideal.

2.8 INTERAÇÃO ENTRE A SILICA ATIVA E O ACR.

A adição de sílica ativa ao concreto com agregados reciclados carbonatados desempenha um papel crucial na melhoria das propriedades mecânicas e de durabilidade do material. Nos agregados reciclados, a quantidade de argamassa antiga aderida influencia significativamente o comportamento das reações primárias da sílica ativa. Quando a sílica ativa é adicionada na matriz cimentícia, ela reage inicialmente com o hidróxido de cálcio presente tanto na nova pasta de cimento quanto na argamassa antiga aderida ao agregado reciclado. Essa reação é fundamental para a formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que é o principal responsável pela resistência e durabilidade do concreto. (Mazloom; Ramezani pour; Brooks, 2004).

A reação química pode ser representada como: $\text{Ca(OH)}_2 + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{C-S-H}$. Esta reação primária ajuda a reduzir a porosidade, preenchendo os poros e microfissuras na argamassa antiga aderida, tornando o concreto mais denso e menos permeável (Mazloom; Ramezani pour; Brooks, 2004). Além disso, a formação de C-S-H aumenta a coesão entre a argamassa antiga e a nova pasta de cimento, melhorando a integridade estrutural do concreto reciclado. Essa integração resulta em um material mais robusto e durável, com maior resistência à compressão e à flexão.

Após a reação primária entre a sílica ativa (SiO_2) e o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) para formar o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), ainda pode haver uma quantidade residual de hidróxido de cálcio na matriz cimentícia. Esse hidróxido de cálcio, conhecido como "hidróxido de cálcio livre", é um subproduto da hidratação do cimento Portland. Ele não é imediatamente consumido durante a reação inicial e permanece disponível para continuar reagindo com a sílica ativa ao longo do tempo, levando à formação adicional de C-S-H ($\text{Ca(OH)}_2 + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{C-S-H}$) (Mazloom; Ramezani pour; Brooks, 2004). Essa reação secundária é essencial para a melhoria contínua das propriedades do concreto, contribuindo para a densificação da matriz e a redução da porosidade (Khan; Siddique, 2011).

Além disso, o hidróxido de cálcio residual presente nos agregados reciclados pós-carbonatação pode reagir tanto com a sílica ativa (SiO_2) quanto com o gel de sílica (SiOH_2) formado durante o processo de carbonatação. Quando esses agregados reciclados, já carbonatados, são reutilizados em novas misturas de concreto que contêm sílica ativa, a sílica ativa reage com o Ca(OH)_2 residual, formando mais silicato de cálcio hidratado (C-S-H) (Katz, 2004).

Esse ciclo de reações secundárias é fundamental porque permite a formação contínua de C-S-H, resultando em uma matriz cimentícia mais densa e menos permeável (Scrivener et al., 2018). A presença de C-S-H adicional ajuda a preencher poros e microfissuras, melhorando a resistência e a durabilidade do concreto. Além disso, a reação entre a sílica ativa e o hidróxido de cálcio livre também contribui para a redução da porosidade e o aumento da coesão entre a argamassa antiga e a nova pasta de cimento (Mazloom; Ramezani pour; Brooks, 2004).

Para exemplificar, alguns estudos trouxeram os benefícios dos tratamentos com materiais pozzolânicos, especialmente aqueles contendo sílica, são devido à presença da sílica na superfície do ACR, o que poderia melhorar a ZTIs entre o ACR e a argamassa de cimento via reação pozzolânica conforme descrito em pesquisas anteriores (Katz 2004; Tam e Tam, 2008), Tam et al. (2005) sugeriram uma abordagem de dupla mixagem (DM) em dois estágios para tratar o ACR, na qual divide o processo de mixagem em duas partes.

Durante a primeira parte da mistura, o cimento e metade da água necessária foram adicionados ao ACR. Ao fazer isso, uma fina camada de argamassa de cimento é produzida na superfície do ACR e a qualidade da argamassa aderida é melhorada. Na segunda parte, a água restante é adicionada para completar o processo de mistura do concreto. Este método aumentou a resistência à compressão de ACR em até 21% para substituição de 20% de ACR em 28 dias em comparação com a abordagem de mistura normal (MN). Tam e Tam (2008) tentaram duas alternativas de MS, uma com sílica ativa e outra com sílica ativa e cimento. Esses resultados concordam com os obtidos por Li et al. (2009) que determinaram que o revestimento da superfície com materiais pozzolânicos (sílica ativa, cinzas volantes e escória) modificou a superfície do ACR e melhorou as propriedades do concreto resultante.

A Fig. 5 apresenta a microestrutura do ACR antes e depois do tratamento com materiais pozzolânicos, mostrando que o tratamento adotado torna a argamassa antiga aderida mais densa, e melhora as propriedades da zona de transição.

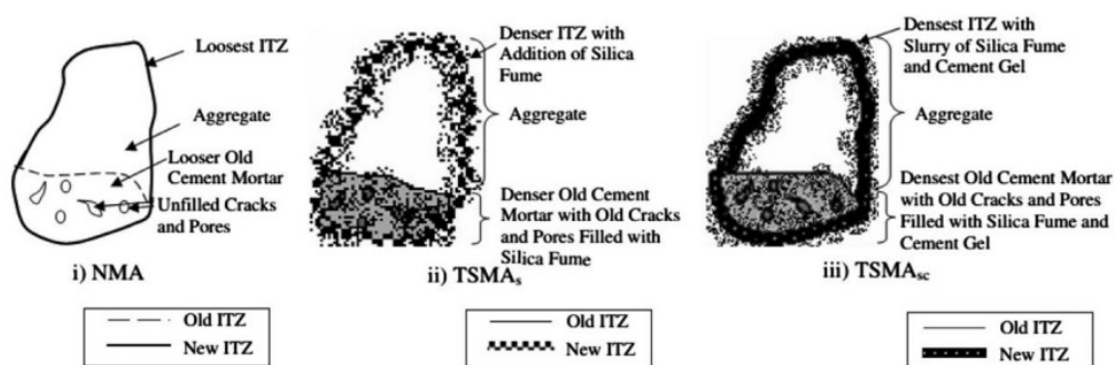


Figura 6 – Microestrutura da ACR após adoção de: (i) MN; (ii) DM com sílica ativa; (iii) MS com sílica ativa e cimento (Tam e Tam 2008).

Sabendo que a carbonatação dos agregados reciclados de concreto (ACR) fortalece as áreas mais frágeis do material e cria uma nova zona de transição interfacial (ZTI) robusta, a qual pode ser ainda mais reforçada com a adição de sílica ativa, estima-se que resultados positivos sejam alcançados em termos de resistência e durabilidade. Contudo, assim como o método de carbonatação, a incorporação de sílica ativa em grande escala em concretos com agregados

reciclados (ACRC) apresenta desafios significativos. Um dos principais obstáculos é o custo elevado da sílica ativa, que pode superar o de outros aditivos e cimentos convencionais, tornando-se um fator limitante em projetos de grande escala. Além disso, devido à sua finura e alta reatividade, a sílica ativa pode exigir equipamentos especializados e processos específicos para sua dosagem e mistura adequados com os outros componentes da argamassa (ALYASEEN et al., 2023).

3. MATERIAIS E MÉTODOS.

3.1 PRODUÇÃO DO AGREGADO DE CONCRETO RECICLADO CARBONATADO.

Para dar-se início aos materiais utilizados, algumas considerações são importantes, como é o caso do cimento escolhido de alta resistência inicial, CP V-ARI, visando uma maior velocidade de reação para obtenção dos resultados. A areia natural de rio, introduzida na amostra com agregado natural, foi de característica comum, branca e fina, comercializada na região metropolitana de Belém do Pará. As amostras em que se houve a substituição de agregado natural por AMCRC, ocorreu na proporção de 100%.

Dando andamento, agregado de concreto reciclado (ACR) foi obtido por meio da britagem de amostras de concretos com dimensões cilíndricas de 100 mm x 200 mm. Primeiramente as amostras de concretos eram ensaiadas à compressão (Figura 8), após os ensaios das amostras, estas eram armazenadas em um contêiner para sua posterior britagem, em seguida, as amostras eram britadas em um britador de mandíbulas para a produção do ACR. Após a britagem, os resíduos eram separados em agregado graúdo concreto reciclado e agregado miúdo de concreto reciclado. O critério de separação era a peneira n° 4 (abertura de 4,8 mm). O passante na peneira supracitada foi considerado como AMCR, utilizado no presente estudo. Após separação granulométrica, este era submetido em processo de secagem em estufa em uma temperatura de ~100°C. A resistência dos concretos que foram utilizados para gerar o ACR variou de 15 megapascal (MPa) a 53 megapascal (MPa). Segue abaixo a figura 8 ilustrando as etapas:

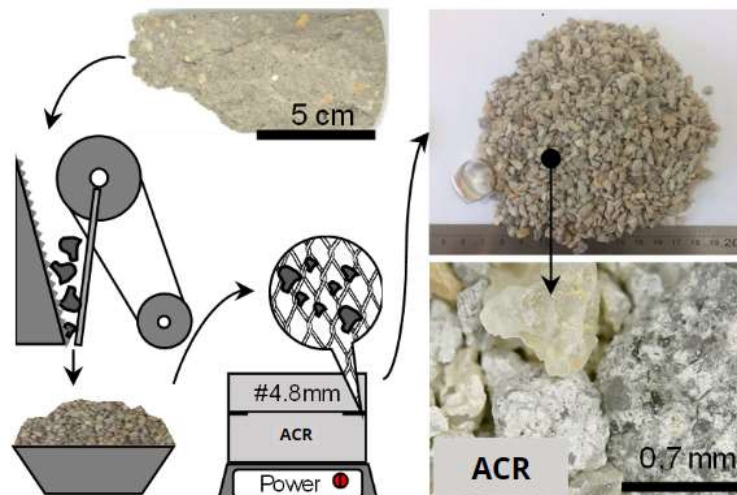


Figura 7. Processo de produção do agregado concreto reciclado.

Após o agregado de concreto reciclado passar pelo processo de trituração e peneiramento, em seguida foi caracterizado quanto sua massa específica e granulometria, os resultados mostraram que o agregado de concreto reciclado apresentou uma massa específica de $2,44 \text{ g/cm}^3$, módulo de finura de 3,25 e sua granulometria apresentou-se contínua.

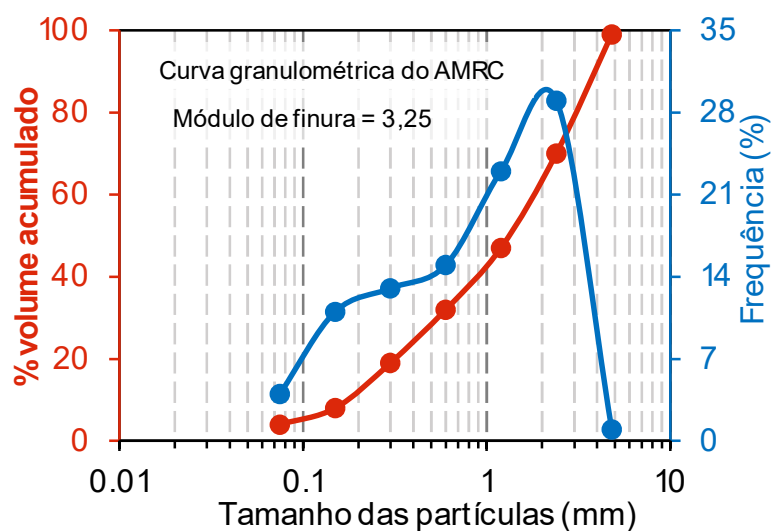


Figura 8. Curva granulométrica do agregado miúdo reciclado de concreto.

Indo então para a etapa do tratamento com carbonatação acelerada, o agregado de concreto reciclado foi condicionado em uma câmara de carbonatação do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará. As concentrações e especificações da câmara são reveladas na Figura 10. Esses

parâmetros foram determinados com base na literatura revisada em fatores que influenciam a eficiência da carbonatação, como a de LU et al., 2019 e KOU et al 2012.

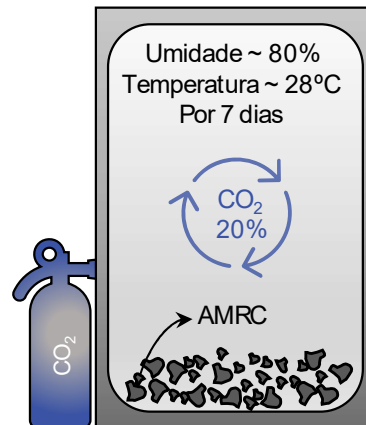


Figura 9. Processo de carbonatação do agregado concreto reciclado.

