

AVALIAÇÃO TÉCNICA E GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

NA CONSTRUÇÃO CIVIL



AVALIAÇÃO
TÉCNICA



GESTÃO DE
RESÍDUOS



SUSTENTABILIDADE
E DESEMPENHO



MEIO AMBIENTE
E RESPONSABILIDADE

ORGANIZADORES

Ricky Wochner Lopes

Cayttano Saul De Sá Zarpellon

Ana Maria De Lima

Karina Luzia Andrade

Letícia Alves Da Costa Laqua

Martha Tussolini

Ana Heloísa Maia

Luciano Aparecido De Oliveira

Ana Rigel Santos Souza

Leticia Gabrielle de Pinho e Silva

Gildete Evangelista da Silva

Gabrielle Darc Banczek



Periferia
EDITORA ACADÊMICA



CONSTRUIR
COM CIÊNCIA,
GERIR COM
RESPONSABILIDADE.

AVALIAÇÃO TÉCNICA E GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

NA CONSTRUÇÃO CIVIL



AVALIAÇÃO
TÉCNICA



GESTÃO DE
RESÍDUOS



SUSTENTABILIDADE
E DESEMPENHO



MEIO AMBIENTE
E RESPONSABILIDADE

ORGANIZADORES

Ricky Wochner Lopes

Cayttano Saul De Sá Zarpellon

Ana Maria De Lima

Karina Luzia Andrade

Letícia Alves Da Costa Laqua

Martha Tussolini

Ana Heloísa Maia

Luciano Aparecido De Oliveira

Ana Rigel Santos Souza

Leticia Gabrielle de Pinho e Silva

Gildete Evangelista da Silva

Gabrielle Darc Banczek



Perseus
EDITORA TÉCNICA



CONSTRUIR
COM CIÊNCIA,
GERIR COM
RESPONSABILIDADE.

Conselho Editorial

Abas Rezaey

Izabel Ferreira de Miranda

Ana Maria Brandão

Leides Barroso Azevedo Moura

Fernado Ribeiro Bessa

Luiz Fernando Bessa

Filipe Lins dos Santos

Manuel Carlos Silva

Flor de María Sánchez Aguirre

Renísia Cristina Garcia Filice

Isabel Menacho Vargas

Rosana Boullosa

Projeto Gráfico, editoração, capa

Editora Acadêmica Periodicojs

Idioma

Português

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Lopes, Ricky Wochner

Viabilidade técnica e análise estatística da substituição do agregado miúdo por resíduo de matriz cimentícia em concreto com função estrutural [livro eletrônico] / Ricky Wochner Lopes. -- João Pessoa, PB : Periodicojs, 2026.

PDF

Orientador: Cayttano Saul de Sá Zarpellon

Bibliografia

ISBN 978-65-6010-227-9

1. Construção civil 2. Engenharia civil 3.
Resíduos sólidos I. Título.

26-367642.0

CDD-624

Índices para catálogo sistemático:

1. Construção civil : Engenharia 624

Maria Alice Ferreira - Bibliotecária - CRB-8/7964



Filipe Lins dos Santos
Presidente e Editor Sênior da Periodicojs

CNPJ: 39.865.437/0001-23

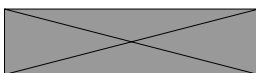
Rua Josias Lopes Braga, n. 437, Bancários, João Pessoa - PB - Brasil
website: www.periodicojs.com.br
instagram: [@periodicojs](https://www.instagram.com/periodicojs)

Prefácio



O concreto é o segundo material mais utilizado no mundo, ficando atrás apenas da água em volume de consumo. De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2020), estima-se que o concreto represente aproximadamente 80% do volume total de materiais empregados na construção civil, evidenciando sua relevância e o impacto ambiental associado à sua produção.

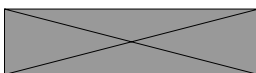
Esse material é composto essencialmente por cimento, água e agregados, podendo conter aditivos que modificam suas propriedades físicas e químicas. As principais características do concreto incluem resistência à compressão, durabilidade, trabalhabilidade e capacidade de moldagem, fatores indispensáveis para o desempenho estrutural e a segurança das construções. A adequada proporção entre os componentes é determinante para



essas propriedades, conforme estabelecido nos métodos de dosagem, entre eles o proposto pela ABCP.

Durante o processo de concretagem, o concreto passa por dois estados distintos: o estado fresco, no qual apresenta plasticidade e pode ser moldado, e o estado endurecido, quando adquire rigidez e resistência em decorrência das reações de hidratação do cimento. O controle dessas fases é fundamental para garantir a qualidade e o desempenho da estrutura final.

Nos últimos anos, a preocupação com a sustentabilidade na construção civil tem impulsionado pesquisas sobre o reaproveitamento de resíduos. A utilização de resíduos de construção e demolição (RCD) como agregados reciclados surge como uma alternativa promissora à extração de materiais naturais. Contudo, essa prática pode alterar características fundamentais do concreto, como a resistência e a durabilidade, exigindo estudos laboratoriais que comprovem sua viabilidade técnica (Cabral, 2007; Silva; Brito, 2010). Entre os resíduos com potencial de reaproveitamento destaca-se o resíduo

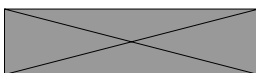


de matriz cimentícia (RMC), originado de sobras de concretagem, demolições e blocos estruturais descartados.

A destinação inadequada desses materiais provoca impactos ambientais, como o uso ineficiente de recursos naturais e a contaminação do solo e da água. A reciclagem e a reutilização desses resíduos contribuem diretamente para a redução desses impactos e para o avanço da economia circular na construção civil (Alberte; Iglesias, 2019).

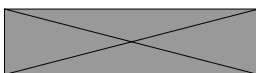
Nesse contexto, torna-se essencial avaliar experimentalmente o comportamento do concreto quando parte dos agregados naturais é substituída por resíduos reciclados. Essa substituição pode proporcionar benefícios ambientais e econômicos, desde que mantenha a integridade estrutural do material. Assim, este estudo propõe a análise da substituição do agregado miúdo natural por resíduo de material de concreto, buscando compreender os efeitos dessa modificação nas propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido.

Dessa forma, o presente trabalho contribui para o desenvolvimento de concretos sustentáveis, valorizando o



reaproveitamento de resíduos e promovendo o uso racional dos recursos naturais.

Dos autores



Sumário

INTRODUÇÃO

10

Capítulo 1

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

16

Capítulo 2

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

54

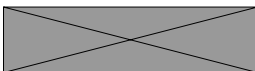
Capítulo 3

RESULTADOS E DISCUSSÃO

89

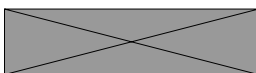
Considerações finais

120



Referências bibliográficas

130



INTRODUÇÃO

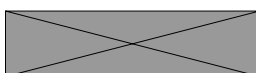


CONSTRUIR
COM CIÊNCIA,
GERIR COM
RESPONSABILIDADE.

O presente estudo tem como ponto de partida o trabalho desenvolvido por Zarpellon *et al.* (2024), Gestão de resíduos provenientes de matrizes cimentícias na produção de concreto estrutural, o qual se destacou como referência relevante para a continuidade desta pesquisa. Observa-se, entretanto, que a literatura ainda apresenta lacunas significativas quanto à substituição do agregado miúdo na produção de concreto utilizando resíduos de blocos estruturais.

Essa escassez de estudos específicos reforça a importância de aprofundar a investigação experimental sobre o tema. A presente pesquisa busca contribuir para o avanço do conhecimento científico, validando e ampliando os resultados obtidos por Zarpellon *et al.* (2024), além de verificar o comportamento do concreto produzido com diferentes percentuais de substituição do agregado miúdo natural por RMC.

No estudo experimental conduzido por Zarpellon *et al.* (2024), foi realizada a substituição progressiva do agregado miúdo natural (areia) por RMC em incrementos

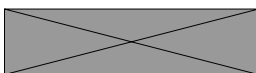


de 10%, variando de 0% a 100%, mantendo-se as demais proporções de materiais constantes. O autor verificou que, entre 10% e 30%, houve melhora na consistência e aumento gradual da resistência à compressão.

Entre 40% e 70%, contudo, observou-se redução nessas propriedades. De forma não usual, no intervalo de 80% a 100%, ocorreu um aumento expressivo da resistência, cerca de 46% superior ao traço de referência. Essa variação atípica sugere a necessidade de nova análise experimental, a fim de verificar a reprodutibilidade dos resultados e identificar os fatores que podem ter influenciado o ganho de resistência.

Dessa forma, o presente trabalho propõe a substituição gradual agregado miúdo natural por RMC de 0 a 100%, variando em 10 %, buscando validar e reproduzir os estudos propostos por Zarpellon *et al.* (2024), afim de encontrar um teor ótimo de substituição contribuindo para a consolidação de parâmetros mais confiáveis na incorporação de RMC em concretos.

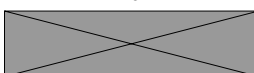
Outros pesquisadores também identificaram



potencial na modificação da composição granulométrica do agregado miúdo para otimizar o desempenho mecânico do concreto. Haddad *et al.* (2016) observaram que o controle da distribuição e da forma das partículas influencia diretamente a densidade e a resistência do compósito, enquanto Frotté *et al.* (2017) verificaram desempenho semelhante ao concreto de referência com 50% de substituição.

Esses resultados reforçam a importância de identificar faixas de substituição que conciliem resistência mecânica e sustentabilidade. A redução do consumo de matérias-primas naturais e o reaproveitamento de resíduos de construção e demolição (RCD) contribuem diretamente para a sustentabilidade na construção civil, minimizando impactos ambientais e promovendo o uso racional de recursos (Alberte; Iglesias, 2019).

Além de seus benefícios ambientais, a reciclagem de RCD estimula cadeias produtivas locais e reduz custos com transporte e destinação de resíduos. Com isso, consolida-se como prática ambiental e economicamente vantajosa, alinhada à busca por concretos de baixo impacto.



Assim, a relevância deste estudo está em validar experimentalmente a viabilidade técnica da substituição do agregado miúdo natural por RMC em altos percentuais, fortalecendo práticas sustentáveis no setor e incentivando o uso de materiais reciclados na produção de concretos de baixo impacto ambiental.

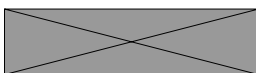
OBJETIVOS

Objetivo Geral

Verificar as propriedades do concreto simples produzido a partir da substituição do agregado miúdo natural por resíduo de matriz cimentícia (RMC), por meio de ensaios laboratoriais, de modo a avaliar sua viabilidade técnica e comparar os resultados obtidos com os estudos anteriores, especialmente o de Zarpellon *et al.* (2024).

Objetivos Específicos

Estudar as alterações nas propriedades do concreto

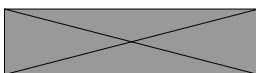


nos estados fresco e endurecido decorrentes da substituição do agregado miúdo por RMC;

Analisar as vantagens e limitações associadas à incorporação de resíduos de material de concreto na matriz cimentícia;

Identificar o teor ótimo de substituição que proporcione equilíbrio adequado entre trabalhabilidade e resistência à compressão;

Propor a reprodutibilidade dos resultados observados por Zarpellon *et al.* (2024) em condições laboratoriais controladas, validando a metodologia proposta.



Capítulo

1

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

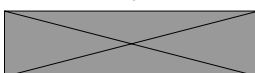


CONSTRUIR
COM CIÊNCIA,
GERIR COM
RESPONSABILIDADE.

AGREGADO MIÚDO RECICLADO DE MATRIZ CIMENTÍCIA (RMC)

O desenvolvimento sustentável, conforme definido pela Agenda 2030 da ONU, fundamenta-se em 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) voltados à erradicação da pobreza, proteção ambiental e prosperidade global. Entre esses objetivos, o ODS 12 - Consumo e Produção Responsáveis tem papel central na gestão racional dos recursos naturais, buscando garantir o uso eficiente de matérias-primas, energia e insumos em todos os estágios do ciclo produtivo.

De acordo com Trummer, Ammerer e Scherz (2022), o ODS 12 e, particularmente, sua Meta 12.2 enfatizam a necessidade de reduzir o consumo de matérias-primas primárias por meio da economia circular, da reutilização e da reciclagem. A estratégia europeia de materiais, alinhada ao Pacto Verde Europeu, destaca que o reaproveitamento de resíduos e a ampliação do uso de materiais secundários são essenciais para a mitigação dos impactos ambientais e a



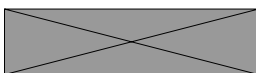
manutenção da competitividade industrial.

Nessa perspectiva, a incorporação de resíduos de materiais cimentícios (RMC) na produção de concreto apresenta-se como prática coerente com o ODS 12, pois favorece a diminuição da extração de agregados naturais e promove o fechamento do ciclo de uso dos recursos. Estudos recentes indicam que a aplicação de princípios de economia circular na cadeia de agregados pode reduzir significativamente a pegada de carbono e o consumo de energia na construção civil (Ferreira *et al.*, 2022).