O teste realizado em 7 dias, no qual o agregado miúdo ficou exposto na câmara de carbonatação fez com que o agregado miúdo reciclado de concreto mostrasse uma boa resposta a carbonatação. Um teste por difração de raios X confirmou o consumo significativo de portlandita (Figura 11) o que é revelado na análise do pico principal da portlandita no entorno de 2theta 18°, no qual foi quase que totalmente extinguido. Como pode ser visto no gráfico abaixo:

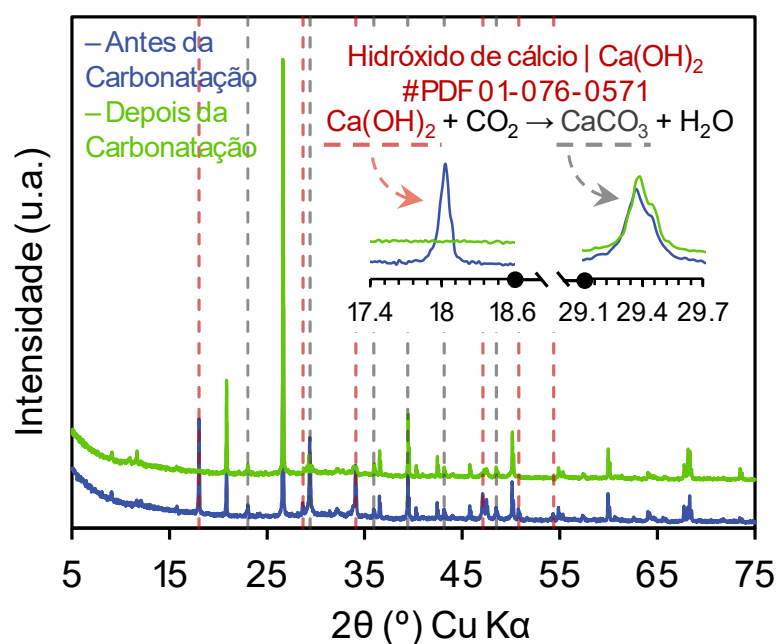


Figura 10. Difratograma do agregado miúdo reciclado de concreto antes e depois do processo de carbonatação.

3.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA TOTAL DO AMCRC

O agregado de concreto reciclado carbonatado foi ensaiado quanto a sua absorção de água total (Figura 12A) e o resultado apresentou uma absorção inicial significativa a partir do instante 30 minutos (Figura 12B). Por isso optou-se pelo processo de mistura descrito abaixo, no qual faz-se primeiro uma pasta de cimento e por fim adiciona-se o agregado concreto reciclado carbonatado, fazendo com que o ACR fique envolto por essa matriz cimentícia formada, para evitar que tenha de excesso de água na etapa de mistura da matriz cimentícia.

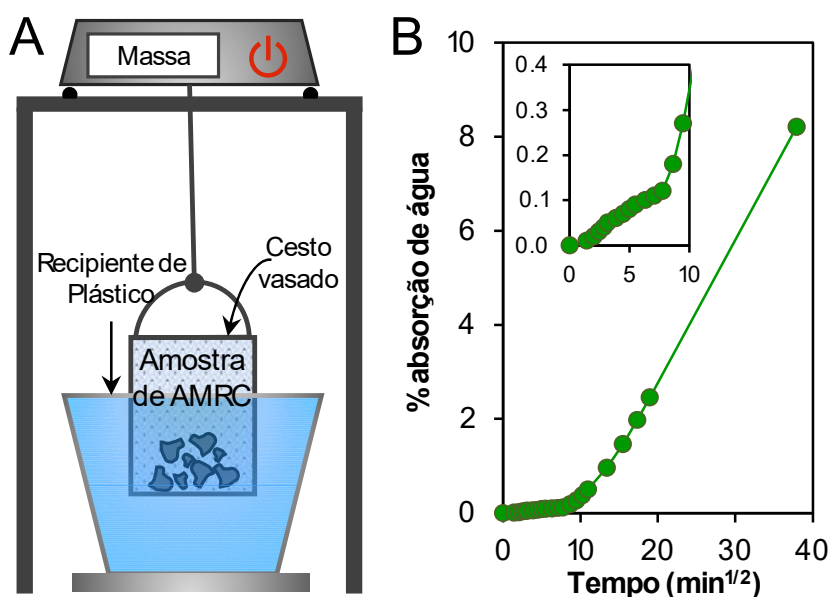


Figura 11. Processo de determinação da absorção do agregado de concreto reciclado.

3.3 PRODUÇÃO E DISPONIBILIDADE DA SÍLICA ATIVA

A produção da sílica ativa é realizada a partir do processamento da sílica cristalina, também conhecida como AN de quartzo. Esse processo envolve a combustão parcial da AN de quartzo em altas temperaturas, geralmente acima de 1400°C (FERNANDES et al., 2024). Durante este processo, os átomos de sílica são deslocados para formar moléculas de dióxido de silício (SiO₂), que são altamente reativas o que resulta na produção de uma fina poeira de sílica, conhecida como sílica ativa (ISLAM et al., 2024).

Neste estudo, foi utilizada a sílica ativa comercializada sob a forma de pó fino, amplamente utilizada como material suplementar em concreto, argamassas,

indústria cerâmica e outras aplicações. A sílica ativa é geralmente adicionada ao concreto e argamassas em uma proporção de 5 a 15% em relação ao peso do cimento (SIDDIQUE, 2011).

A sílica ativa costuma ser comercializada em sacos plásticos ou embalagens de papel, geralmente com capacidade de 20 kg ou 25 kg. Esses sacos são fechados hermeticamente para evitar a perda de qualidade do produto devido à umidade e outros fatores ambientais. Alguns fabricantes também podem oferecer a opção de embalagens maiores, como sacos de “big-bag”, para atender às necessidades de grandes projetos de construção.

É importante notar que, durante o armazenamento e transporte, a sílica ativa deve ser mantida em condições secas e protegida da umidade para garantir sua qualidade e eficácia. Alguns fabricantes podem oferecer opções de embalagens com revestimentos internos resistentes à umidade para garantir a qualidade do produto.

3.4 PREPARO DA MATRIZ CIMENTÍCIA

As matrizes de cimento foram fabricadas em um misturador mecânico, com velocidade de rotação da pá de 140 ± 5 Rr/min, e velocidade do movimento planetário de 62 ± 5 Rr/min. Adicionou-se à água, o pó de sílica ativa e o cimento Portland (CPV) e misturou-se por 1 minuto. Em seguida adicionou-se o agregado concreto reciclado carbonatado no misturador mecânico, misturando-se completamente em um intervalo de tempo de 5 minutos. Após a mistura, às matrizes foram analisadas quanto à consistência (Figura 12).

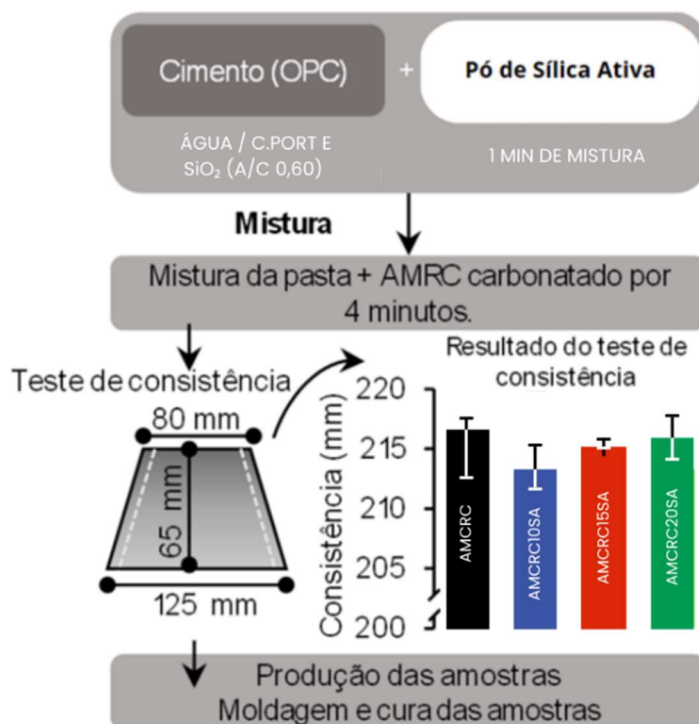


Figura 12. Processo de mistura das Amostras.

E finalmente, foram adicionadas em moldes prismáticos (40 mm x 40 mm x 160 mm) e moldes cilíndricos de dimensões (50 mm x 100 mm) e (100 mm x 200 mm), e mantidas 24h à temperatura ambiente (28±2 °C). Às amostras foram então removidas dos moldes metálicos, e deixadas à cura úmida até a idade de ensaio: 28 dias. A temperatura e a umidade relativa do ambiente de laboratório foram de 29 °C e 95% respectivamente, para todos os ensaios. A proporção (consumo em kg/m³) dos materiais utilizados encontra-se na Tabela 2.

Matrizes	Cimento (OPC)(kg/m ³)	SiO ₂ (%)	AMCRC (kg/m ³)	Água/Aglomerante (OPC+SiO ₂)
AMCRC	476.88	-	1430.64	0.60
SiO ₂ _10%	429.19	10.00	1430.64	0.60
SiO ₂ _15%	405.35	15.00	1430.64	0.60
SiO ₂ _20%	381.50	20.00	1430.64	0.60

Tabela 2. Consumo dos materiais utilizados na produção das matrizes de cimento.

Segue abaixo um fluxograma das etapas de concepção, tratamento, mistura e amostragem dos agregados reciclados para um melhor entendimento das etapas explicadas acima.

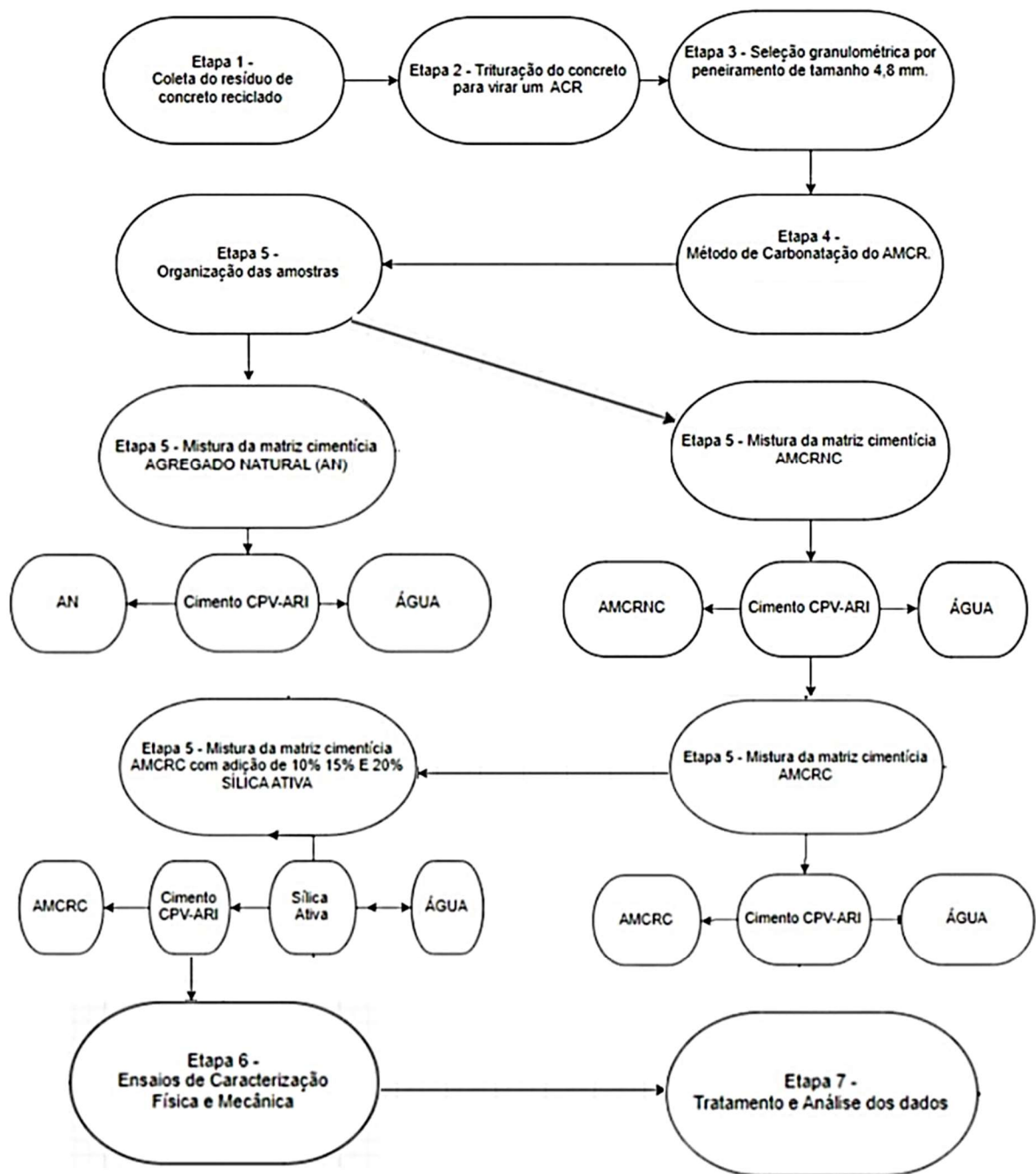


Figura 13. Fluxograma das etapas de concepção, tratamento, mistura e amostragem dos agregados reciclados.

3.5 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS PARA AVALIAR OS EFEITOS NAS PROPRIEDADES MECÂNCIAS DAS DIFERENTES MATRIZES CIMENTÍCIAS.

3.5.1 Propriedades mecânicas

No presente estudo foram comparadas as diferentes propriedades mecânicas, separando em matriz com agregado 100% natural, com agregado de concreto reciclado, agregado de concreto reciclado carbonatado, e por fim agregado de concreto reciclado carbonatado com a substituição do cimento (em massa) por Sílica Ativa nos teores de 10%, 15% e 20% (SiO_2 _10%; SiO_2 _15%; SiO_2 _20%).

3.5.1.1 Resistência a compressão.

A resistência à compressão, foi realizada de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 1985).

3.5.1.2 Resistência a tração na flexão.

A resistência à tração na flexão foi realizada de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005).

3.5.1.3 Módulo de Elasticidade

módulo de elasticidade estático foi realizado conforme a NBR 8522 (ABNT, 2008).

3.5.2 Absorção de água capilar, absorção de água total, índice de vazios e densidade aparente.

Quanto a absorção capilar, esta foi realizada de acordo com a NBR 9779 (ABNT, 2012), já a absorção de água total, índice de vazios e densidade aparente, foram realizados de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2009).

3.6 ANÁLISE DOS DADOS.

Os dados foram analisados quanto à sua normalidade utilizando-se o teste de Shapiro-Wilk e a sua homoscedasticidade utilizando-se o teste de Levene. Confirmando-se a normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias, os dados foram comparados utilizando-se o teste T de Student para até duas condições experimentais ou análise de variância de uma via para mais de duas condições experimentais, complementado pelo teste de Tukey.

Além disso, os dados de resistência à compressão, índice de vazios, módulo de elasticidade, resistência à tração na flexão e o percentual de substituição parcial

do cimento Portland (OPC) por Sílica ativa foram combinados por meio de uma regressão linear. Os dados do presente estudo estão representados como média \pm desvio padrão. Sempre que possível os dados brutos são plotados no entorno da média para melhor clareza da distribuição para que toda a análise estatística possa ser reproduzível.

4 RESULTADOS

Os ensaios realizados tiveram como objetivo avaliar o desempenho das diferentes matrizes cimentícias: AN, AMCRNC, AMCRC e AMCRC10SA, AMCRC15SA, AMCRC20SA. Para cada propriedade, três corpos de prova foram testados, e os valores médios, acompanhados de seus desvios padrão, foram calculados. Quatro tipos principais de gráficos e análises foram utilizados para a apresentação e interpretação dos resultados:

Gráficos de médias e desvios padrão: Apresentam os valores médios de cada amostra, destacando a dispersão dos dados e as tendências gerais.

Gráficos comparativos por grupos (teste de Tukey): Baseados no teste de Tukey, esses gráficos mostram as médias organizadas em grupos representados por letras ("a", "b", ou "ab"). Grupos com a mesma letra não apresentam diferenças estatisticamente significativas entre si, enquanto letras distintas indicam diferenças significativas ($p \leq 0,005$). Esse método é fundamental para identificar os tratamentos mais eficazes e estabelecer comparações confiáveis entre as amostras.

Gráficos de dispersão: Utilizados para evidenciar a relação entre variáveis, permitindo identificar padrões, tendências e possíveis correlações nos dados analisados.

Análise do impacto do tratamento de carbonatação e sílica ativa: Além das análises convencionais, foram realizados estudos específicos para avaliar a eficiência do processo de carbonatação e a influência da sílica ativa sobre as propriedades mecânicas e físicas. Essa análise buscou identificar quais combinações de tratamento apresentaram maior potencial de melhoria.

4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os ensaios de resistência à compressão avaliaram o comportamento mecânico das diferentes matrizes cimentícias. Foram testados três corpos de prova por amostra, calculando-se a média e o desvio padrão.

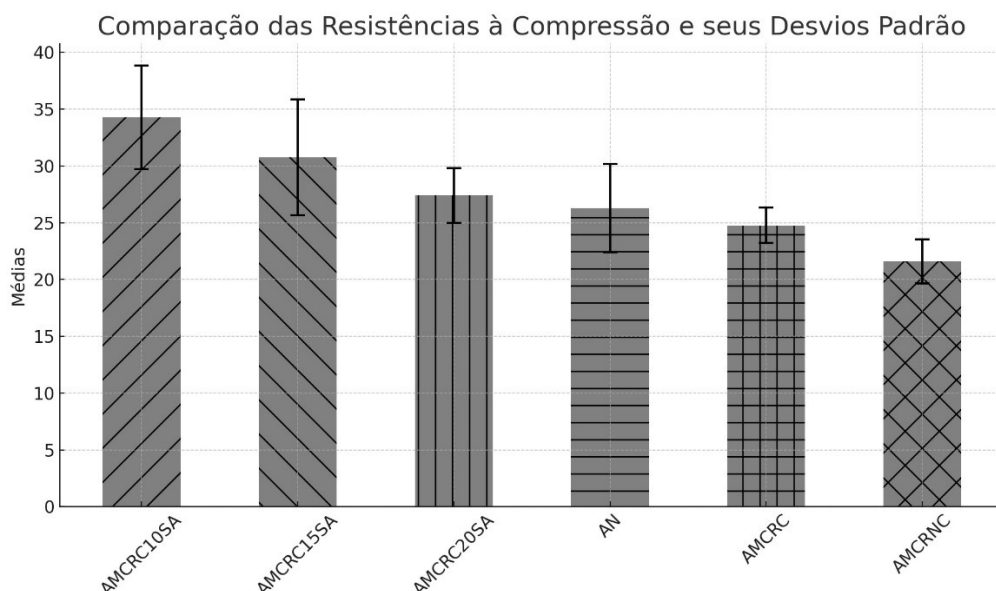


Figura 14: Gráfico de média das resistências a compressão das amostras com o desvio padrão.

O maior valor médio foi observado na amostra AMCRC10SA, que apresentou desempenho cerca de duas vezes superior ao AMCRNC, que registrou o menor valor. O agregado reciclado carbonatado (AMCRC) teve desempenho superior ao não carbonatado (AMCRNC), aproximando-se do agregado natural (AN). No entanto, as amostras com 15% e 20% de sílica ativa apresentaram valores inferiores ao AMCRC10SA, mas ainda maiores que os das demais amostras.

Os dados estatísticos confirmaram diferenças significativas ($p = 0,011$). A análise de Tukey destacou o AMCRC10SA no grupo “a” (melhor desempenho) e o AMCRNC no grupo “b” (menor desempenho), enquanto as demais amostras transitaram entre os dois grupos.

	G.L.	Soma.de.Quadrados	Quadrado.Médio	Estat..F	P.valor
Fator	5	300,71	60,13	4,85	0,011
Resíduos	12	147,82	12,34		

Tabela 3: Tratamento estatístico que retorna o P.valor dos dados analisados.

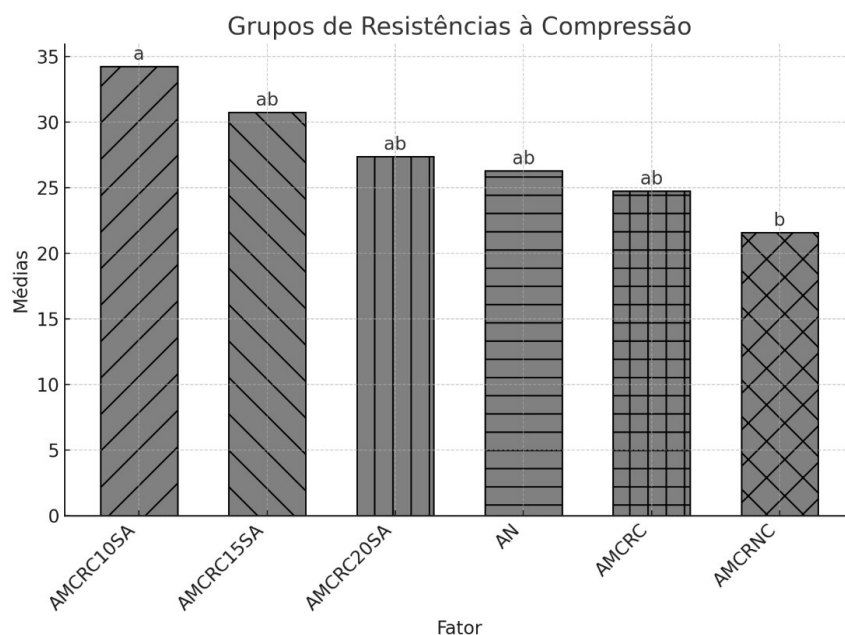


Figura 15: Gráfico comparativo das amostras, com as resistências a compressão média, e os grupos que cada uma participa, em ordem decrescente.

4.2 RESISTÊNCIA A FLEXÃO

A resistência à flexão também foi avaliada em três corpos de prova por amostra.

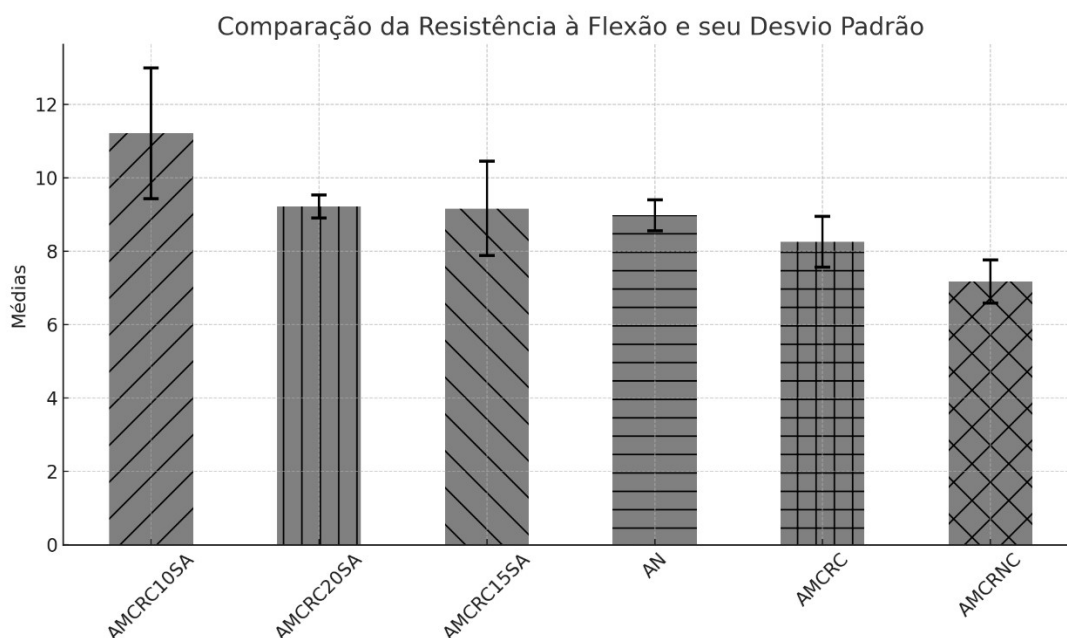


Figura 16: Gráfico de média das resistências a flexão das amostras com o desvio padrão.

Os resultados indicaram que o AMCRC10SA obteve o maior valor médio, enquanto o AMCRNC registrou o menor desempenho. O agregado natural (AN)

superou o AMCRC, mas ficou atrás das amostras com sílica ativa. As adições de 15% e 20% de sílica ativa apresentaram valores similares, embora inferiores ao AMCRC10SA.