Assim, o aproveitamento de RMC contribui diretamente para o cumprimento das metas de consumo e produção sustentáveis e para o avanço de uma construção mais eficiente e ambientalmente responsável

Massa Específica e Substituição Volumétrica

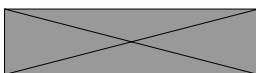
O uso do resíduo de matriz cimentícia (RMC) como agregado miúdo reciclado tem sido amplamente investigado, sobretudo por sua influência na densidade e,



consequentemente, na dosagem volumétrica de concretos e argamassas. Em geral, o RMC apresenta massa específica inferior à dos agregados naturais, devido à presença de pasta de cimento aderida e à maior porosidade resultante do processo de britagem (Nedljković *et al.*, 2021).

Segundo Nedljković *et al.* (2021), a densidade dos agregados miúdos reciclados varia conforme a origem do concreto e o método de britagem, sendo comum observar valores entre 1,9 gramas por centímetro cúbico (g/cm^3) e 2,5 g/cm^3 , enquanto os agregados naturais apresentam valores próximos de 2,6 g/cm^3 a 2,7 g/cm^3 . Essa diferença interfere diretamente no cálculo volumétrico do traço, uma vez que, para manter o mesmo volume sólido, é necessário ajustar a massa correspondente de RMC.

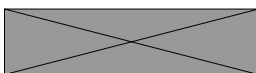
Complementando, Larsen *et al.* (2020) relataram massa específica de 1,9 g/cm^3 e absorção de 3,8% para agregados reciclados provenientes de demolições em Moscou, confirmando o efeito da argamassa aderida sobre a densidade e a absorção de água. Já Junior *et al.* (2025) observaram, em uma revisão sistemática, que a massa



específica média dos agregados reciclados situa-se entre 1,91 g/cm³ e 2,70 g/cm³, com média global de 2,32 g/cm³, valores que reforçam a necessidade de correção volumétrica nas misturas.

Essa característica implica ajustes no método de dosagem, sobretudo quando se adota a substituição volumétrica. Como destacam Mahmood, Nanos e Begg (2024), a substituição em volume, e não em massa, tende a produzir resultados mais consistentes, já que compensa as diferenças de densidade entre o agregado natural e o reciclado. No estudo, argamassas com 50 % de substituição de agregado reciclado fino apresentaram resistência à compressão de 63,1 megapascal (MPa), próxima à obtida com areia natural (66,2 MPa), evidenciando a viabilidade técnica da substituição parcial.

Resultados semelhantes foram obtidos por Neno, Brito e Veiga (2014), ao substituírem a areia natural por RMC em proporções de 20 %, 50 % e 100 %. Observou-se que o traço com 20 % de substituição apresentou desempenho geral superior ao de referência em quase todos os parâmetros

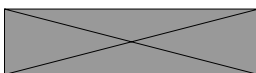


de trabalhabilidade e resistência, confirmando o potencial técnico do material desde que a substituição seja limitada e controlada volumetricamente.

Dessa forma, observa-se consenso entre autores recentes de que a menor massa específica e maior absorção de água do RMC exigem correções volumétricas e eventuais pré-tratamentos (saturação ou lavagem). Quando esses ajustes são observados, o agregado miúdo reciclado pode substituir parcialmente o natural em níveis de até 50 %, sem prejuízo significativo às propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto.

Porosidade e Absorção de Água do RMC

A utilização do resíduo de matriz cimentícia (RMC) como agregado miúdo reciclado implica alterações significativas nas propriedades físicas do concreto, principalmente quanto à porosidade e à absorção de água. Tais características afetam diretamente o comportamento mecânico e a durabilidade do material, sendo, portanto,

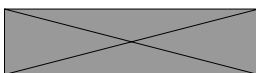


parâmetros essenciais para avaliar a viabilidade técnica do uso de RMC em substituição ao agregado miúdo natural (Nedljković *et al.*, 2021).

Segundo Evangelista e Brito (2015), os agregados miúdos reciclados apresentam maior teor de poros interconectados e capilares, o que favorece a penetração de agentes agressivos e compromete a durabilidade das misturas cimentícias. Larsen *et al.* (2020) ressaltam que a maior porosidade observada em agregados reciclados, aliada à absorção elevada, reduz a compacidade da mistura e altera o comportamento do concreto no estado fresco.

De forma semelhante, Junior *et al.* (2025) identificaram, em revisão sistemática, que os agregados provenientes de resíduos cimentícios apresentam estrutura interna menos densa, o que eleva o índice de vazios e influencia negativamente as propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto.

A absorção de água do RMC está diretamente associada à sua porosidade. Agregados reciclados com argamassa residual e elevada microfissuração podem

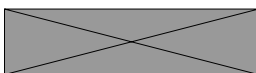


apresentar absorção variando de 2 % a 15 %, enquanto os agregados naturais raramente ultrapassam 2 % (Zhang *et al.*, 2023).

Evangelista e Brito (2015) observaram valores médios próximos de 10 % de absorção para agregados miúdos reciclados após 24 h de imersão, resultado diretamente relacionado à elevada porosidade e à rugosidade superficial das partículas. Mahmood, Nanos e Begg (2024) destacam que essa característica tem impacto direto na relação água/cimento efetiva (a/c) do concreto.

Conforme García-González *et al.* (2014), agregados reciclados que não passam por pré-saturação tendem a absorver parte da água de amassamento destinada à hidratação do cimento, o que reduz a trabalhabilidade e a resistência à compressão do concreto. A técnica de pré-saturação mostrou-se eficiente para mitigar essa absorção, mantendo as propriedades mecânicas dentro de níveis aceitáveis.

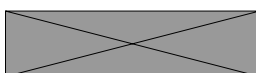
Estudo conduzido por Li *et al.* (2023) reforça que o controle da absorção do RMC é fundamental para



garantir desempenho uniforme. Os autores constataram que o tratamento superficial ou a pré-saturação do agregado reciclado reduzem consideravelmente a absorção de água e melhoram a coesão da mistura. Assim, a compensação hídrica e a substituição volumétrica correta são medidas indispensáveis para evitar variações indesejadas na consistência e na resistência do concreto.

A porosidade e a capacidade de absorção de água do resíduo de matriz cimentícia (RMC) exercem influência direta sobre sua viabilidade como agregado substituto do agregado natural. Quando o material apresenta altos teores de argamassa aderida e maior quantidade de microvazios, tende a absorver mais água e a apresentar menor densidade aparente, fatores que repercutem na consistência e no desempenho do concreto.

Estudos de Gomes *et al.* (2023) reforçam essa relação, apontando que o grau de porosidade e o teor de argamassa remanescente determinam a quantidade de água efetivamente disponível para a hidratação do cimento, afetando propriedades como trabalhabilidade, resistência e

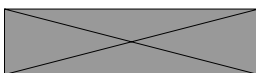


durabilidade. Esses autores destacam ainda que o emprego de técnicas de pré-saturação e o ajuste da relação água/cimento (a/c), aliados a processos de beneficiamento físico do agregado, contribuem para reduzir a absorção e melhorar o desempenho das misturas.

Dessa forma, o uso do RMC exige um controle criterioso das proporções e da umidade inicial do material, permitindo a obtenção de concretos reciclados com comportamento compatível ao do concreto convencional, além de vantagens ambientais associadas ao reuso de resíduos na construção civil.

Argamassa Aderida Como Fator Limitante

A argamassa aderida remanescente nas partículas do RMC é amplamente reconhecida como o principal fator limitante para o desempenho dos agregados reciclados. Essa camada residual aumenta a porosidade e a absorção de água, reduzindo a densidade e prejudicando a aderência entre o agregado e a nova matriz cimentícia (Wang *et al.*,

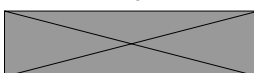


2021).

Em agregados graúdos, o teor de argamassa aderida pode representar até 40 % da massa total, comprometendo a resistência à compressão e à tração do concreto (Letelier; Fernández, 2017). Em agregados miúdos, o efeito é ainda mais expressivo, uma vez que a elevada área superficial intensifica o impacto da argamassa remanescente sobre as propriedades físicas e reológicas do material.

Estudo nacional conduzido por Santana e Pereira (2020) verificou que a presença da argamassa aderida influencia diretamente o desempenho das argamassas estabilizadas, elevando a absorção de água e reduzindo a resistência mecânica. Os autores destacam que o tratamento prévio do agregado reciclado, seja por lavagem, peneiramento ou abrasão, resulta em melhora significativa na trabalhabilidade e na densidade do compósito.

Assim, o controle do teor de argamassa aderida é essencial para o uso estrutural do RMC. Recomenda-se que se realize a caracterização quantitativa dessa fração e que, sempre que possível, sejam adotados métodos de



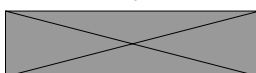
remoção ou compensação da relação água/cimento (a/c). Tais medidas são fundamentais para garantir o desempenho e a durabilidade das misturas que utilizam agregado miúdo reciclado.

TRABALHABILIDADE E RMC

Efeito da Absorção de Água na Trabalhabilidade

A trabalhabilidade do concreto com substituição parcial de agregado miúdo natural por RMC está diretamente associada à elevada capacidade de absorção de água dos agregados reciclados. Essa característica decorre da presença de poros capilares abertos e da argamassa aderida às partículas, o que leva à rápida perda de fluidez da mistura e aumento da demanda por água ou aditivo plastificante (Santana; Pereira, 2020).

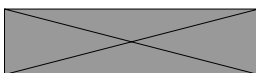
Segundo Evangelista e Brito (2010), a absorção de água é um dos principais fatores responsáveis pela redução do abatimento do concreto produzido com agregado miúdo reciclado. Os autores observaram que, mesmo pequenas



porcentagens de substituição, resultam em decréscimos significativos no ensaio de consistência, exigindo compensações na dosagem para manter o mesmo nível de trabalhabilidade.

Estudos mais recentes reforçam que o teor de absorção do RMC pode variar entre 5 % e 12 %, dependendo do tipo de resíduo e do método de beneficiamento empregado, influenciando diretamente o comportamento reológico da mistura (Mahmood; Nanos; Begg, 2024). A água absorvida durante o amassamento não contribui para o adensamento e hidratação do cimento, comprometendo a coesão e a homogeneidade da mistura (Letelier; Fernández, 2017).

Santana e Pereira (2020) verificaram que concretos produzidos com agregados reciclados apresentaram reduções médias de até 20 % no abatimento em comparação aos concretos convencionais. Contudo, apontam que o pré-umedecimento controlado dos agregados reciclados antes da mistura é uma alternativa eficaz para estabilizar a trabalhabilidade e reduzir a absorção inicial de água,



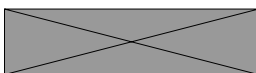
evitando retrações plásticas excessivas.

Portanto, compreender o comportamento de absorção de água do RMC é essencial para ajustar a relação água/cimento e definir a consistência adequada do concreto. O controle desse parâmetro garante o desempenho no estado fresco e previne variações indesejáveis na resistência e durabilidade do material.

Rugosidade Superficial e Atrito Interno

A rugosidade superficial das partículas de Agregado Miúdo Reciclado (RMC) influencia diretamente o atrito interno e o comportamento reológico da mistura, afetando tanto a trabalhabilidade quanto a coesão do concreto.

Estudos recentes indicam que os agregados reciclados tendem a apresentar textura mais áspera e superfície irregular em comparação aos agregados naturais, devido à presença da argamassa aderida e às fraturas originadas durante o processo de britagem (Bastidas-

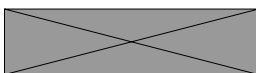


Martínez *et al.*, 2025).

Em concretos produzidos com RMC, essa rugosidade acentuada pode favorecer o travamento mecânico entre as partículas, reduzindo a fluidez da mistura e exigindo o uso de maior quantidade de aditivo plastificante ou de água para manter a consistência adequada. Nos ensaios realizados por Neno; Brito e Veiga (2014), observou-se que a substituição parcial do agregado natural por agregado reciclado, mesmo mantendo a equivalência volumétrica, resultou em redução significativa do abatimento e da trabalhabilidade.

No contexto brasileiro, Estolano *et al.* (2025) analisaram a influência da rugosidade superficial dos agregados reciclados sobre a aderência com a matriz cimentícia e verificaram que o aumento da irregularidade superficial está diretamente relacionado ao aumento do atrito interno e à resistência à deformação plástica. Os autores destacam que, apesar de a rugosidade melhorar a ancoragem mecânica entre as fases, o excesso de irregularidade pode comprometer o comportamento no estado fresco.

A rugosidade superficial das partículas de

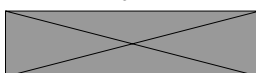


agregado miúdo reciclado (RMC) influencia tanto o atrito interno quanto o comportamento reológico da mistura — isso impacta diretamente a trabalhabilidade e a coesão do concreto. Estudos recentes apontam que os agregados reciclados tendem a exibir superfícies mais porosas e fissuradas em comparação aos agregados naturais, resultado da argamassa aderida e das fraturas geradas no processo de britagem (Abdo *et al.*, 2024).

Por isso, o controle da textura superficial e da granulometria dos agregados reciclados mostra-se essencial para garantir uma trabalhabilidade satisfatória, especialmente quando se emprega tratamento prévio do agregado, visando reduzir a porosidade e a absorção de água da mistura.