O teste de Tukey ($p = 0,007$) confirmou diferenças estatísticas significativas. O AMCRC10SA foi incluído no grupo “a” devido ao seu desempenho superior, enquanto o AMCRNC foi destacado no grupo “b”. As demais amostras apresentaram resultados intermediários, transicionando entre os grupos.

	G.L.	Soma.de.Quadrados	Quadrado.Médio	Estat..F	P.valor
Fator	5	26,59	5,31	5,40	0,007
Resíduos	12	11,80	0,98		

Tabela 4: Tratamento estatístico que retorna o P.valor dos dados analisados.

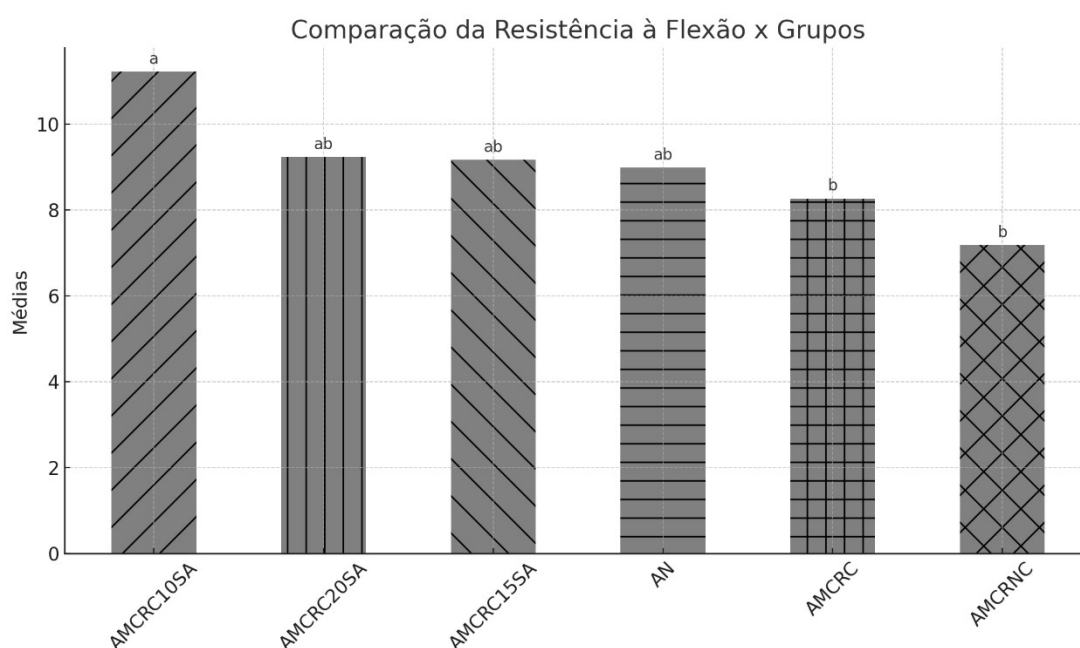


Figura 17: Gráfico comparativo das amostras, com as resistências a flexão média, e os grupos que cada uma participa, em ordem decrescente.

4.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Os ensaios de módulo de elasticidade mostraram resultados homogêneos, com diferenças pouco expressivas entre as amostras.

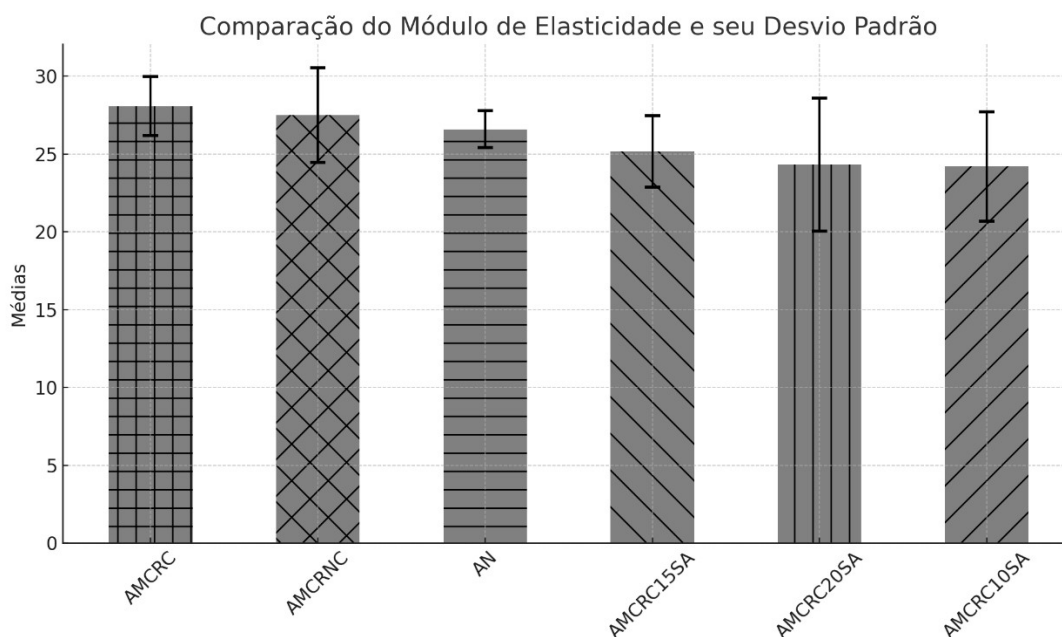


Figura 18: Gráfico de média dos módulos de elasticidade das amostras com o desvio padrão.

O maior valor médio foi observado no AMCRC, seguido pelo AMCRNC, ambos superiores ao agregado natural (AN). Por outro lado, as amostras com sílica ativa registraram os menores valores, com o AMCRC10SA apresentando o desempenho mais baixo.

A análise estatística não identificou diferenças significativas ($p = 0,46$). Todos os grupos foram incluídos na mesma classificação, neste caso o grupo “a”, indicando que as variações observadas não são relevantes estatisticamente.

	G.L.	Soma.de.Quadrados	Quadrado.Médio	Estat..F	P.valor
Fator	5	41,0	8,2	0,98	0,46
Resíduos	12	100,44	8,37		

Tabela 5: Tratamento estatístico que retorna o P.valor dos dados analisados.

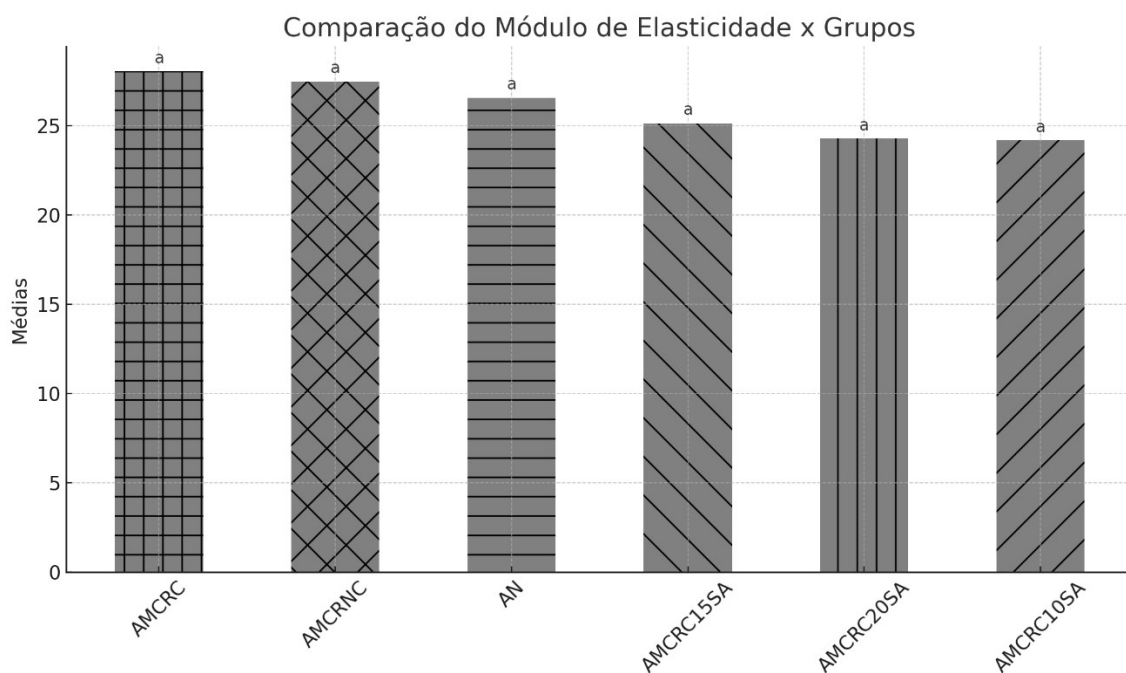


Figura 19: Gráfico comparativo das amostras, com módulos de elasticidade médios, e os grupos que cada uma participa, em ordem decrescente.

4.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA CAPILAR

A absorção de água capilar foi avaliada com base na média de três corpos de prova por amostra.

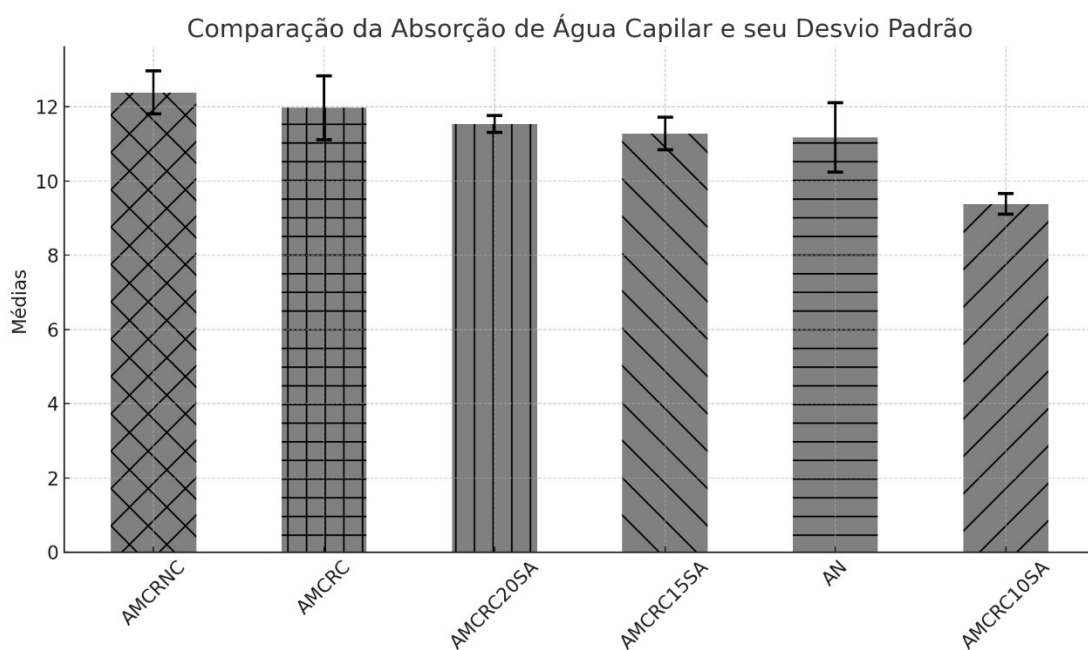


Figura 20: Gráfico de absorção de água capilar média das amostras com o desvio padrão.

O menor índice foi registrado no AMCRC10SA. Por outro lado, o AMCRNC apresentou o maior índice, refletindo maior porosidade. O AMCRC teve melhor desempenho que o agregado reciclado não tratado, mas ficou atrás das amostras com sílica ativa. As adições de 15% e 20% de sílica ativa tiveram resultados intermediários.

O teste de Tukey ($p = 0,001$) confirmou diferenças estatísticas significativas.

	G.L.	Soma.de.Quadrados	Quadrado.Médio	Estat..F	P.valor
Fator	5	16,1	3,22	8,5	0,001
Resíduos	12	4,53	0,37		

Tabela 6: Tratamento estatístico que retorna o P. Valor dos dados analisados.

Com isso, analisando desta vez de forma inversa, pois quanto menor a absorção de água capilar, melhor é o indicativo, todas as amostras são pertencentes ao grupo “a”, com exceção do AMCRC10SA que ficou no grupo “b” devido a ter obtido uma absorção com valor menor ao ponto de se tornar algo relevante.

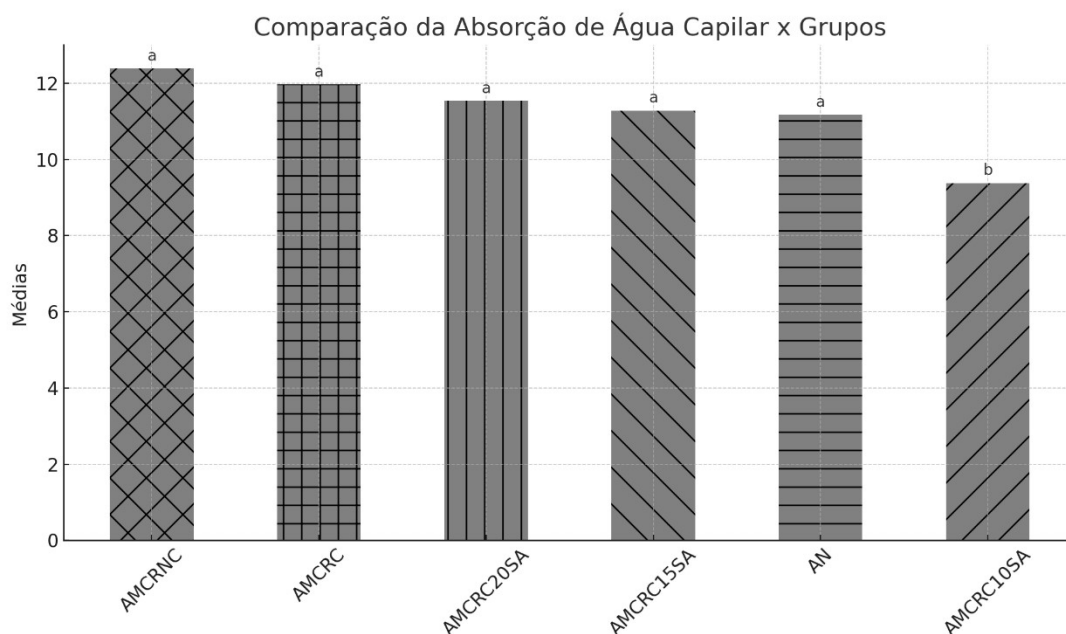


Figura 21: Gráfico comparativo das amostras, com absorção de água capilar média, e os grupos que cada uma participa, em ordem decrescente.

4.5 ÍNDICE DE VAZIOS

O índice de vazios apresentou os menores valores no AMCRC10SA, seguido pelo agregado natural (AN). As amostras AMCRNC registraram os maiores valores, enquanto as amostras com 15% e 20% de sílica ativa mostraram desempenho intermediário.

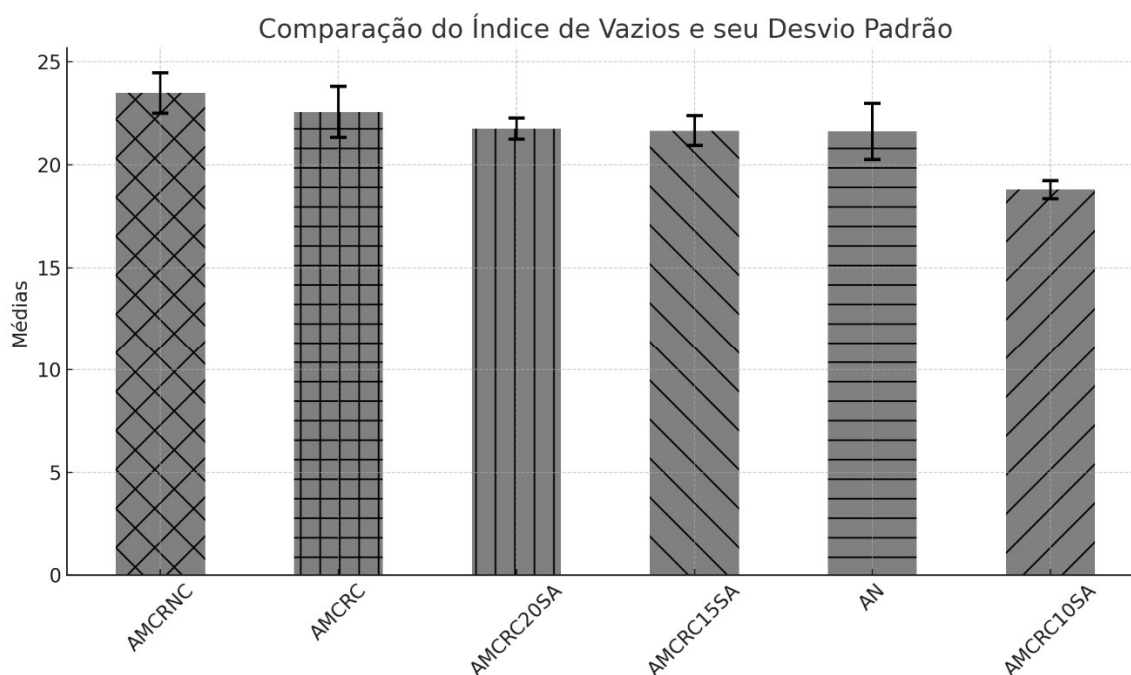


Figura 22: Gráfico de índice de vazios médios das amostras com o desvio padrão.

Primeiramente observa-se um comportamento muito similar ao ensaio de absorção de água, onde o maior índice de vazio médio encontrado foi do AMCRNC e o menor sendo o AMCRC10SA. E as outras amostras praticamente nas mesmas proporções do ensaio anterior.

O teste de Tukey confirmou diferenças significativas ($p = 0,001$), classificando o AMCRC10SA no grupo de melhor desempenho e o AMCRNC no grupo de pior desempenho.

	G.L.	Soma.de.Quadrados	Quadrado.Médio	Estat..F	P.valor
Fator	5	37,20	7,44	8,34	0,001
Resíduos	12	10,70	0,89		

Tabela 7: Tratamento estatístico que retorna o P.valor dos dados analisados.

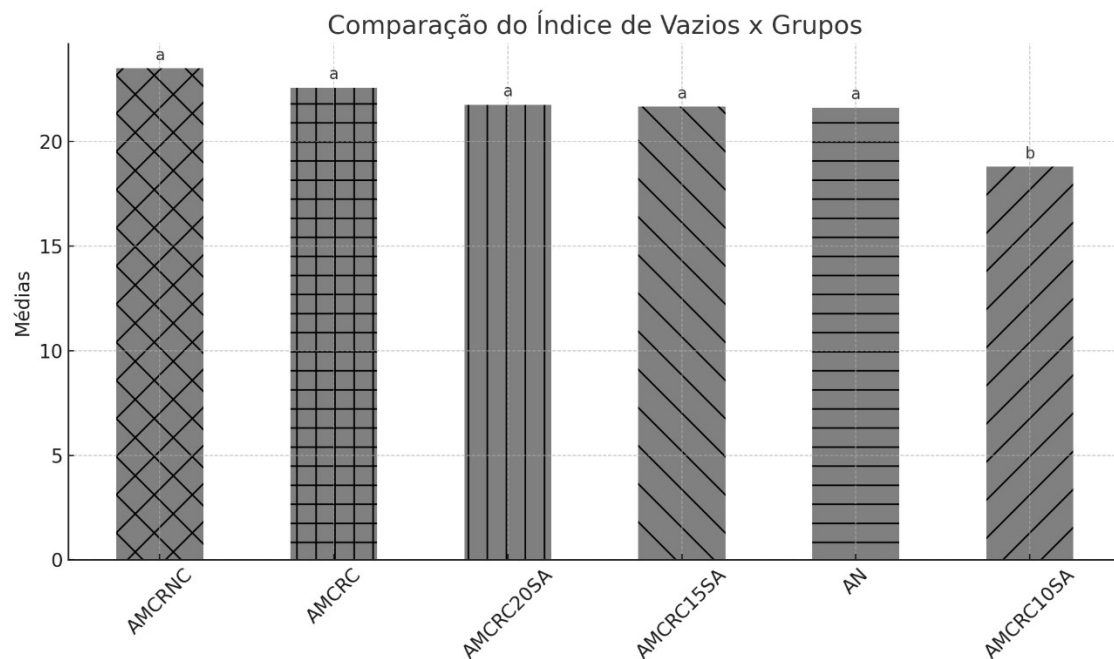


Figura 23: Gráfico comparativo das amostras, com índice de vazios médios, e os grupos que cada uma participa, em ordem decrescente.

4.6 DENSIDADE APARENTE

A densidade aparente obteve resultados que fugiram um pouco do que vinha sendo observado.

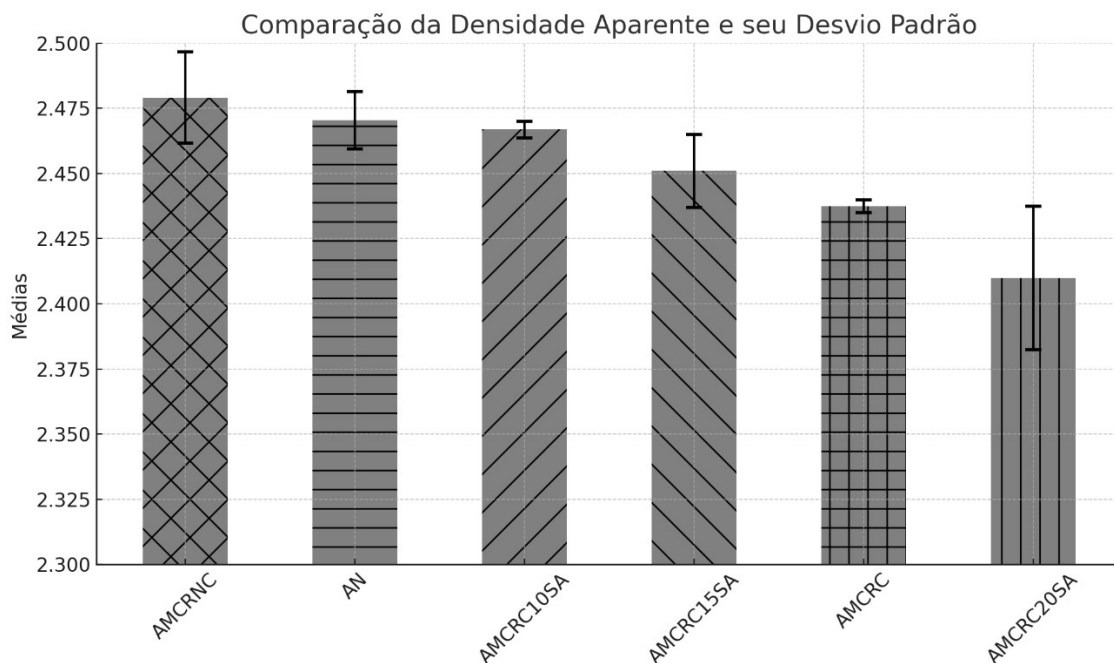


Figura 24: Gráfico de densidade média das amostras com o desvio padrão.

Observa-se que a maior densidade média encontrada foi do AMCRCNC, e a menor sendo o AMCRC20SA. Salientando também o AMCRC, sendo inferior ao AMCRNC. Diante disso, para evidenciar se existe alguma diferença significativa em termos estatísticos, a tabela abaixo mostra um resultado através do teste de Tukey, onde o P. valor de 0,001 está bem inferior ao de 0,05 e isso mostra que houve sim uma disparidade significativa entre os resultados.

	G.L.	Soma.de.Quadrados	Quadrado.Médio	Estat..F	P.valor
Fator	5	0,009	0,001	8,46	0,001
Resíduos	12	0,002	0,0002		

Tabela 8: Tratamento estatístico que retorna o P.valor dos dados analisados.

Com isso tivemos a divisão dos grupos entre “a” com AMCRCNC, AN e ARMCR10SF, o “ab”, com AMCRC15SA e AMCRC que transitam entre os dois e “b” com AMCRC20SA. Onde o único valor discrepante significativo foi o menor valor encontrado de densidade no AMCRC20SA, o único participante do grupo “b”, diante das amostras do grupo “a”.