Estratégias de Compensação de Água

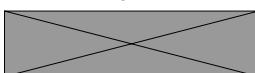
A incorporação de agregados miúdos reciclados (RMC) demanda ajustes no volume de água de amassamento devido à sua elevada absorção e porosidade. Uma das



soluções mais empregadas para manter a trabalhabilidade da mistura é a compensação de água, que consiste na adição de uma quantidade extra de água proporcional àquela que será absorvida pelos agregados durante a mistura (Sosa, 2021).

Estudos recentes apontam que o método mais eficiente de compensação consiste em considerar a absorção de água do RMC no estado saturado-superfície seca (SSD), subtraindo esse volume do cálculo da água efetiva destinada à hidratação do cimento. Essa prática assegura que a relação água/cimento real permaneça constante e evita a perda de fluidez durante o adensamento do concreto (Chen *et al.*, 2025).

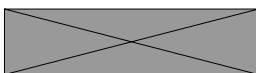
No cenário brasileiro, Rodrigues (2013) observou que o simples acréscimo de água à mistura, sem controle da condição de saturação do agregado, pode levar à segregação e ao sangramento. O autor enfatiza que “a simples adição de água extra sem controle da condição de saturação do agregado pode originar segregação e sangramento” (Rodrigues, 2013, p. 1047), destacando a importância do



pré-umedecimento dos agregados ou da introdução gradual da água compensatória durante o amassamento.

Além da compensação hídrica, recomenda-se empregar estratégias complementares, como o uso de aditivos superplastificantes para melhorar a fluidez sem acréscimo de água, a divisão da água de amassamento em parcela livre e parcela absorvida e o tratamento físico dos agregados por abrasão ou peneiramento, visando reduzir a absorção efetiva. Quando aplicadas de forma conjunta, essas medidas contribuem para misturas mais homogêneas e com abatimentos equivalentes aos obtidos com agregados naturais, sem comprometer o desempenho mecânico do concreto (Sosa, 2021; Chen *et al.*, 2025).

Assim, a definição de uma dosagem que considere a absorção, o grau de saturação e a compensação hídrica do RMC é fundamental para garantir a trabalhabilidade e a estabilidade da mistura, assegurando o desempenho estrutural e a sustentabilidade da aplicação de agregados reciclados.

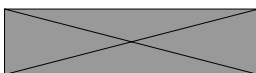


RESISTÊNCIA MECÂNICA COM RMC

Comportamento da Resistência com Baixos Teores

Pesquisas indicam que a substituição parcial do agregado natural por resíduo de matriz cimentícia (RMC) em baixos teores pode gerar concretos com desempenho mecânico satisfatório, especialmente quando a substituição é limitada a 10 % ou 20 %. Em estudo experimental, Santos, Azeredo e Veneu (2020) verificaram que concretos produzidos com frações moderadas de agregados reciclados apresentaram resistência à compressão média de 25,0 MPa, enquanto o concreto de referência atingiu 30,0 MPa, indicando uma redução limitada e viável para aplicações não estruturais.

De forma semelhante, Silva *et al.* (2015) observaram que concretos secos com substituição parcial de agregados naturais por reciclados obtiveram resistências à compressão comparáveis às do concreto de referência, sobretudo quando os resíduos foram processados por separação por densidade, técnica que reduziu a porosidade dos agregados e aumentou

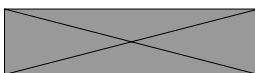


a compacidade da mistura. Segundo os autores, “a redução da porosidade do agregado reciclado e a otimização da granulometria da mistura seca foram os parâmetros mais importantes para o incremento de resistência observado” (Silva *et al.*, 2015, p. 335).

Esses resultados demonstram que a incorporação controlada de RMC em baixos teores pode manter a integridade estrutural do concreto, desde que haja controle rigoroso das propriedades físicas do agregado, principalmente absorção de água, densidade e fração de argamassa aderida. Assim, a utilização de RMC em teores reduzidos se consolida como alternativa sustentável e tecnicamente viável para a produção de concretos com desempenho mecânico adequado.

Redução de Resistência em Teores Elevados

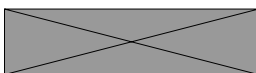
Com o aumento dos teores de substituição de agregado natural por Resíduo de Matriz Cimentícia (RMC), os efeitos negativos sobre a resistência à compressão do



concreto tornam-se progressivamente mais pronunciados. Tal comportamento decorre, sobretudo, da maior porosidade, da baixa densidade e da presença de argamassa aderida nas partículas recicladas, fatores que comprometem a coesão interna da mistura e a qualidade da zona de transição pasta-agregado (Evangelista; Brito, 2010).

Estudos recentes apontam que substituições acima de 30 % tendem a causar reduções significativas na resistência. Zarpellon *et al.* (2024) observaram que concretos estruturais com 40 %, 60 %, 80 % e 100 % de RMC apresentaram comportamentos distintos: entre 40 % e 70 % houve queda gradual da resistência e da consistência, enquanto entre 80 % e 100 % ocorreu aumento expressivo da resistência, mesmo com redução do abatimento, evidenciando a influência da granulometria e da absorção de água do agregado reciclado sobre o desempenho mecânico do concreto.

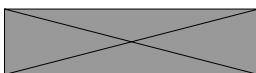
De modo semelhante, Santos, Azeredo e Veneu (2020) verificaram que, em substituições superiores a 50 %, a resistência à compressão reduziu-se de 30,0 MPa para



cerca de 23,0 MPa, mesmo mantendo a relação água/cimento constante. A elevada absorção do RMC foi apontada como o principal fator de redução da água efetiva para hidratação, o que aumentou a rigidez da mistura e reduziu a densidade da matriz.

Corroborando esses resultados, Zarpellon *et al.* (2024) verificaram que concretos produzidos com resíduos de blocos estruturais apresentaram desempenho satisfatório até o teor de 50 % de substituição do agregado miúdo natural, com aumento de aproximadamente 24,6 % na resistência à compressão em relação ao traço de referência e abatimento de 80 mm, valor considerado adequado segundo o método de dosagem da ABCP. Os autores destacam que teores superiores não promoveram ganhos significativos de resistência, indicando que a presença de argamassa aderida e a heterogeneidade dos resíduos podem comprometer o comportamento mecânico e a uniformidade da mistura.

Silva *et al.* (2015) reforçam que, em níveis altos de RMC, a interface entre o agregado reciclado e a pasta



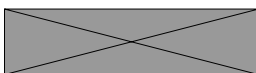
de cimento torna-se o ponto crítico de fragilidade, uma vez que as irregularidades superficiais e a argamassa residual favorecem a formação de microfissuras e zonas de baixa aderência.

Dessa forma, embora o aumento do teor de RMC proporcione ganhos ambientais expressivos, sua aplicação em teores elevados deve ser cuidadosamente avaliada. A redução de resistência observada acima de 30 % evidencia a necessidade de controle rigoroso da absorção, beneficiamento do agregado e compensação da água de amassamento, a fim de garantir desempenho compatível com os requisitos estruturais estabelecidos pelas normas brasileiras.

DURABILIDADE

Relação Entre Porosidade e Durabilidade do Concreto

A porosidade do concreto é um dos principais parâmetros determinantes de sua durabilidade, pois controla a penetração de agentes agressivos, como água, íons cloreto,



dióxido de carbono e sulfatos. Segundo Neville (2016), concretos mais porosos apresentam maior permeabilidade e, conseqüentemente, maior suscetibilidade à corrosão das armaduras e à deterioração prematura. A conectividade dos poros e sua distribuição dentro da matriz cimentícia são fatores críticos, pois definem o caminho de transporte dos fluidos e a velocidade de difusão dos agentes agressivos.

Concretos densos e bem compactados tendem a apresentar menor permeabilidade e, portanto, maior resistência à carbonatação e à lixiviação. Mehta e Monteiro (2008) reforçam que a redução da relação água/cimento, a adequada cura úmida e o uso de adições minerais contribuem para o refinamento da microestrutura e a diminuição do volume de poros capilares. Assim, há uma relação inversa entre porosidade e durabilidade: quanto menor o volume de vazios interconectados, maior a resistência do concreto à penetração de substâncias agressivas e à deterioração química e física.

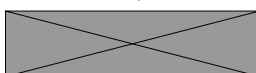
No caso de concretos produzidos com resíduo de matriz cimentícia (RMC), essa relação se torna ainda mais



relevante. A argamassa aderida aos agregados reciclados aumenta a porosidade total da mistura e favorece a formação de microcanais interligados, que reduzem a resistência à penetração de água e íons (Letelier; Fernández, 2017). Evangelista e Brito (2010) verificaram que a utilização de agregado miúdo reciclado elevou a absorção capilar e a profundidade de carbonatação, evidenciando a influência direta da porosidade na durabilidade do compósito.

De forma semelhante, Zarpellon *et al.* (2024) observou que concretos produzidos com elevados teores de substituição de RMC apresentaram aumento da variação de massa após ciclos de umedecimento e secagem, evidenciando maior permeabilidade e porosidade da matriz. O autor relaciona esse comportamento à presença de argamassa aderida e à heterogeneidade dos resíduos, fatores que reduzem a capacidade do concreto em resistir à penetração de água e agentes agressivos, comprometendo sua durabilidade e desempenho em longo prazo.

Dessa forma, verifica-se que a porosidade atua como parâmetro crítico de desempenho: concretos com

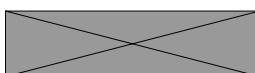


RMC exigem controle rigoroso do beneficiamento do agregado, da relação água/cimento e da cura, a fim de limitar a formação de vazios interligados. Estratégias como pré-umedecimento, adições pozolânicas e tratamentos superficiais dos agregados reciclados têm se mostrado eficazes para reduzir a porosidade e aumentar a durabilidade global do concreto reciclado.

Suscetibilidade à Carbonatação e Cloretos

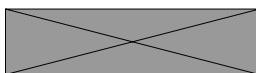
A durabilidade do concreto está diretamente relacionada à sua capacidade de resistir à penetração de gases e íons agressivos. Entre os principais agentes deteriorantes, destacam-se o dióxido de carbono (CO_2) e os íons cloreto (Cl_2), responsáveis, respectivamente, pela carbonatação e pela corrosão das armaduras. Esses fenômenos estão intimamente ligados à porosidade e à permeabilidade da matriz cimentícia, que determinam a taxa de difusão dos agentes agressivos no interior do concreto (Neville, 2016).

A carbonatação ocorre quando o CO_2 atmosférico



reage com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) presente na pasta de cimento, formando carbonato de cálcio (CaCO_2). Essa reação reduz o pH do concreto, despassivando o aço e acelerando o processo de corrosão (Mehta; Monteiro, 2008). Já a penetração de cloretos atua de forma mais direta, promovendo a ruptura da camada passivadora do aço mesmo em concretos não carbonatados, especialmente em ambientes marinhos ou sujeitos a respingos de sais descongelantes.

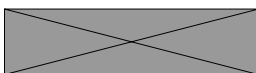
No caso dos concretos com resíduo de matriz cimentícia (RMC), a suscetibilidade à carbonatação e à penetração de cloretos tende a ser superior à dos concretos convencionais, devido à maior porosidade e à presença de argamassa aderida nos agregados reciclados. Evangelista e Brito (2010) verificaram que a profundidade de carbonatação aumentou significativamente em concretos com agregado miúdo reciclado, sendo proporcional ao teor de substituição. Segundo os autores, a maior área superficial e a microestrutura mais permeável dos agregados reciclados favorecem o avanço do CO_2 na matriz.



Estudo conduzido por Zarpellon *et al.* (2024) confirmou que a redução da durabilidade frente à carbonatação e cloretos está associada à falta de continuidade da matriz e à deficiência na zona de transição pasta-agregado. O pesquisador concluiu que o pré-umedecimento dos agregados reciclados e o uso de adições minerais finas, como sílica ativa, são estratégias eficazes para reduzir a permeabilidade e retardar o avanço desses agentes.

Dessa forma, observa-se que a durabilidade do concreto está fortemente condicionada à sua porosidade e à continuidade da matriz cimentícia. Conforme demonstrado pelos estudos analisados, concretos com maior densidade e melhor compactação apresentam menor permeabilidade e, conseqüentemente, maior resistência à ação de agentes agressivos.

No caso dos concretos com RMC, a presença de argamassa aderida e a heterogeneidade dos resíduos ampliam a rede de poros interconectados, favorecendo a difusão de CO_2 e de íons cloreto. Assim, o controle da relação água/cimento, a adequada cura e o uso de adições

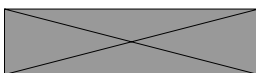


minerais finas, como observado por Zarpellon *et al.* (2024), mostram-se fundamentais para mitigar a penetração desses agentes e aumentar a vida útil das estruturas em concreto reciclado.

O CONCRETO E SUAS PROPRIEDADES FUNDAMENTAIS

O concreto é um dos materiais de construção mais utilizados no mundo, devido à sua versatilidade, resistência e viabilidade econômica. Trata-se de um composto formado por cimento, água e agregados, podendo conter aditivos e adições minerais que alteram suas propriedades físicas e químicas (Mehta; Monteiro, 2008).