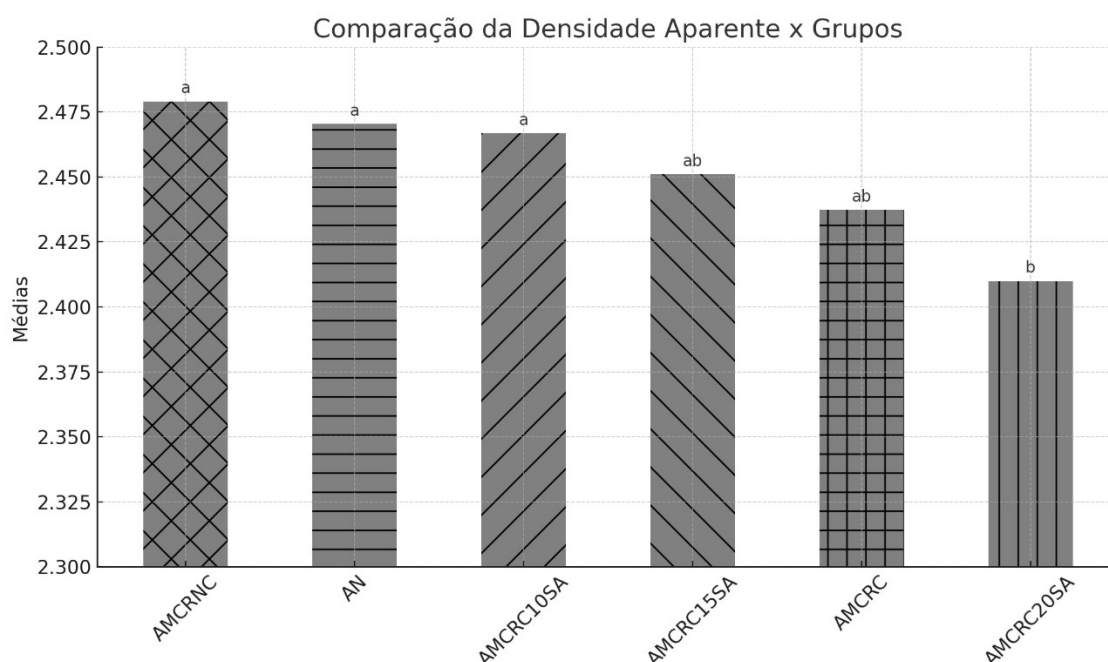


Figura 25: Gráfico comparativo das amostras, com densidade média e os grupos que cada uma participa, em ordem decrescente.

4.7 ANÁLISE DA CORRELAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS MATERIAIS.

4.7.1 Resistência à Compressão x Densidade Aparente

O gráfico de dispersão Resistência à Compressão x Densidade Aparente mostra que, em geral, a resistência à compressão aumenta com a densidade aparente. A amostra AMCRC10SA se destaca por apresentar a maior resistência à compressão, apesar de não possuir a maior densidade aparente. Por outro lado, a amostra AMCRNC, que possui a maior densidade aparente entre todas, apresenta a menor resistência à compressão, indicando uma discrepância em relação à tendência geral observada. Esse comportamento pode estar associado a características internas, como microfissuras ou heterogeneidade na matriz do material.

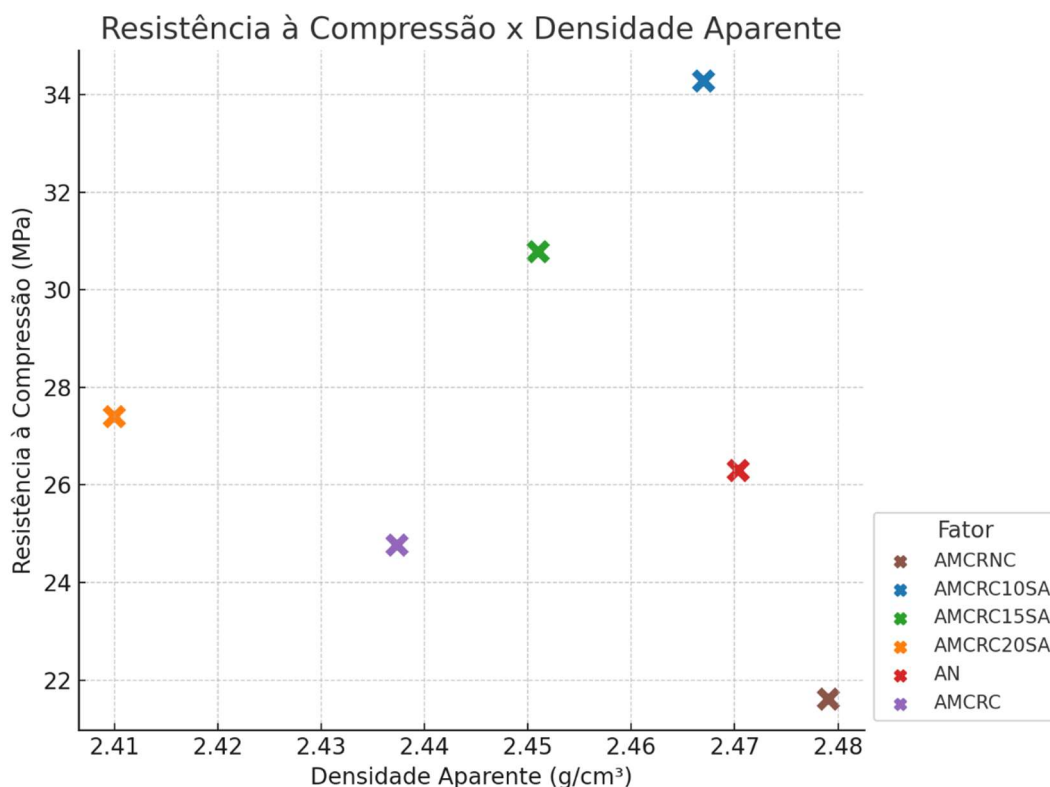


Figura 26: Gráfico comparativo de dispersão entre resistência à compressão e densidade aparente.

4.7.2 Resistência à Compressão x Módulo de Elasticidade

O gráfico de dispersão Resistência à Compressão x Módulo de Elasticidade revela uma tendência positiva, indicando que materiais mais rígidos, com maior módulo de elasticidade, geralmente apresentam maior resistência à compressão. A amostra AMCRC10SA novamente se destaca como a de maior resistência e rigidez, enquanto a amostra AMCRNC exibe resistência reduzida, mesmo possuindo valores intermediários de módulo de elasticidade. Esse padrão reflete a importância da rigidez como um fator chave no desempenho mecânico dos materiais.

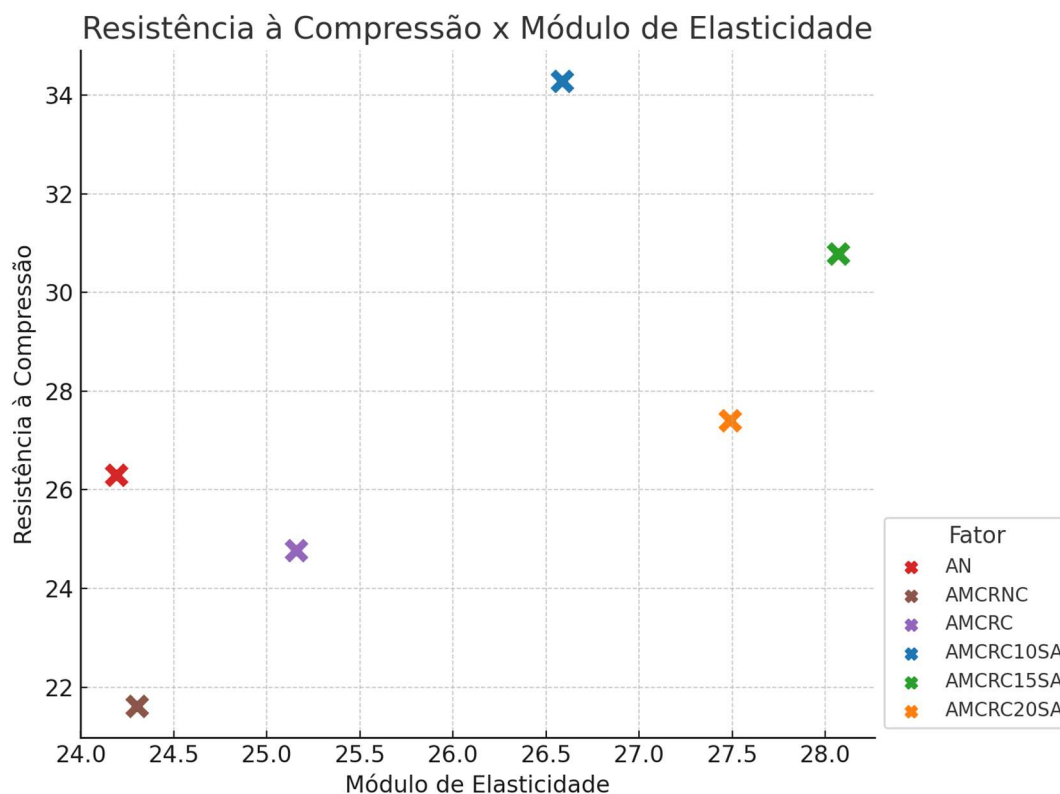


Figura 27: Gráfico comparativo de dispersão entre resistência à compressão e módulo de elasticidade.

4.7.3 Índice de Vazios x Densidade Aparente

O gráfico de dispersão Índice de Vazios x Densidade Aparente demonstra uma relação inversa entre essas propriedades. Amostras com maior índice de vazios tendem a apresentar menor densidade aparente, o que é esperado devido à

maior presença de poros no material. A amostra AMCRNC, por exemplo, apresenta o maior índice de vazios, mas também a maior densidade aparente, indicando um comportamento fora da tendência geral. Esse resultado pode estar relacionado à particularidades na distribuição dos componentes internos.

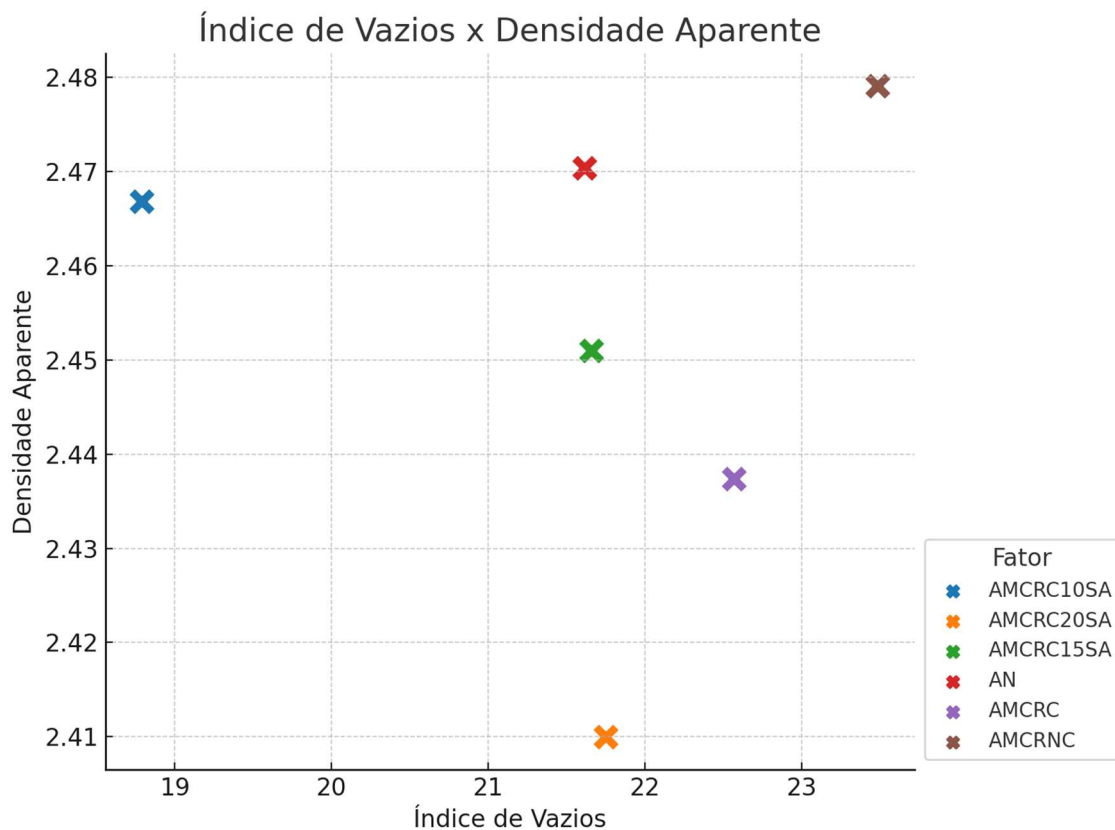


Figura 28: Gráfico comparativo de dispersão entre índice de vazios e densidade aparente.