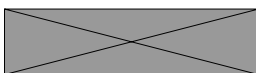
As propriedades do concreto variam conforme a proporção e a qualidade dos seus constituintes, influenciando diretamente sua durabilidade, resistência à compressão, permeabilidade e trabalhabilidade (Neville, 2016). As adições minerais, como sílica ativa, cinza volante e metacaulim, são amplamente empregadas para aprimorar



essas propriedades e contribuir para a sustentabilidade do material.

Segundo Couto *et al.* (2013), a correta dosagem dos materiais é essencial para o desempenho do concreto, visto que pequenas variações na relação água/cimento (a/c) podem alterar significativamente a resistência final. A fase de hidratação do cimento é responsável pela formação dos compostos que conferem coesão e rigidez à matriz cimentícia.

A sustentabilidade na produção de concreto tem se tornado uma exigência crescente no cenário atual, uma vez que a extração de agregados naturais representa uma das maiores fontes de degradação ambiental associadas à construção civil (Tutikian e Helene, 2022). Dessa forma, compreender as propriedades fundamentais do concreto é essencial para o desenvolvimento de composições mais eficientes e ambientalmente responsáveis, tema aprofundado nos subtópicos seguintes.

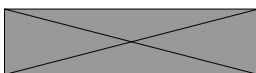


RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) E O RESÍDUO DE MATRIZ CIMENTÍCIA (RMC)

Os resíduos de construção e demolição (RCD) correspondem a uma fração significativa dos resíduos sólidos urbanos, podendo representar até 60% do total gerado em municípios de médio porte (Nogueira, 2013). Esses resíduos incluem fragmentos de concreto, argamassas, blocos, cerâmicas e solos provenientes de obras e demolições.

Entre os RCD, o resíduo de matriz cimentícia (RMC), proveniente de sobras de concretagem, blocos estruturais descartados e demolições, apresenta elevado potencial de reaproveitamento como agregado reciclado (Cabral, 2007). Devido à sua composição mineralógica semelhante à do concreto convencional, o RMC pode ser reintroduzido na cadeia produtiva após trituração e peneiramento, substituindo parcial ou totalmente os agregados naturais.

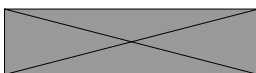
Entretanto, o uso do RMC ainda enfrenta desafios



técnicos, como a variabilidade das propriedades físicas e a presença de materiais contaminantes, que podem afetar a durabilidade e a trabalhabilidade do concreto (Silva; Brito, 2010). Por isso, torna-se fundamental o controle da granulometria, da absorção de água e da densidade do material reciclado, conforme recomenda a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 7211 (ABNT, 2022) – Agregados para concreto – Requisitos. A caracterização detalhada desses resíduos é fundamental para sua aplicação em concretos reciclados, conforme será abordado no subtópico seguinte.

PESQUISAS SOBRE INCORPORAÇÃO DE RMC NA PRODUÇÃO DE CONCRETOS

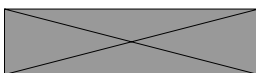
Diversos estudos vêm avaliando o desempenho do concreto produzido com agregados reciclados de RMC, com resultados que variam de acordo com o tipo de resíduo e o percentual de substituição empregado. Haddad *et al.* (2016) verificaram que o controle da granulometria do



agregado miúdo influencia diretamente o empacotamento de partículas e a densidade do compósito, resultando em melhores valores de resistência à compressão e coesão interna quando há adequada distribuição das frações finas. De modo semelhante, Frotté *et al.* (2017) observaram comportamento próximo ao do concreto de referência para substituições de 50%, sem prejuízo significativo da trabalhabilidade.

Por outro lado, Cabral (2007) identificou que altos teores de substituição podem elevar a porosidade e reduzir a densidade do concreto, devido à absorção de água mais elevada do agregado reciclado. No entanto, estudos realizados por Evangelista e Brito (2010) demonstraram que, com ajustes na relação água/cimento e na granulometria, é possível manter propriedades mecânicas satisfatórias mesmo em concretos com até 50 % de substituição do agregado natural por reciclado.

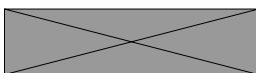
Zarpellon *et al.* (2024) realizou pesquisa experimental semelhante, utilizando resíduos de matriz cimentícia (RMC) na substituição do agregado miúdo e



brita como agregado graúdo. Os resultados mostraram que a substituição de 50 % do agregado miúdo resultou em um ganho de 24,57 % na resistência à compressão, atingindo 22,5 MPa, e apresentou abatimento de 80 mm, o que indica boa trabalhabilidade.

Tais resultados reforçam a viabilidade técnica da incorporação de resíduos de blocos estruturais na matriz do concreto e corroboram estudos anteriores que apontam o intervalo entre 40 % e 60 % como o mais equilibrado entre resistência e consistência. Em pesquisa mais recente, Zarpellon *et al.* (2024) também avaliou diferentes teores de substituição, variando de 0 % a 100 %, utilizando seixo rolado como agregado graúdo. O autor observou comportamento não linear, com incremento de resistência na faixa de 80% a 100 %.

A comparação entre as duas pesquisas, Zarpellon *et al.* (2024) revela a importância da natureza do agregado graúdo: a brita, por possuir superfície mais angular e rugosa, tende a favorecer a aderência pasta-agregado, resultando em resistência superior; enquanto o seixo rolado, de textura



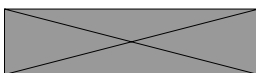
lisa e arredondada, contribui para maior trabalhabilidade, porém menor resistência.

Essas pesquisas evidenciam o potencial técnico do uso de RMC como substituto do agregado miúdo e ressaltam que o tipo de agregado graúdo influencia diretamente o desempenho final do concreto, devendo ser considerado em futuras formulações e comparações de traços sustentáveis.

ASPECTOS AMBIENTAIS E SUSTENTÁVEIS DA UTILIZAÇÃO DO RMC

A incorporação de resíduos reciclados em concretos está alinhada aos princípios da economia circular, promovendo o reaproveitamento de materiais e a redução da extração de recursos naturais. Alberte e Iglesias, 2019 destacam que essa prática contribui para o desenvolvimento sustentável da construção civil, reduzindo o consumo de energia, as emissões de CO₂ e o volume de resíduos destinados a aterros.

Além dos benefícios ambientais, o uso de RMC

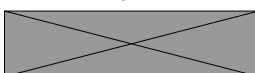


também apresenta vantagens econômicas, como a diminuição de custos com transporte e destinação de resíduos, bem como a possibilidade de criação de cadeias produtivas locais para o beneficiamento do material reciclado (Pereira; Lima; Castro, 2022). Esses fatores reforçam a viabilidade do RMC como alternativa sustentável frente aos agregados naturais.

De acordo com o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2017), cerca de 75% dos resíduos da construção civil no Brasil ainda são destinados a aterros, sem reaproveitamento adequado. A ampliação do uso de resíduos reciclados, como o RMC, representa uma oportunidade concreta para reduzir esses índices e mitigar os impactos ambientais do setor.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) estabelece a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, incentivando a reutilização e a reciclagem de materiais.

Nesse contexto, o emprego do RMC como substituto do agregado natural configura uma alternativa sustentável e tecnicamente viável, atendendo aos princípios da



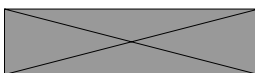
legislação ambiental vigente e às metas de desenvolvimento sustentável propostas pela ONU, especialmente os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 11 e 12), que tratam de cidades sustentáveis e padrões responsáveis de consumo e produção.

Dessa forma, observa-se que a utilização do RMC representa não apenas uma alternativa técnica, mas também uma estratégia ambiental consolidada, justificando sua aplicação experimental descrita na sequência.

SÍNTESE DA REVISÃO

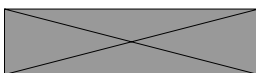
A revisão bibliográfica demonstra que o uso de resíduos de matriz cimentícia (RMC) na produção de novos traços é uma alternativa promissora, tanto do ponto de vista técnico quanto ambiental. Os estudos analisados indicam resultados positivos para faixas moderadas de substituição, com manutenção da resistência e da trabalhabilidade, conforme observado por diversos autores da área.

Apesar desses avanços, ainda há divergências



quanto ao comportamento do concreto em substituições elevadas, especialmente relacionadas à absorção e à durabilidade (Evangelista; Brito, 2010). Tais inconsistências reforçam a importância de estudos que analisem experimentalmente o desempenho do concreto produzido com altos percentuais de RMC, com foco na resistência à compressão e na trabalhabilidade.

Assim, o presente trabalho busca contribuir para a consolidação de parâmetros técnicos que viabilizem a aplicação do RMC em concretos sustentáveis, promovendo o equilíbrio entre desempenho mecânico e redução de impactos ambientais, em consonância com as diretrizes das normas brasileiras vigentes.



Capítulo 2

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS



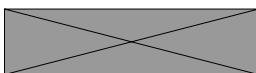
CONSTRUIR
COM CIÊNCIA,
GERIR COM
RESPONSABILIDADE.

LOCAL DE ESTUDO

O presente estudo foi desenvolvido no município de Nova Xavantina, situado na região leste do estado de Mato Grosso, Brasil, a aproximadamente 655 km de Cuiabá. As atividades experimentais ocorreram no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), Campus Nova Xavantina, o qual dispõe de infraestrutura adequada para a preparação, moldagem e ensaio dos corpos de prova de concreto.

O município localiza-se nas coordenadas $14^{\circ}40'22''\text{S}$ e $52^{\circ}21'10''\text{W}$, com altitude média de 275 m. Apresenta clima tropical de savana (classificação Köppen Aw), com estação chuvosa de outubro a março e seca de abril a setembro, temperatura média anual entre 24 grau Celsius ($^{\circ}\text{C}$) e 26°C , e extremos históricos variando de aproximadamente 7°C a 44°C (Prefeitura Municipal de Nova Xavantina, 2025).

A região, situada na transição entre os biomas Amazônia e Cerrado, apresenta predominância de

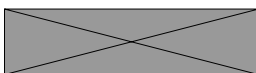


Latossolos e Neossolos litólicos/quartzarenicos, conforme mapas pedológicos e geológicos (IBGE, 2025).

Sua formação histórica está associada à ocupação da região do Rio das Mortes e à Expedição Roncador–Xingu, consolidando-se como núcleo urbano a partir de meados do século XX (Prefeitura Municipal de Nova Xavantina, 2025). A escolha do local justifica-se pela presença da UNEMAT, pela representatividade da construção civil local e pela relevância regional do manejo de resíduos, conferindo pertinência prática e social ao estudo.

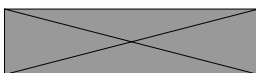
NATUREZA DA PESQUISA

A pesquisa é de natureza experimental, quantitativa e aplicada, voltada à análise do desempenho do concreto produzido com a substituição gradual do agregado miúdo natural (areia) por resíduo de matriz cimentícia (RMC). O estudo foi conduzido em ambiente laboratorial controlado, permitindo a observação direta dos efeitos da substituição nas propriedades mecânicas do concreto.



Foram avaliados teores de substituição variando de 0% a 100%, com incrementos de 10% entre os traços, possibilitando a análise objetiva do abatimento e da resistência à compressão dos corpos de prova em cada proporção, conforme os critérios da NBR 5739 (ABNT, 2018) – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Além disso, a pesquisa buscou reproduzir concretos com resistência característica mínima de 20,0 MPa, atendendo aos requisitos da NBR 6118 (ABNT, 2023) – Projeto de estruturas de concreto (Versão Corrigida 2: 2024), para que o material possa desempenhar função estrutural em elementos de concreto armado.

A abordagem experimental permite verificar a viabilidade técnica da utilização do RMC como alternativa ao agregado natural, mensurando o impacto da substituição tanto no comportamento mecânico do concreto quanto na contribuição para práticas construtivas mais sustentáveis. Essa análise associa inovação tecnológica à redução do consumo de recursos naturais e ao reaproveitamento de resíduos, reforçando o caráter ambientalmente responsável

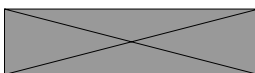


da pesquisa.

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para o desenvolvimento da pesquisa, foi necessária a aquisição dos materiais em estabelecimentos comerciais do município de Nova Xavantina – MT. O agregado miúdo e o agregado graúdo foram obtidos em um depósito local, enquanto o cimento foi adquirido em uma loja de materiais de construção da cidade. O resíduo de RMC utilizado nas diferentes proporções de substituição do agregado miúdo foi doado por uma empresa localizada no município de Barra do Garças – MT.

Os equipamentos e materiais complementares empregados nas etapas experimentais foram provenientes do Laboratório de Materiais da Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT). Ressalta-se que os ensaios foram realizados para a produção dos corpos de prova de concreto, conforme os procedimentos e normas técnicas pertinentes.



Agregado Miúdo Natural

O agregado miúdo natural utilizado na pesquisa foi obtido em um depósito de areias de Nova Xavantina – MT. Para os ensaios, o material foi inicialmente transportado ao laboratório de solos da UNEMAT, onde passou por secagem em estufa a 100 °C por 24 horas, conforme propõe a NBR 7211 (ABNT, 2022).

Após a secagem, a areia foi acondicionada em baldes de 20 L e deixada em temperatura ambiente até o resfriamento natural (Figura 1).