4.7.4 Absorção de Água x Densidade Aparente

O gráfico de dispersão Absorção de Água x Densidade Aparente indica uma relação inversa entre as variáveis. Amostras com maior densidade aparente, como AMCRNC, apresentam menores valores de absorção de água, o que pode ser atribuído à menor porosidade e maior compactação do material. Por outro lado, amostras como AMCRC10SA, com densidade aparente mais baixa, apresentam maior absorção de água, sugerindo uma estrutura mais porosa. Esses resultados reforçam a influência direta da densidade sobre a permeabilidade e a durabilidade do material.

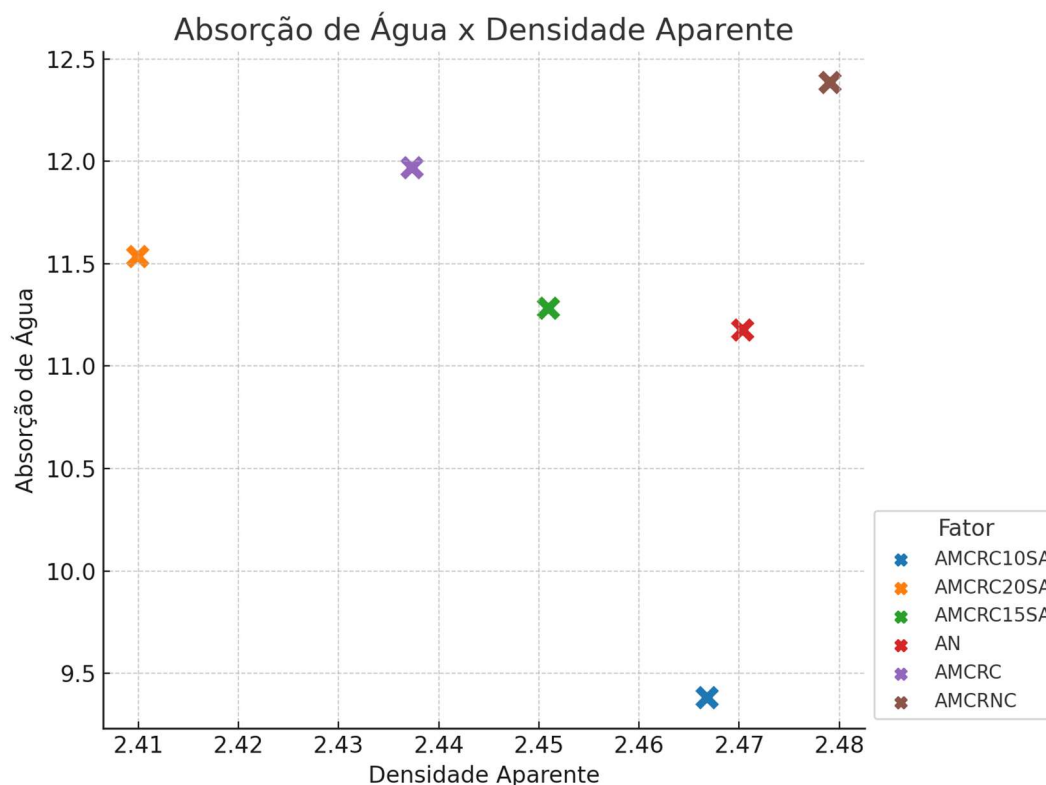


Figura 29: Gráfico comparativo de dispersão entre absorção de água e densidade aparente

4.8. ANÁLISE COMPARATIVA DE AGREGADOS NATURAIS, CARBONATADOS E NÃO CARBONATADOS.

A análise comparativa entre os agregados natural (AN), carbonatado (AMCRC) e não carbonatado (AMCRNC) destacou diferenças significativas em desempenho. A amostra AN apresentou a maior resistência à compressão média, com 26,29 MPa, representando um aumento de 21,7% em relação à AMCRNC, que obteve 21,61 MPa, enquanto o AMCRC mostrou um desempenho intermediário, com 24,77 MPa (14,6% de aumento). Em relação à densidade aparente, o AMCRNC possui o maior valor (2,479 g/cm³), mas não traduziu essa característica em maior eficiência estrutural, apresentando a menor razão resistência/densidade (8,71). Já os agregados AN e AMCRC mostraram maior eficiência, com razões de 10,64 e 10,16, respectivamente. No quesito absorção de água, o AN apresentou o menor valor (11,18%), seguido pelo AMCRC (11,97%) e pelo AMCRNC (12,38%). Esses resultados mostram que o agregado natural se destaca pelo melhor desempenho geral, enquanto o agregado não carbonatado apresentou limitações em resistência e eficiência estrutural.

4.9 COMPARAÇÃO DO IMPACTO DOS TEORES DE SÍLICA ATIVA EM RELAÇÃO AOS AGREGADOS RECICLADOS NÃO CARBONATADOS.

A adição de sílica ativa aos agregados reciclados não tratados (AMCRNC) resultou em melhorias significativas no desempenho das amostras. A resistência à compressão média aumentou progressivamente com o teor de sílica ativa, com a amostra AMCRC10SA atingindo 34,27 MPa, um aumento de 58,6% em relação ao AMCRNC (21,61 MPa). A AMCRC15SA e a AMCRC20SA também apresentaram aumentos expressivos, com 30,78 MPa (42,4%) e 27,40 MPa (26,7%), respectivamente. Apesar de uma leve redução na densidade aparente em relação ao AMCRNC, as amostras com sílica ativa apresentaram maior eficiência estrutural, com razões resistência/densidade superiores (13,88 para AMCRC10SA contra 8,71 para AMCRNC). Além disso, a absorção de água diminuiu significativamente com a adição de sílica ativa, com a AMCRC10SA apresentando uma redução de 24,3%, indicando menor porosidade conectada. Esses resultados evidenciam a capacidade da sílica ativa de transformar um agregado reciclado não tratado em um material mais resistente e durável, especialmente em teores mais elevados.

5. CONCLUSÃO

De acordo com o que foi abordado neste estudo, estimava-se resultados positivos para o tratamento de aprimoramento dos agregados de concreto reciclado com o método de carbonatação e adição de sílica ativa, com base na pesquisa realizada e nos estudos coletados. Os resultados obtidos confirmaram algumas dessas expectativas, enquanto outros resultados apresentaram variações inesperadas, levantando considerações importantes para entender as confirmações e divergências encontradas.

Primeiramente, o módulo de elasticidade não apresentou variações significativas entre as amostras devido à sua menor sensibilidade a mudanças localizadas na microestrutura e à rigidez inerente dos componentes, tanto do agregado reciclado quanto da matriz cimentícia. Os aprimoramentos podem não ter influenciado a deformabilidade elástica de maneira suficiente para se refletir nos valores de módulo de elasticidade.

A carbonatação do agregado reciclado (AMCRC) mesmo que não significativo de acordo com os dados estatísticos, mostrou-se superior à amostra não carbonatada (AMCRNC) nos ensaios de resistência à compressão, flexão, módulo de elasticidade, absorção de água e índice de vazios, indicando ganhos na aplicação desse tratamento. Contudo, os agregados reciclados carbonatados ainda não conseguiram superar as propriedades dos agregados naturais (AN), confirmando as observações de Zhang e Wang (2019) sobre a superioridade estrutural dos agregados naturais.

Além disso, o tamanho dos agregados miúdos e a maior presença de argamassa antiga aderida que essa granulometria proporciona, tiveram uma participação importante devido a precisarem ter uma boa resposta aos aprimoramentos propostos. Onde ficaria mais sensível e evidente diante dos resultados encontrados, possíveis inconsistências que poderiam existir no processo metodológico do tratamento ou das etapas de mistura do traço e preparo das amostras, ao não encontrar respostas positivas.

No entanto, o agregado miúdo de concreto reciclado não tratado (AMCRNC) mesmo tendo mostrado os menores valores de resistência à compressão, flexão, absorção de água e índice de vazios, apresentou um resultado elevado de

densidade aparente. Essas contradições podem ser atribuídas à variabilidade intrínseca dos agregados reciclados, decorrente das diferentes origens dos resíduos e dos processos de reciclagem, como apontado por Silva et al. (2015) e Zhang e Wang (2019). A heterogeneidade na composição dos agregados também desempenha um papel crucial, influenciando as propriedades finais do material de maneira imprevisível, até mesmo pela diferença de compactação que pode ter ocorrido entre as amostras.

Em relação aos teores de sílica ativa, observou-se que a adição de 10% (AMCRC10SA) foi mais eficaz do que teores maiores de 15% (AMCRC15SA) e 20% (AMCRC20SA). Isso pode ser explicado pela possível aglomeração de partículas e distribuição não homogênea na matriz cimentícia em teores mais altos, conforme discutido por Khan e Siddique (2011). Essa aglomeração pode criar zonas de fraqueza e aumentar a porosidade, enquanto o teor de 10% equilibra a formação de C-S-H com a manutenção de uma estrutura homogênea e densa.

As amostras de AMCRC10SA em relação ao AMCRNC, demonstraram superioridade significativa em termos de resistência à compressão, flexão, absorção de água capilar e índice de vazios, indicando uma maior resistência mecânica, à penetração de água, e possivelmente, maior durabilidade em condições de exposição a agentes agressivos. Esses resultados corroboram a ideia de que a microestrutura mais densa e menos porosa, promovida pela combinação de carbonatação e sílica ativa, é essencial para o desempenho mecânico e a durabilidade do concreto reciclado (Katz, 2004; Silva et al., 2015).

A amostra AMCRC10SA foi a única que se mostrou igual ou superior ao agregado natural, em todos os aspectos, onde significativamente obteve melhores parâmetros de absorção de água e índice de vazios, sugerindo um maior potencial de durabilidade. E também foi a única amostra que se “descolou” significativamente considerando os grupos levantados estatisticamente. Enquanto que as outras amostras, em todos os ensaios, estiveram no mesmo intervalo de grupo, mostrando que apesar das diferenças nos valores, não havia algo significativo.

Portanto, chega-se na conclusão de que a utilização de agregado miúdo de concreto reciclado carbonatado com adição de 10% de sílica ativa (AMCRC10SA) pode melhorar significativamente algumas propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto, quando comparado ao agregado de concreto reciclado não carbonatado (AMCRNC). Essa combinação parece otimizar a formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), reduzir a porosidade e aumentar a densidade da matriz cimentícia, resultando em um material potencialmente mais forte e durável, conforme discutido por Mazloom, Ramezaniapour e Brooks (2004). Além disso, em comparação ao AN, esta amostra mostrou igualdade em todos os ensaios e até mesmo de superioridade relevante no caso de duas características de durabilidade, evidenciando que, considerando somente os dados coletados específicos desta pesquisa, sem considerar o fator econômico, foi um resultado positivo.

Isto ressalta a importância de uma abordagem holística para a melhoria de matrizes cimentícias com agregados reciclados, considerando tanto a microestrutura da matriz de cimento quanto a zona de transição interfacial. Enquanto a carbonatação densifica e fortalece a zona de transição, a adição de sílica ativa melhora a matriz de cimento como um todo, resultando em um concreto mais homogêneo e resistente. Zheng et al. (2021) enfatizam a necessidade de considerar múltiplos fatores e interações dentro de um material compósito para alcançar melhorias duráveis e eficazes.

No entanto, além das questões técnicas, é fundamental considerar a viabilidade econômica do uso de agregados reciclados tratados com carbonatação e sílica ativa. O custo elevado e a complexidade dos processos envolvidos podem ser obstáculos significativos para a adoção em larga escala. Entretanto, se esses desafios forem superados e um caminho economicamente viável for encontrado, essa abordagem poderia se tornar uma alternativa sustentável altamente promissora para a construção civil. Ela não só ajudaria a reduzir a extração de agregados naturais, mas também contribuiria para a mitigação dos impactos ambientais, oferecendo uma solução mais ecológica para o setor.

Estudos futuros devem focar na otimização dos processos de tratamento e na avaliação da durabilidade a longo prazo das estruturas de concreto feitas com

esses materiais reciclados, pois os resultados obtidos neste estudo indicam que a matriz cimentícia desenvolvida, dada sua granulometria e comportamento mecânico, apresenta bom potencial para ser explorada em estudos que avaliem sua aplicabilidade em diferentes contextos práticos. Em particular, a combinação de carbonatação e sílica ativa, que resultou em uma matriz com alta densidade e baixa porosidade, levanta possibilidades promissoras para investigação em áreas como argamassas de revestimento de alto desempenho, reparos estruturais e camadas de regularização.