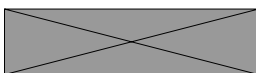
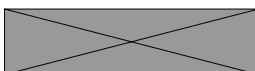


Figura 1 - Secagem controlada em estufa.



Fonte: Autor.

Em sequência, realizou-se o fracionamento granulométrico do agregado miúdo, conforme as diretrizes da norma supracitada. O processo foi conduzido por peneiramento, utilizando um conjunto de peneiras graduadas de acordo com a NBR ISO 3310-1 (ABNT, 2016) – Peneiras de ensaio: requisitos técnicos e verificação



– Parte 1: peneiras de ensaio com tela de tecido metálico (Figura 2).

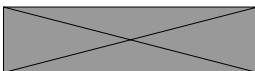
O agregado miúdo natural previamente seco foi utilizado gradativamente, com o auxílio de uma concha para concreto, e distribuída sobre o conjunto de peneiras, sendo agitadas manualmente por três minutos para garantir a homogeneidade das partículas.

Figura 2 - Conjunto de peneiras granulométricas Solotest.



Fonte: Autor.

O material retido em cada peneira foi acondicionado



em embalagens plásticas identificadas conforme a abertura correspondente (2,36 mm, 1,18 mm, 600 micrômetro (μm), 300 μm e 150 μm). Os resíduos retidos na peneira de 4,75 mm e no fundo foram descartados. O procedimento foi repetido até que se obtivesse a quantidade necessária de agregado miúdo para os ensaios.

Concluído o fracionamento, as embalagens identificadas foram armazenadas em caixas de papelão no Laboratório de Materiais da UNEMAT, evitando contato com o solo, umidade ou substâncias que pudessem comprometer a integridade do material (Figura 3).

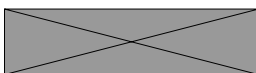


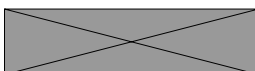
Figura 3 - Acondicionamento agregado miúdo natural.



Fonte: Autor.

Agregado Miúdo Reciclado

O volume de agregado miúdo reciclado utilizado nesta pesquisa foi doado pela empresa V.V.G. Engenharia, situada no município de Barra do Garças – MT. Os resíduos fornecidos já vieram triturados pela V.V.G. Engenharia, tais resíduos originaram-se de quebras e descartes de blocos estruturais de concreto durante o processo de fabricação e acondicionamento do produto até a entrega.

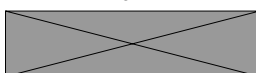


Após o recebimento, os resíduos foram transportados para o laboratório de solos localizado no campus da Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), onde foram submetidos a secagem em estufa por 24 horas a 100 °C, conforme as diretrizes estabelecidas pela NBR 7211 (ABNT, 2022).

Após a secagem, o material foi transferido para o Laboratório de Materiais da UNEMAT, onde foi acondicionado em galões de 20 L e resfriado por meio de secagem natural em temperatura ambiente.

Posteriormente, o resíduo foi triturado utilizando um triturador com lâminas de corte, visando obter faixas granulométricas correspondentes às do agregado miúdo natural (areia). O processo de trituração foi conduzido inserindo o resíduo no bocal da câmara de trituração, sendo necessário repetir o processo para alcançar as granulometrias desejadas.

O fracionamento granulométrico do agregado miúdo reciclado foi realizado de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2022), utilizando um conjunto de peneiras



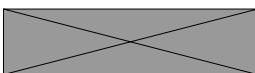
graduadas conforme a NBR NM ISO 3310-1 (ABNT, 2010)
– Peneiras de ensaio – Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico (Figura 4).

Figura 4 - Peneiramento do resíduo reciclado.



Fonte: Autor.

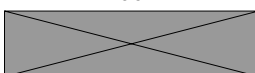
Para o início do processo, o resíduo, previamente
alocado em baldes de 20 L, foi coletado com auxílio
de uma concha para concreto e distribuído sobre o



conjunto de peneiras. A agitação manual foi mantida por aproximadamente três minutos, garantindo a homogeneidade na distribuição das partículas. Em seguida, o material retido em cada peneira foi acondicionado em embalagens plásticas devidamente identificadas com marcador permanente, conforme a abertura de peneira correspondente (2,36 mm, 1,18 mm, 600 μm , 300 μm e 150 μm).

Ressalta-se que os resíduos retidos na peneira de 4,75 mm e no fundo foram descartados em recipiente apropriado, podendo ser utilizados posteriormente em novo processo de trituração para obtenção de granulometrias menores, caso necessário. O procedimento de peneiramento foi repetido até alcançar a quantidade necessária de agregado miúdo reciclado.

Concluída a etapa de fracionamento, as embalagens foram armazenadas em caixas de papelão, de modo a preservar o material do contato com o solo, da umidade e de agentes que pudessem comprometer sua integridade.



Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado neste estudo foi o seixo rolado, obtido em um depósito de areias localizado no município de Nova Xavantina – MT. No próprio pátio do local, realizou-se a separação granulométrica com peneiras de aberturas 12,5 mm e 9,5 mm (Figura 5), retendo-se o material que passou pela primeira e permaneceu na segunda.

Esse material foi reservado em sacos de fibra limpos e identificados, para posterior encaminhamento ao Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT.

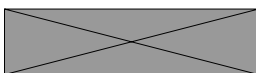


Figura 5 - Peneiras 12,5mm e 9,5mm.



Fonte: Autor.

No laboratório, o seixo foi lavado com água corrente (Figura 6), a fim de eliminar impurezas e partículas finas aderidas à sua superfície. Após a lavagem, o material permaneceu em secagem natural até que não apresentasse mais umidade perceptível, garantindo condições adequadas para o preparo dos traços e ensaios.

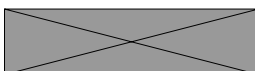


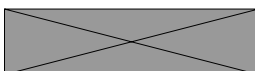
Figura 6 – Lavagem do agregado graúdo.



Fonte: Autor.

Quando completamente seco, o agregado foi novamente acondicionado em sacos de fibra limpos e colocado sobre pallets de madeira, evitando o contato direto com o piso e protegendo-o de possíveis fontes de umidade.

Esse cuidado teve como objetivo preservar as características do seixo até o momento de sua utilização, assegurando a qualidade e a uniformidade do material empregado na pesquisa.

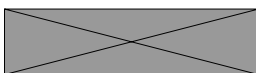


Cimento Portland

O cimento utilizado foi o Cimento Portland Composto CP II-F-32, de fabricação Cimento Goiás, contendo adição de filer calcário. Apresenta resistência característica de 32,0 MPa aos 28 dias e boa trabalhabilidade, sendo amplamente utilizado em obras.

De acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018) – Cimento Portland – Requisitos, esse tipo de cimento contém entre 6% e 10% de material carbonático adicionado ao clínquer, o que contribui para melhor retenção de água, menor calor de hidratação e maior uniformidade na mistura. O material atende integralmente às exigências normativas e é adequado para aplicações gerais da engenharia civil.

O mesmo tipo de cimento (CP II-F-32) foi utilizado na pesquisa de Zarpellon *et al.* (2024), que serviu de base para o presente estudo. Essa correspondência visa garantir a comparabilidade dos resultados entre os trabalhos, assegurando que eventuais variações no desempenho dos concretos estejam relacionadas principalmente às diferenças

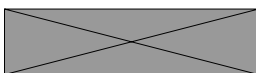


no teor e na natureza dos agregados reciclados, e não às propriedades do aglomerante.

Água

A água utilizada no preparo das misturas foi proveniente da rede pública de abastecimento do município de Nova Xavantina – MT, sendo potável e livre de impurezas visíveis. Essa escolha deve-se ao fato de que a qualidade da água empregada na amassadura do concreto exerce influência direta sobre as reações de hidratação do cimento e, conseqüentemente, sobre o desempenho mecânico e a durabilidade do material.

Conforme estabelece a NBR 15900-1 (ABNT, 2009) – Água para amassamento do concreto – Parte 1: Requisitos, a água destinada ao preparo do concreto deve apresentar características equivalentes às da água potável, estando isenta de óleos, sais, ácidos, matérias orgânicas ou substâncias que possam interferir na pega e no endurecimento do cimento.

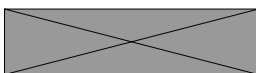


Durante a execução dos ensaios, não foram utilizados aditivos químicos, sendo mantida a proporção água/cimento (a/c) prevista nos traços experimentais, de modo a preservar a uniformidade dos resultados e permitir a avaliação direta da influência dos agregados sobre o comportamento do concreto.

CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Massa Unitária

Para a determinação da massa unitária dos agregados, adotou-se como procedimento de referência a NBR 16972 (ABNT, 2021) – Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Esse ensaio tem por finalidade quantificar a relação entre a massa do material seco e o volume total ocupado, incluindo os vazios existentes entre as partículas.



Determinação da Densidade do Agregado Miúdo

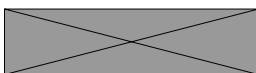
A determinação da densidade do agregado miúdo foi realizada conforme os procedimentos descritos na NBR 16916 (ABNT, 2021) – Agregado miúdo –

Determinação da densidade e da absorção de água.

O ensaio teve início com o preparo adequado da amostra, conduzido de acordo com as orientações da NBR 16915 (ABNT, 2021) – Agregados – Amostragem, assegurando a representatividade do material.

Determinação da Densidade do Agregado Graúdo

A determinação da densidade do agregado graúdo foi feita por meio de uma metodologia alternativa, devido a ausência de equipamentos específicos para realizar o ensaio conforme a NBR 16917 (ABNT, 2021) – Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água.

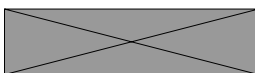


O procedimento consistiu em pesar 500 g de seixo rolado em uma balança de precisão e, em seguida, adicionar o material em um b quer com 600 mL de água, mantida a uma temperatura média de $(27 \pm 2)^\circ\text{C}$, correspondente às condições ambientais locais no momento do ensaio.

Essa temperatura ultrapassa o intervalo previsto na norma ($23 \pm 2^\circ\text{C}$), sendo considerada uma adaptação experimental em razão da ausência de controle térmico no laboratório. A partir da variação de volume causada pela imersão dos agregados, foi possível calcular a relação entre a massa e o volume deslocado, estimando-se assim a densidade aparente do seixo rolado. Mesmo não seguindo integralmente as condições normativas, o método adotado possibilitou uma avaliação comparativa satisfatória entre os materiais estudados.

DOSAGEM DO CONCRETO

A dosagem do concreto foi realizada conforme o método proposto pela Associação Brasileira de Cimento



Portland (ABCP), adotando-se um traço 1 : 2,20 : 1,90 : 0,54 em massa, que corresponde à relação entre cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água, respectivamente. Esse traço foi definido para alcançar uma resistência característica à compressão (f_{ck}) de 20,0 MPa, valor compatível com o concreto de controle adotado em Zarpellon *et al.* (2024).

A proporção e quantidade dos materiais utilizados para a preparação da mistura está apresentada na Tabela 1, que demonstra as quantidades de cada componente necessárias para a produção do concreto, atendendo a quantidade de massa necessária para o Slump Test e resistência mínima como supracitada.



Tabela 1 - Dosagem do concreto.

Cimento (kg)	Agregado miúdo (kg)	Agregado graúdo (kg)	Água (kg)
4,22	9,30	8,00	2,363

Fonte: Autor.

SUBSTITUIÇÃO

A substituição do agregado miúdo natural por RMC foi realizada de forma gradual e proporcional, mantendo constante o volume total de agregado miúdo em cada mistura. O processo ocorreu em incrementos de 10%, variando de 0% a 100%, conforme metodologia adaptada de Zarpellon *et al.* (2024).

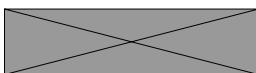
Para cada percentual de substituição, a massa equivalente de areia natural foi retirada e substituída por igual massa de RMC, previamente triturado, peneirado e classificado nas mesmas faixas granulométricas da areia (2,36 mm; 1,18 mm; 600 μ m; 300 μ m e 150 μ m). Essa correspondência garantiu que as misturas permanecessem



homogêneas e volumetricamente equilibradas, mantendo o mesmo comportamento de empacotamento dos grãos.

Como exemplo, na faixa de 2,36 mm, o traço com 10% de substituição apresentou 0,123 Quilograma (kg) de areia substituídos por igual massa de RMC, mantendo o total de 1,226 kg de material nessa granulometria. Ou seja, no traço de 10% de substituição, os 1,226 kg de material nessa peneira foram compostos por 1,103 kg de agregado miúdo natural e 0,123 kg de agregado miúdo reciclado. O mesmo procedimento foi repetido para todas as faixas e teores de substituição, resultando em traços que variaram gradualmente de 0% (areia 100%) até 100% (RMC 100%).

A partir de cada traço, foram moldados 25 corpos de prova, identificados conforme o teor de substituição correspondente. Esse procedimento assegurou a repetibilidade dos ensaios e permitiu a análise comparativa dos resultados obtidos. Como exemplo geral, no traço de referência (0%) foram utilizados 9,300 kg de agregado miúdo natural, correspondentes à somatória das massas das frações granulométricas que compõem o conjunto do



agregado miúdo.

À medida que o teor de substituição aumentava, essa mesma massa total foi mantida, substituindo-se gradualmente a areia natural por RMC nas proporções estabelecidas. Assim, ao final da substituição, no traço de 100% de substituição, os 9,300 kg de agregado miúdo natural foram integralmente substituídos por 9,300 kg de agregado miúdo reciclado, preservando o mesmo volume e assegurando a equivalência entre os traços comparados.

Dessa forma, a metodologia adotada permitiu que cada traço fosse ajustado de maneira precisa, garantindo a representatividade das amostras e a confiabilidade dos resultados obtidos. As proporções utilizadas em cada teor estão apresentadas na Tabela 2, que reúne as quantidades correspondentes de areia e RMC para cada faixa granulométrica.

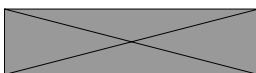
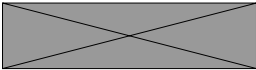


Tabela 2 - Quantidade de resíduo utilizado em cada intervalo de substituição.

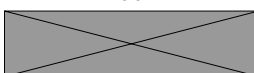
Substituição	2,36 (mm)	1,18 (mm)	0,6 (µm)	0,3 (µm)	0,15 (µm)	Total (Kg)
0%	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10%	0,123	0,156	0,197	0,283	0,171	0,930
20%	0,245	0,313	0,394	0,566	0,342	1,860
30%	0,368	0,469	0,591	0,850	0,512	2,790
40%	0,490	0,626	0,788	1,133	0,683	3,720
50%	0,613	0,782	0,985	1,416	0,854	4,650
60%	0,736	0,938	1,182	1,699	1,025	5,580
70%	0,858	1,095	1,379	1,983	1,195	6,510
80%	0,981	1,251	1,576	2,266	1,366	7,440
90%	1,103	1,408	1,773	2,549	1,537	8,370
100%	1,226	1,564	1,970	2,832	1,708	9,300
Total (kg)	6,743	8,602	10,832	15,578	9,393	-

Fonte: Autor.



Após a substituição do agregado miúdo por agregado reciclado em cada faixa granulométrica, todo o material resultante correspondente a cada percentual de substituição foi acondicionado em embalagens plásticas individuais devidamente identificadas com o respectivo teor de substituição. Essas embalagens foram armazenadas sobre placas de isopor (EPS), localizadas sob a bancada do Laboratório de Materiais da UNEMAT conforme a Figura 7.

Figura 7 - Acondicionamento das embalagens com substituição.



Fonte: Autor.

O armazenamento nesse local, protegido da umidade e de variações térmicas, garantiu a preservação das características físicas dos agregados até a etapa de preparo das misturas e realização dos ensaios.

DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA PELO ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE

A determinação da consistência do concreto fresco foi realizada por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone (Slump Test), conforme os procedimentos descritos na NBR 16889 (ABNT, 2020) – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. O ensaio foi executado logo após a homogeneização do concreto, utilizando o molde tronco cônico padronizado, com 20 centímetros (cm) de diâmetro na base inferior, 10 cm no topo e 30 cm de altura (Figura 8).

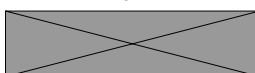


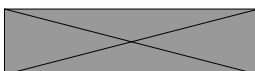
Figura 8 – Ensaio de abatimento pelo tronco de cone.



Fonte: Autor.

O molde foi preenchido em três camadas de igual volume, sendo cada uma adensada com 25 golpes aplicados com o soquete metálico padrão. Após o preenchimento, o molde foi retirado de forma lenta e vertical, permitindo o abatimento natural da massa de concreto.

A diferença entre a altura original do molde e o ponto mais alto da superfície do concreto abatido

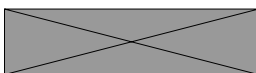


foi medida com trena e registrada em milímetros, com arredondamento para o múltiplo de 5 mm mais próximo, conforme estabelece a norma. O valor obtido foi utilizado como indicador da consistência e da trabalhabilidade do concreto fresco produzido.

MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

A moldagem dos corpos de prova foi realizada conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015) – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova (Versão Corrigida: 2016), seguindo o critério que define que a dimensão básica do corpo de prova deve ser, no mínimo, três vezes maior que a dimensão nominal máxima do agregado graúdo.

Para esta pesquisa, foi realizada uma adaptação no material dos moldes, utilizando cilindros de policloreto de vinila (PVC) com dimensões de $4,70 \times 9,40$ cm, inferiores ao padrão recomendado de 10×20 cm. Para adequar os corpos de prova a essas dimensões, realizou-se o peneiramento dos



agregados graúdos, utilizando apenas aqueles passantes na peneira de 12,50 mm e retidos na de 9,50 mm, garantindo, assim, a conformidade com a relação diâmetro/altura prevista pela norma.

De acordo com a metodologia, foram produzidos 25 corpos de prova para cada percentual de substituição, variando de 0 a 100%, em intervalos de 10%.

Para auxiliar na desmoldagem, aplicou-se óleo diesel nas paredes internas dos moldes cilíndricos, visando facilitar a remoção dos corpos de prova após o período de cura inicial. A Figura 9 apresenta a moldagem da amostra com 50% de substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo reciclado.

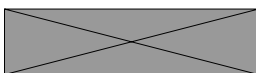


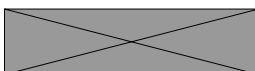
Figura 9 – Moldagem das amostras com 50% de substituição.



Fonte: Autor.

ENSAIO DE RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À COMPRESSÃO SIMPLES

O ensaio de resistência à compressão simples foi conduzido conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018). As amostras foram rompidas em uma prensa eletro-hidráulica da marca Contenco, instalada no Laboratório de Materiais



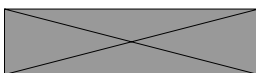
de Construção Civil da Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT).

Após 28 dias de cura úmida por imersão, foram utilizados 25 corpos de prova para cada percentual de substituição do agregado miúdo, garantindo maior representatividade dos resultados e confiabilidade na avaliação da resistência característica.

ANÁLISE ESTATÍSTICA

A etapa de análise estatística foi planejada como procedimento complementar à metodologia experimental, com o objetivo de assegurar a confiabilidade e a coerência dos resultados obtidos nos ensaios. Após a execução dos experimentos e o registro dos valores individuais de resistência à compressão simples, procedeu-se à organização e ao tratamento inicial dos dados por meio de planilhas eletrônicas no Microsoft Excel, ferramenta que possibilitou a compilação, filtragem e uniformização das amostras.

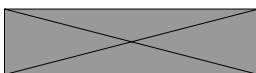
Inicialmente, utilizaram-se as funções de máximo



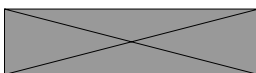
e mínimo para delimitar os intervalos válidos das amostras, garantindo a padronização dos conjuntos analisados e evitando distorções decorrentes de discrepâncias experimentais. Em seguida, recorreu-se ao gráfico boxplot para a identificação de valores discrepantes (outliers), ou seja, pontos que se afastam significativamente do comportamento central da amostra, podendo refletir variações anômalas ou inconsistências pontuais nos ensaios realizados.

Posteriormente, aplicaram-se os métodos de análise inferencial, como a Análise de Variância (ANOVA) e o teste de Tukey, com o propósito de verificar se a substituição do agregado miúdo natural por resíduo de matriz cimentícia (RMC) apresenta significância estatística sobre o desempenho do concreto. Essa abordagem metodológica assegurou que as diferenças observadas entre os teores de substituição fossem avaliadas de forma objetiva, sustentada em critérios matemáticos e estatísticos consistentes.

Dessa forma, a análise estatística delineada neste item constituiu a base metodológica para o tratamento e a interpretação dos resultados que serão apresentados no



capítulo e tópicos subsequentes.



Capítulo

3

RESULTADOS E DISCUSSÃO



CONSTRUIR
COM CIÊNCIA,
GERIR COM
RESPONSABILIDADE.

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão simples realizados com os concretos produzidos com diferentes teores de substituição do agregado miúdo natural por resíduo de matriz cimentícia (RMC). Os dados experimentais foram organizados de modo a permitir a análise comparativa do desempenho mecânico de cada traço, considerando a variação progressiva das substituições de 0% a 100%.

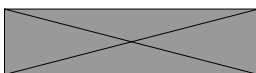
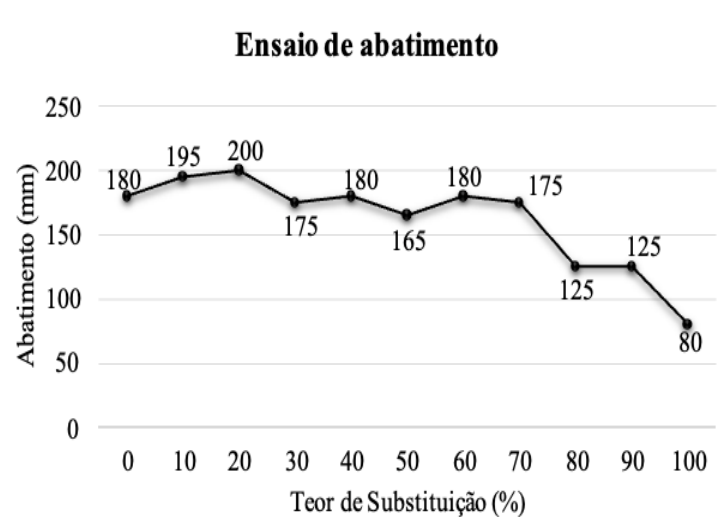
Na Tabela 3 serão apresentados os valores individuais de resistência, expressos em MPa, obtidos para cada corpo de prova moldado, correspondentes aos diferentes percentuais de substituição. Esses resultados serviram como base para o tratamento estatístico e para a interpretação das médias apresentadas nas seções subsequentes. Os resultados médios e suas implicações técnicas são discutidos nas próximas subseções, permitindo avaliar a influência do RMC sobre o comportamento mecânico do concreto.



ENSAIO DE ABATIMENTO

Os valores de abatimento obtidos estão apresentados no Gráfico 1, que reúne as médias correspondentes a cada teor de substituição do agregado miúdo natural por RMC. O traço de referência (0 %) apresentou abatimento de 180 mm, enquadrando-se na classe de consistência plástica adequada para concretos moldados manualmente, conforme os critérios estabelecidos pela NBR 16889 (ABNT, 2020).

Gráfico 1 - Ensaio de abatimento - Tronco cone.

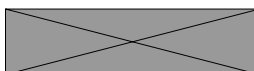


Fonte: Autor.

Com 10 % de substituição, verificou-se leve aumento para 195 mm, e com 20 %, atingiu-se o valor máximo de 200 mm. Esse comportamento sugere uma melhora pontual na fluidez, possivelmente associada à presença de finos provenientes do RMC, que reduzem o atrito intergranular e favorecem a dispersão da pasta cimentícia.

A partir de 30 %, o abatimento passou a apresentar oscilações: reduziu para 175 mm, recuperou-se para 180 mm no teor de 40 %, diminuiu para 165 mm em 50 %, voltou a 180 mm em 60 % e retornou a 175 mm em 70 %. Essa variação, embora não linear, manteve o concreto dentro da classe de consistência plástica, conforme a NBR 8953 (ABNT, 2015), preservando boa coesão entre os materiais e mantendo trabalhabilidade satisfatória para moldagem manual.

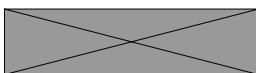
Nos teores mais elevados, observou-se queda expressiva da fluidez. As misturas com 80 % e 90 % de



RMC apresentaram abatimento de 125 mm, enquanto o teor de 100 % atingiu 80 mm, caracterizando concretos de consistência seca a muito seca. Nessa faixa, a mistura exige maior energia de adensamento, controle rigoroso de lançamento e maior atenção ao acabamento superficial.

Esse comportamento é coerente com o reportado por Zarpellon *et al.* (2024) e Guimarães *et al.* (2021), que identificaram tendência semelhante em concretos produzidos com agregados reciclados de matriz cimentícia. Segundo esses autores, a maior absorção de água e a superfície mais rugosa das partículas recicladas contribuem para a redução da trabalhabilidade em teores mais elevados de substituição.

De forma geral, o ensaio evidenciou que a incorporação de até 30 % de RMC permite manter desempenho satisfatório em termos de manuseio e acabamento. Para teores superiores, tornam-se necessários ajustes na relação água/cimento ou o emprego de aditivos plastificantes, visando restabelecer a fluidez e garantir uniformidade adequada durante a moldagem e o lançamento



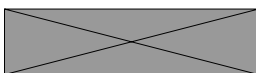
do concreto.

TRATAMENTO DE DADOS

O tratamento estatístico dos resultados baseou-se na compilação dos dados obtidos nos ensaios de resistência à compressão axial, realizados para os diferentes teores de substituição do agregado miúdo natural por RMC, conforme metodologia descrita no Capítulo 5.

Os cálculos foram efetuados em planilhas eletrônicas no software Microsoft Excel, o que permitiu a organização sistemática dos dados e a realização de análises estatísticas de forma padronizada e reproduzível. Esse procedimento conferiu maior confiabilidade às médias obtidas e serviu de base para a interpretação dos resultados de resistência apresentados nas seções subsequentes.