Onde estudos prévios (Kou e Poon, 2012; Tam e Tam, 2008; Leemann et al., 2023) reforçam a importância da densificação microestrutural obtida por essas técnicas, mas ressaltam a necessidade de estudos mais detalhados em condições reais, como resistência a ciclos térmicos e exposição a agentes agressivos. Além disso, é crucial entender melhor a variabilidade intrínseca dos agregados reciclados e aprimorar os métodos de medição e controle de qualidade para garantir a consistência dos resultados (Duan; Poon, 2014).

6. REFERÊNCIAS

ABDALLA, Tareg; OTIENO, David. **Strength, durability, and microstructure properties of concrete incorporating silica fume and a high volume of sugarcane bagasse ash.** *Results in Engineering*, v. 16, p. 100666, 2022.

AKBARNEZHAD, A. et al. **Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates.** *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 8, p. 3469–3479, ago. 2011.

ALYASEEN, A.; PODDAR, A.; KUMAR, N.; HAYDAR, K.; KHAN, A.; SIHAG, P.; LEE, D.; KUMAR, R.; SINGH, T. **Influence of silica fume and *Bacillus subtilis* combination on concrete made with recycled concrete aggregate: Experimental investigation, economic analysis, and machine learning modeling.** *Case Studies in Construction Materials*, 2023.

BAZAZ, Jafar Bolouri; KHAYATI, Mahmood. **Properties and performance of concrete made with recycled low-quality crushed brick.** *Construction and Building Materials*, v. 112, p. 1057-1065, 2016.

BUI, N. K.; SATOMI, T.; TAKAHASHI, H. **Mechanical properties of concrete containing 100% treated coarse recycled concrete aggregate.** *Construction and Building Materials*, v. 163, p. 496–507, 28 fev. 2018.

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

CHEN, P. et al. **Producing vaterite by CO₂ sequestration in the waste solution of chemical treatment of recycled concrete aggregates.** *Journal of Cleaner Production*, v. 149, p. 735–742, 15 abr. 2017.

DUAN, Z. H.; POON, C. S. **Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars.** *Materials and Design*, v. 58, p. 19–29, 2014.

FALESCHINI, F. et al. **Rheology of fresh concretes with recycled aggregates.** *Construction and Building Materials*, v. 73, p. 407–416, 30 dez. 2014.

FENG, Z. et al. **Using microbial carbonate precipitation to improve the properties of recycled fine aggregate and mortar.** *Construction and Building Materials*, v. 230, 10 jan. 2020.

GARTNER, E. M. **"Industrially interesting approaches to 'low-CO₂' cements."** *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 9, p. 1489-1498, 2004.

GHOLIZADEH-VAYGHAN, A.; BELLINKX, A.; SNELLINGS, R. et al. **The effects of carbonation conditions on the physical and microstructural properties of recycled concrete coarse aggregates.** *Construction and Building Materials*, v. 239, 2020.

GUO, H. et al. **Durability of recycled aggregate concrete – A review.** *Cement and Concrete Composites*, v. 89, p. 251–259, 1 maio 2018.

HARADA, K. M.; SAKURAMOTO, F. **FIELD APPLICATION AND ADVANTAGE OF CONCRETE RECYCLED IN-SITU RECYCLING SYSTEMS.** 07 July, 2015.

Iara J. Fernandes, Carlos A.M. Moraes, José R.J. Egea, Vânia C. Sousa. **Production and characterization of silica materials from rice husk ash by different combustion processes.** *Powder Technology*, v. 436, 2017, p. 119473. ISSN 0032-5910.

ISMAIL, S.; KWAN, W. H.; RAMLI, M. **Mechanical strength and durability properties of concrete containing treated recycled concrete aggregates under different curing conditions.** *Construction and Building Materials*, v. 155, p. 296–306, 30 nov. 2017.

Katz, A. **Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete.** *Cement and Concrete Research*, v. 33, n. 5, p. 703-711, 2003.

KATZ, A. **Treatments for the improvement of recycled aggregate.** *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 16, n. 6, p. 597-603, 2004.

KHAN, M. I.; SIDDIQUE, R. **Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties.** *Resources, Conservation and Recycling*, v. 55, n. 11, p. 923-932, 2011.

KONG, D. et al. **Effect and mechanism of surface-coating pozzalanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete.** *Construction and Building Materials*, v. 24, n. 5, p. 701–708, maio 2010.

KOU, S. C.; POON, C. S. **Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates.** *Cement and Concrete Composites*, v. 32, n. 8, tp. 649–654, set. 2010.

KOU, S. C.; POON, C. S.; WATANABE, K.; CHAN, D. **Properties of concrete prepared with low-grade recycled aggregates.** *Construction and Building Materials*, v. 36, p. 881-889, 2012.

KOU, S. C.; POON, C. S. **Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate.** *Construction and Building Materials*, v. 35, p. 69-76, 2012.

LEEMANN, Andreas; WINNEFELD, Frank; MÜNCH, Beat; TIEFENTHALER, Johannes. **Accelerated carbonation of recycled concrete aggregates and its implications for the production of recycling concrete.** *Construction and Building Materials*, v. 66, 2023.

LEVY, S. M.; HELENE, P. **Durability of recycled aggregates concrete: A safe way to sustainable development.** *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 11, p. 1975-1980, 2004.

LIANG, C. et al. **Utilization of CO₂ curing to enhance the properties of recycled aggregate and prepared concrete: A review.** *Cement and Concrete Composites*, v. 105, 1 jan. 2020.

LU, B.; SHI, C.; CAO, Z.; GUO, M.; ZHENG, J. **Effect of carbonated coarse recycled concrete aggregate on the properties and microstructure of recycled concrete.** *Cement and Concrete Composites*, v. 122, 2019.

LU, Zheng; TAN, Qihang; LIN, Jiali; WANG, Dianchao. **Properties investigation of recycled aggregates and concrete modified by accelerated carbonation through increased temperature.** *Construction and Building Materials*, v. 348, 2022.

MAZLOOM, M.; RAMEZANIANPOUR, A. A.; BROOKS, J. J. **Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete.** *Cement and Concrete Composites*, v. 26, n. 4, p. 347-357, 2004.

Md. Tariqul Islam, Md. Faruk Hossen, Md. Ali Asraf, Md. Kudrat-E-Zahan, C. M. Zakaria. **Production and Characterization of Silica from Rice Husk: An Updated Review.** *Asian Journal of Chemical Sciences*, 2024.

MONTGOMERY, D. G. **WORKABILITY AND COMPRESSIVE STRENGTH PROPERTIES OF CONCRETE CONTAINING RECYCLED CONCRETE AGGREGATE.** 1 jan, 1998.

OGAWA, H.; NAWA, T. **Improving the quality of recycled fine aggregate by selective removal of brittle defects.** *Journal of Advanced Concrete Technology*, v. 10, n. 12, p. 395–410, dez. 2012.

PALLAPOTHU, S. N. R. G.; PANCHARATHI, R. K.; MIDATHADA, L. **Integrating particle packing approach with ML techniques to optimise the compressive strength of RCA based concrete mixes.** *Journal of Building Engineering*, v. 50, p. 104305, 2024.

POSSAN, E. **CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA CARBONATAÇÃO DO CONCRETO COM ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA EM AMBIENTE NATURAL E ACELERADO.** 01 Set, 2004.

QIAN, XINLIANG; XU, WEI; WANG, YONGHUI; FANG, HU; JING, ZHE; CHEN, PEIYUAN. **Revisiting the carbonation of recycled concrete fine: A pH-cycle carbonation method.** *Journal of Building Engineering*

RODRIGUES, F.; CARVALHO, M. T.; EVANGELISTA, L.; DE BRITO, J. **Physical–chemical and mineralogical characterization of fine aggregates from construction and demolition waste recycling plants.**

R.V. SILVA, J. de Brito, R.K. Dhir. **Use of recycled aggregates arising from construction and demolition waste in new construction applications.** *Construction and Building Materials*, v. X, 2019.

SÁNCHEZ DE JUAN, Marta; ALAEJOS GUTIÉRREZ, Pilar. **Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate.** *Materials and Structures*, 2009.

SCRIVENER, K. L.; MARTIRENA, F.; BISHNOI, S.; MAITY, S. **"Calcined clay limestone cements (LC3)."** *Cement and Concrete Research*, v. 114, p. 49-56, 2018.

SHABAN, W. M. et al. **Quality improvement techniques for recycled concrete aggregate: A review** *Journal of Advanced Concrete Technology*, Japan Concrete Institute, 1 abr. 2019.

SHI, C. et al. **Performance enhancement of recycled concrete aggregate - A review** *Journal of Cleaner Production*, Elsevier Ltd, 20 jan. 2016.

SHI, C.; JIMÉNEZ, A. F.; PALOMO, A. **New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement.** *Cement and Concrete Research*, v. 41, p. 750-763, 2016.

SHUI, Z. et al. **Rehydration reactivity of recycled mortar from concrete waste experienced to thermal treatment.** *Construction and Building Materials*, v. 22, n. 8, p. 1723–1729, ago. 2008.

SIDDIQUE, R. **Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties.** *Resources, Conservation and Recycling*, v. 55, n. 11, p. 923-932, 2011.

SILVA, R. V.; BRITO, J. de; DHIR, R. K. **Carbonation behaviour of recycled aggregate concrete.** *Cement and Concrete Composites*, v. 62, p. 22-32, 2015.

SILVA, R. V.; BRITO, J. de; DHIR, R. K. **Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production.** *Construction and Building Materials*, v. 65, p. 201-217, 2014.

SKOCEK, J.; ZAJAC, M.; BEN HAHA, M. **Carbon Capture and Utilization by mineralization of cement pastes derived from recycled concrete.** *Scientific Reports*, v. 10, n. 1, 1 dez. 2020.

SPAETH, V.; DJERBI TEGGUER, A. **Improvement of recycled concrete aggregate properties by polymer treatments.** *International Journal of Sustainable Built Environment*, v. 2, n. 2, p. 143–152, 2013.

TRIVEDI, S. S.; SARANGI, D.; DAS, B. B.; BARBHUIYA, S. **Influence of multi-stage processing and mechano-chemical treatments on the hydration and microstructure properties of recycled aggregate concrete.** *Construction and Building Materials*, v. 234, p. 117411, 2023.

TAM, V. W. Y.; GAO, X. F.; TAM, C. M. **Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach.** *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 6, p. 1195–1203, jun. 2005.

TAM, V. W. Y.; TAM, C. M.; LE, K. N. **Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches.** *Resources, Conservation and Recycling*, v. 50, n. 1, p. 82-101, mar. 2007.

WANG, J. et al. **Microbial carbonate precipitation for the improvement of quality of recycled aggregates.** *Journal of Cleaner Production*, v. 156, p. 355–366, 10 jul. 2017.

WU, K.; LUO, S.; ZHENG, J.; YAN, J.; XIAO, J. **Influence of carbonation treatment on the properties of multiple interface transition zones and recycled aggregate concrete.** *Cement and Concrete Composites*, v. 135, 2022.

XIAO, J.; LI, W.; POON, C. **Recent studies on mechanical properties of recycled aggregate concrete in China-A review.** *Science China Technological Sciences*, v. 55, n. 6, p. 1463–1480, jun. 2012.

XUAN, D.; PIJLAMMAN, H.; CHEN, X.; BREM, G. **Total recycling of concrete waste using accelerated carbonation.** *Cement and Concrete Research*, v. 131, p. 105971, 2023.

XUAN, D.; ZHAN, B.; POON, C. S. **Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates.** *Cement and Concrete Composites*, v. 65, p. 67-74, 2016.

ZHANG, H.; LI, X.; ZHU, C.; XIAO, J. **Effect of carbonation on the properties of recycled aggregate concrete.** *Cement and Concrete Composites*, v. 62, p. 16-24, 2015.

ZHANG, Y.; WANG, H.; LI, X.; LIU, X. **Surface treatment on recycled coarse aggregates with nanomaterials.** *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016.

ZHANG, Y.; WANG, Q. **Durability of recycled aggregate concrete – A review.** *Cement and Concrete Composites*, v. 89, p. 251-259, 2019.

ZHENG, Y.; ZHANG, Y.; ZHANG, P. **Methods for improving the durability of recycled aggregate concrete: A review.** *Journal of Materials Research and Technology*, v. 10, p. 364-374, 2021.

ZELIĆ, J.; RUŠIĆ, D.; VEŽA, D.; KRSTULOVIĆ, R. **The role of silica fume in the kinetics and mechanisms during the early stage of cement hydration.** *Cement and Concrete Research*, v. 30, n. 10, p. 1655-1662, 2000