A seguir, são apresentados os critérios estatísticos adotados para a avaliação e filtragem dos resultados experimentais.

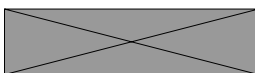


Critério de Avaliação e Limites de Aceitação

Para garantir a confiabilidade dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão simples, adotaram-se critérios de avaliação baseados nas recomendações da ABCP e na NBR 12655 (ABNT, 2015), que estabelecem parâmetros para controle tecnológico do concreto. Inicialmente, considerou-se a relação entre a resistência característica (f_{ck}), a resistência individual de cada corpo de prova (f_{cj}) e o desvio padrão (S_d), conforme expresso pela Equação (1), aplicável ao controle da dispersão estatística dos resultados:

$$f_{cj} = f_{ck} - 1,65 \times s_d \quad (1)$$

O coeficiente 1,65 corresponde ao nível de confiança de 95%, admitindo que até 5% dos valores possam situar-se abaixo do f_{ck} sem comprometer a representatividade do lote. Com base no valor característico adotado para o estudo (20,0 MPa), definiu-se uma faixa prática de tolerância de ± 4



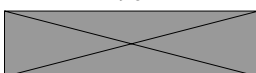
MPa em torno da média, conforme orientação da ABCP para ensaios laboratoriais. Esse intervalo compreende os valores normalmente esperados para concretos produzidos em condições controladas, servindo como referência para a filtragem inicial das amostras.

Assim, foram considerados estatisticamente admissíveis valores individuais entre 13,4 MPa e 26,6 MPa, correspondentes aos limites expressos nas Equações (2) e (3):

$$f_{cj} = 20 - 1,65 \times 4 = 13,4 \text{ MPa} \quad (2)$$

$$f_{cj} = 20 + 1,65 \times 4 = 26,6 \text{ MPa} \quad (3)$$

Ao aplicar esse critério, buscou-se identificar resultados que se afastassem de maneira evidente do comportamento geral da amostra, reduzindo a influência de dispersões excessivas e assegurando maior homogeneidade entre os conjuntos analisados. Esse procedimento não teve como objetivo eliminar diferenças naturais entre os teores de substituição, mas sim evitar que valores isolados,



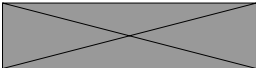
possivelmente decorrentes de falhas de moldagem, cura ou ruptura, interferissem na interpretação das médias utilizadas posteriormente nos testes estatísticos.

Dessa forma, o critério empregado assegurou que os resultados considerados na Tabela 3 e nas etapas seguintes representassem fielmente o comportamento mecânico das misturas, preservando tanto a consistência interna dos dados quanto a comparabilidade entre os teores de substituição avaliados.



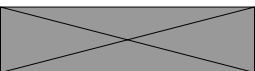
Tabela 3 - Resultados do ensaio de resistência à compressão simples.

Quant.	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
1	3,1	13,7	21,5	22,7	14,4	22,7	23,3	20,7	16,0	8,9	15,8
2	7,1	13,2	18,5	24,7	16,0	24,5	17,5	13,3	16,6	6,3	21,1
3	23,3	13,1	18,7	23,1	8,8	7,6	22,0	9,2	2,9	12,9	15,4
4	17,4	18,4	14,5	20,4	23,0	4,5	4,3	15,2	11,9	14,9	16,7
5	23,3	16,1	21,8	11,6	18,6	19,6	23,3	25,3	17,7	15,2	14,1
6	2,9	15,7	4,3	20,3	12,9	8,0	14,4	12,3	18,9	11,7	14,3
7	20,4	29,6	20,1	26,2	16,8	19,1	17,0	3,0	6,5	10,1	20,3
8	3,4	17,0	20,6	16,6	15,4	10,0	22,3	21,9	14,2	10,6	18,1
9	16,3	25,3	4,1	19,3	21,0	23,3	18,2	11,9	22,7	15,3	18,1
10	22,9	9,3	16,4	22,3	15,3	18,6	16,8	3,5	12,6	3,6	3,3
11	19,4	2,9	17,7	15,6	15,9	16,6	23,4	3,3	14,0	5,8	6,7
12	23,6	26,8	21,9	17,7	19,8	18,3	18,9	22,2	11,8	15,1	9,0
13	15,4	17,4	15,0	23,7	15,9	20,2	17,7	14,4	3,6	11,1	23,2
14	4,5	16,4	4,8	21,7	24,9	24,9	2,9	14,5	13,5	9,7	18,4
15	4,9	8,0	19,1	19,8	2,8	20,7	18,0	10,9	24,7	12,4	10,0
16	15,9	14,8	22,8	21,8	17,8	19,0	19,2	3,7	8,2	9,1	12,0
17	3,1	18,7	16,2	30,3	9,4	16,6	25,1	3,8	14,3	16,8	16,4
18	13,9	21,7	20,6	16,7	14,2	22,3	26,5	17,2	14,5	10,3	14,1
19	22,1	23,4	16,9	28,6	17,2	14,9	16,7	23,0	13,9	13,7	20,5



20	20,7	32,4	18,1	23,1	21,9	15,0	26,4	22,8	12,1	13,7	11,8
21	27,4	21,4	18,0	16,5	18,7	18,3	23,0	3,1	9,6	9,8	11,7
22	13,9	28,6	17,8	20,7	22,7	23,5	29,4	9,8	19,1	16,7	11,3
23	5,7	25,1	30,0	4,3	10,8	23,3	4,4	20,8	25,0	16,2	19,3
24	14,7	21,0	20,2	20,6	16,3	15,1	29,8	16,6	15,3	9,8	20,0
25	3,1	7,9	19,2	29,4	7,6	15,0	28,9	15,2	26,1	11,1	24,1
fcm	13,9	18,3	17,6	20,7	15,9	17,7	19,6	13,5	14,6	11,6	15,4

Fonte: Autor.



Filtragem e Identificação de Valores Discrepantes

Os valores que se encontram abaixo de 13,4 MPa e acima de 26,6 MPa foram classificados como discrepantes, por estarem fora do intervalo de distribuição normal dos resultados. Assim, foram desconsiderados no cálculo das médias representativas de cada traço.

Essa etapa foi conduzida conforme recomendações da NBR 12655 (ABNT, 2022), citados anteriormente, e da ABCP, que relacionam a resistência característica, a resistência média e o desvio-padrão para o controle de qualidade do concreto. O procedimento assegura que os resultados analisados se mantenham dentro da variação aceitável prevista pela norma.

É importante destacar que parte dos valores abaixo do limite inferior pode estar associada a falhas no processo de moldagem ou de ruptura dos corpos de prova, conforme descrito nas NBR 5738 (ABNT, 2015) e NBR 5739 (ABNT, 2018). Esses desvios podem ocorrer devido a compactação inadequada, desalinhamento das superfícies de topo e base



durante o ensaio ou ausência do apoio de neoprene na prensa hidráulica, fatores que podem gerar distribuição irregular de tensões no momento da aplicação da carga.

Essas possíveis falhas experimentais, somadas recomendações da NBR 12655 (ABNT, 2022), justificam a remoção dos resultados que ficaram fora da faixa de tolerância adotada. Os valores finais considerados para o cálculo das médias estão apresentados na Tabela 4.

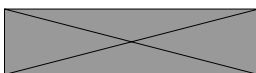
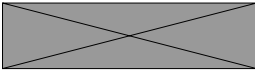


Tabela 4 – Resultado após a exclusão dos números fora do intervalo.

Quant.	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
1	-	13,7	21,5	22,7	14,4	22,7	23,3	20,7	16,0	-	15,8
2	-	-	18,5	24,7	16,0	24,5	17,5	-	16,6	-	21,1
3	23,3	-	18,7	23,1	-	-	22,0	-	-	-	15,4
4	17,4	18,4	14,5	20,4	23,0	-	-	15,2	-	14,9	16,7
5	23,3	16,1	21,8	-	18,6	19,6	23,3	25,3	17,7	15,2	14,1
6	-	15,7	-	20,3	-	-	14,4	-	18,9	-	14,3
7	20,4	-	20,1	26,2	16,8	19,1	17,0	-	-	-	20,3
8	-	17,0	20,6	16,6	15,4	-	22,3	21,9	14,2	-	18,1
9	16,3	25,3	-	19,3	21,0	23,3	18,2	-	22,7	15,3	18,1
10	22,9	-	16,4	22,3	15,3	18,6	16,8	-	-	-	-
11	19,4	-	17,7	15,6	15,9	16,6	23,4	-	14,0	-	-
12	23,6	-	21,9	17,7	19,8	18,3	18,9	22,2	-	15,1	-
13	15,4	17,4	15,0	23,7	15,9	20,2	17,7	14,4	-	-	23,2
14	-	16,4	-	21,7	24,9	24,9	-	14,5	13,5	-	18,4
15	-	-	19,1	19,8	-	20,7	18,0	-	24,7	-	-
16	15,9	14,8	22,8	21,8	17,8	19,0	19,2	-	-	-	-
17	-	18,7	16,2	-	-	16,6	25,1	-	14,3	16,8	16,4
18	13,9	21,7	20,6	16,7	14,2	22,3	26,5	17,2	14,5	-	14,1
19	22,1	23,4	16,9	-	17,2	14,9	16,7	23,0	13,9	13,7	20,5

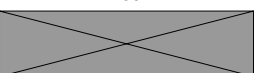


20	20,7	-	18,1	23,1	21,9	15,0	26,4	22,8	-	13,7	-
21	-	21,4	18,0	16,5	18,7	18,3	23,0	-	-	-	-
22	13,9	-	17,8	20,7	22,7	23,5	-	-	19,1	16,7	-
23	-	25,1	-	-	-	23,3	-	20,8	25,0	16,2	19,3
24	14,7	21,0	20,2	20,6	16,3	15,1	-	16,6	15,3	-	20,0
25	-	-	19,2	-	-	15,0	-	15,2	26,1	-	24,1
fcm	18,9	19,1	18,8	20,7	18,2	19,6	20,5	19,2	17,9	15,3	18,2

Nota: (-) indica valores excluídos por se encontrarem fora da faixa de 13,4

MPa a 26,6 MPa.

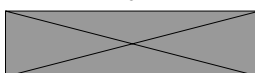
Fonte: Autor.



Após a exclusão dos resultados que estavam fora da faixa aceitável definida anteriormente, verificou-se que alguns teores de substituição mantiveram um número maior de amostras válidas do que outros. Observou-se, em especial, que os traços 0 % e 10 % apresentaram exatamente 15 resultados válidos dentro do intervalo estipulado, sem necessidade de ajustes adicionais.

Diante disso, estabeleceu-se 15 resultados como padrão de referência para todos os demais teores, garantindo equilíbrio amostral e evitando distorções comparativas entre os grupos durante as análises subsequentes.

Para uniformizar o número de observações nos teores que apresentaram mais de 15 valores válidos, empregou-se o recurso Máximo e Mínimo do Microsoft Excel, removendo-se proporcionalmente os valores extremos, ou seja, os maiores e menores resultados ainda que dentro do intervalo permitido. Esse procedimento permitiu que todos os grupos permanecessem com 15 resultados válidos, assegurando consistência no conjunto analisado, conforme apresentado na Tabela 5.



Essa estratégia está alinhada a práticas de filtragem estatística amplamente utilizadas na literatura, como o método de adaptive trimming descrito por Tzoumas, Antonante e Carlone (2019), que recomenda a remoção proporcional de valores extremos para equilibrar conjuntos amostrais e reduzir assimetrias na comparação estatística.

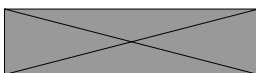


Tabela 5 – Resultados após a padronização de 15 resultados válidos.

Quant.	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
1	23,3	13,7	21,5	22,7	18,7	22,7	23,3	20,7	16,0	14,9	15,8
2	17,4	18,4	18,5	21,8	16,0	23,3	17,5	15,2	16,6	15,2	21,1
3	23,3	16,1	18,7	23,1	22,7	19,6	22,0	-	13,5	-	15,4
4	20,4	15,7	20,2	20,4	16,3	19,1	23,0	25,3	24,7	15,3	16,7
5	16,3	17,0	19,2	16,7	18,6	23,3	23,3	21,9	17,7	15,1	14,1
6	22,9	25,3	20,1	20,3	17,8	18,6	19,2	22,2	18,9	-	14,3
7	19,4	17,4	20,6	20,7	16,8	16,6	17,0	14,4	14,0	-	20,3
8	23,6	16,4	16,4	16,6	15,4	18,3	22,3	14,5	14,2	-	18,1
9	15,4	14,8	17,7	19,3	21,0	20,2	18,2	-	22,7	16,8	18,1
10	15,9	18,7	16,9	22,3	15,3	18,3	16,8	17,2	14,3	-	16,4
11	13,9	21,7	18,1	20,6	15,9	20,7	23,4	23,0	14,5	13,7	20,0
12	22,1	23,4	19,1	17,7	19,8	19,0	18,9	22,8	13,9	13,7	20,5
13	20,7	21,4	18,0	23,1	15,9	16,6	17,7	20,8	19,1	16,7	23,2
14	13,9	25,1	17,8	21,7	17,2	22,3	25,1	16,6	25,0	-	18,4
15	14,7	21,0	20,6	19,8	21,9	15,1	18,0	15,2	15,3	16,2	19,3
fcm	18,9	19,1	18,9	20,5	18,0	19,6	20,4	19,4	17,4	15,3	18,1

Fonte: Autor.

Nos teores de 70 % e 90 % de substituição, em que o número de amostras válidas foi inferior a 15 após a aplicação da exclusão de dados para valores foras do intervalo (13 e 09 amostras, respectivamente, conforme a Tabela 4), utilizou-se então, o recurso Mediana do Microsoft Excel, que calcula o valor central da distribuição de dados.

Essa abordagem possibilitou complementar a amostra de forma estatisticamente neutra, sem alterar a tendência central dos resultados nem comprometer a representatividade dos dados, em consonância com estratégias de trimming adaptativo descritas por Chang, Zhou e Zang (2020) e por Cappozzo, Greselin e Murphy (2019).

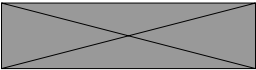
Essa etapa assegurou que a análise estatística subsequente fosse conduzida com o mesmo número de observações por teor de substituição, garantindo equilíbrio amostral e consistência na comparação entre os traços. Os valores finais obtidos após a aplicação dos métodos de filtragem e padronização descritos anteriormente encontram-se apresentados na Tabela 6.



Tabela 6 - Resultados após a aplicação dos métodos supracitados.

Quant.	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
1	23,3	13,7	21,5	22,7	18,7	22,7	23,3	20,7	16,0	14,9	15,8
2	17,4	18,4	18,5	21,8	16,0	23,3	17,5	15,2	16,6	15,2	21,1
3	23,3	16,1	18,7	23,1	22,7	19,6	22,0	25,3	13,5	15,3	15,4
4	20,4	15,7	20,2	20,4	16,3	19,1	23,0	21,9	24,7	15,1	16,7
5	16,3	17,0	19,2	16,7	18,6	23,3	23,3	22,2	17,7	16,8	14,1
6	22,9	25,3	20,1	20,3	17,8	18,6	19,2	14,4	18,9	13,7	14,3
7	19,4	17,4	20,6	20,7	16,8	16,6	17,0	14,5	14,0	13,7	20,3
8	23,6	16,4	16,4	16,6	15,4	18,3	22,3	17,2	14,2	16,7	18,1
9	15,4	14,8	17,7	19,3	21,0	20,2	18,2	23,0	22,7	16,2	18,1
10	15,9	18,7	16,9	22,3	15,3	18,3	16,8	22,8	14,3	15,2	16,4
11	13,9	21,7	18,1	20,6	15,9	20,7	23,4	20,8	14,5	15,2	20,0
12	22,1	23,4	19,1	17,7	19,8	19,0	18,9	16,6	13,9	15,2	20,5
13	20,7	21,4	18,0	23,1	15,9	16,6	17,7	15,2	19,1	15,2	23,2
14	13,9	25,1	17,8	21,7	17,2	22,3	25,1	20,7	25,0	15,2	18,4
15	14,7	21,0	20,6	19,8	21,9	15,1	18,0	20,7	15,3	15,2	19,3
fcm	18,9	19,1	18,9	20,5	18,0	19,6	20,4	19,4	17,4	15,3	18,1

Fonte: Autor.



Validação Visual e Análise Gráfica dos Resultados

Como etapa complementar de validação, aplicou-se o método gráfico Boxplot (diagrama de caixa, conforme o Gráfico 2), amplamente utilizado para a validação visual de dados experimentais, permitindo identificar eventuais valores que se afastam significativamente do intervalo interquartil (IQR). Esses valores, denominados outliers, representam pontos situados acima do limite superior ou abaixo do limite inferior do conjunto de dados, calculados a partir de 1,5 vezes o IQR.

No entanto, é importante destacar que a simples presença de outliers não implica, necessariamente, erro experimental ou valor inválido, mas sim possíveis variações naturais do comportamento do material.

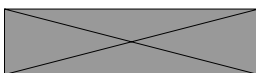
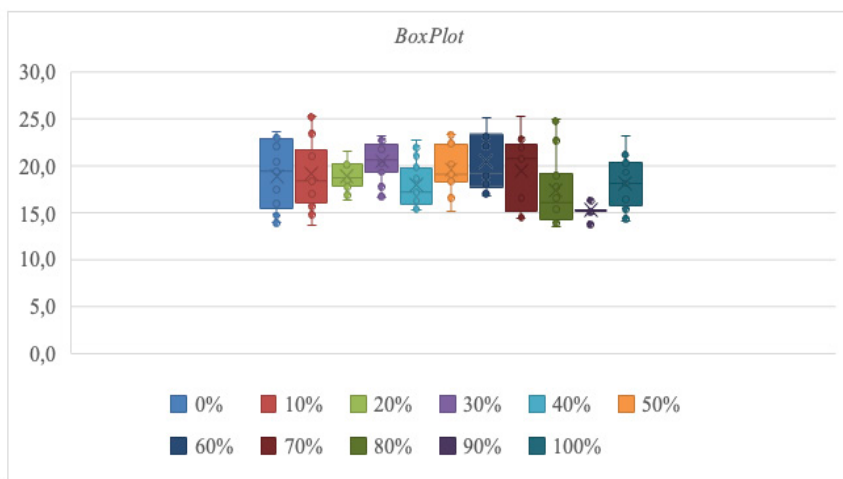


Gráfico 2 - BoxPlot com os resultados da Tabela 6.



Fonte: Autor.

No presente estudo, observou-se que os valores classificados como outliers no Gráfico 2 se encontram coerentes com o comportamento estatístico e físico esperado para o concreto com diferentes teores de substituição de agregado miúdo por resíduo de matriz cimentícia (RMC). Dessa forma, tais valores foram mantidos na análise, uma vez que representam dispersões reais inerentes ao processo experimental e estão dentro do padrão de resistência



característica de cada grupo.

Essa abordagem está de acordo com a perspectiva proposta por Gang, Lin e Tong (2025), que ressaltam o uso do Boxplot como ferramenta exploratória para identificação e análise de dispersões, sem necessidade de exclusão imediata de dados.

Considerando os métodos de filtragem, padronização e validação aplicados incluindo os critérios normativos, o controle estatístico e a análise visual pelo Boxplot, os resultados consolidados apresentados na Tabela 6 são considerados válidos, consistentes e representativos do comportamento real das misturas avaliadas.

Análise Comparativa das Resistências Médias

Após a validação estatística e visual dos resultados pelo método Boxplot, procedeu-se à análise comparativa das resistências médias à compressão simples para cada teor de substituição, conforme ilustrado no Gráfico 3.

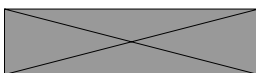
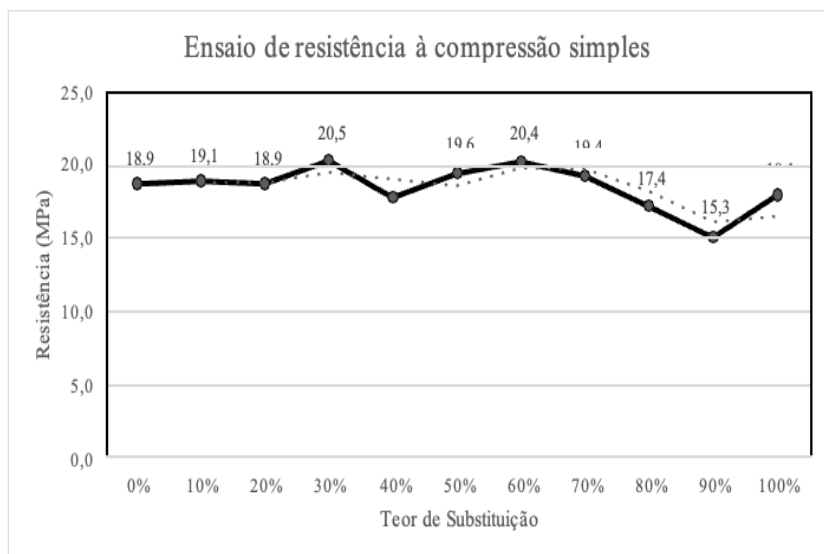
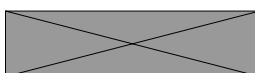


Gráfico 3 - Resistência à compressão simples dos resultados da Tabela 6.



Fonte: Autor.

Observa-se que o comportamento mecânico do concreto apresentou variação gradual conforme o aumento do percentual de substituição do agregado miúdo natural por RMC. De modo geral, os teores intermediários, especialmente 30 % e 60 %, mantiveram ou superaram a resistência média global de 20,0 MPa, demonstrando



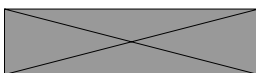
compatibilidade técnica com os requisitos mínimos estabelecidos pela NBR 6118 (ABNT, 2023) para concretos estruturais.

Nos teores inferiores, como 10 % e 20 %, verificou-se manutenção do desempenho mecânico, com valores próximos ao traço de referência, comportamento semelhante ao observado para o teor de 70 %. Nos teores mais elevados, como 80 % e 90

%, observou-se tendência de redução das médias, atribuída ao aumento da porosidade do material reciclado e à menor coesão entre as partículas. Entretanto, tal tendência numérica não indica, por si só, diferença estatística entre todos os teores, reforçando a importância da análise inferencial.

Essas observações iniciais, derivadas dos valores médios, permitiram identificar tendências gerais de comportamento. Contudo, para determinar se as diferenças observadas eram estatisticamente significativas, tornou-se necessária a aplicação de métodos de análise inferencial.

Assim, realizou-se inicialmente a análise de



variância (ANOVA), utilizada para avaliar se as médias dos diferentes teores de substituição apresentavam diferenças estatisticamente relevantes. Os resultados estão apresentados na Tabela 7, que indica a existência de diferença global entre os grupos analisados.

Tabela 7 - Resultados da análise de variância (ANOVA) para os teores de substituição.

	Sum of sqrs	Df	Mean square	F	p(same)
Between groups	329,323	10	32,9323	3,997	7,095E-05
Within groups	1268,99	154	8,24022	-	Permutation
Total	1598,32	164	-	-	9E-05
Components of variance (only for randon effects)					
Var (group)	1,64614	Var (error)	8,240	ICC:	0,166506
Omega ²	0,1537				

Fonte: Autor.

Após a constatação de diferença significativa pela ANOVA, aplicou-se o teste de Tukey para comparações múltiplas, com o objetivo de identificar quais teores diferiram entre si. Os resultados estão apresentados na Tabela 8, contendo as combinações pareadas e seus respectivos valores de significância.

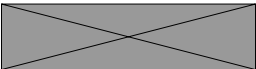
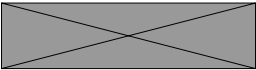


Tabela 8 - Resultados do teste de comparação de médias de Tukey.

Teor de substituição	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
0%	1,000	1,000	0,917	0,998	0,999	0,938	1,000	0,933	0,028	0,999
10%	-	1,000	0,964	0,992	1,000	0,975	1,000	0,865	0,015	0,997
20%	0,242	-	0,921	0,998	0,999	0,942	1,000	0,929	0,027	0,999
30%	1,862	2,105	-	0,383	0,999	1,000	0,995	0,117	9,584E-05	0,485
40%	1,511	1,268	3,373	-	0,899	0,429	0,948	1,000	0,270	1,000
50%	0,683	0,926	1,178	2,195	-	0,999	1,000	0,556	2,846E-03	0,946
60%	1,763	2,006	0,098	3,274	1,079	-	0,997	0,139	1,299E-04	0,534
70%	0,458	0,701	1,403	1,970	0,224	1,304	-	0,677	5,103E-03	0,976
80%	2,312	2,069	4,174	0,800	2,995	4,075	2,770	-	0,642	0,999
90%	5,154	4,911	7,016	3,643	5,838	6,917	5,613	2,842	-	0,197
100%	1,295	1,052	3,157	0,215	1,979	3,058	1,754	1,016	3,859	-

Fonte: Autor.



A análise conjunta das Tabelas 7 e 8 demonstra que as diferenças estatísticas se concentraram principalmente no teor de 90 %, que apresentou valores significativamente inferiores quando comparado a grande parte dos demais teores, como 0 %, 10 %, 20 %, 50 %, 60 % e 70 %. Entre os teores intermediários, não foram observadas diferenças estatísticas relevantes, indicando comportamento mecânico homogêneo dentro desse intervalo, mesmo quando as médias apresentaram pequenas variações.

Esses resultados estatísticos complementam a interpretação visual do Gráfico 3 e reforçam que, embora alguns teores apresentem valores médios mais elevados, é necessário distinguir o que constitui variação natural do processo e o que representa diferença estatisticamente consistente, já que apenas o teor de 90 % demonstrou desempenho significativamente inferior em diversas comparações.

As tendências observadas no presente estudo corroboram com resultados da literatura recente. Conforme descrito por Zarpellon *et al.* (2024), a substituição parcial do



agregado miúdo natural por resíduos de blocos estruturais promove ganhos graduais de resistência até cerca de 30 %, seguidos de reduções progressivas em teores mais elevados (Figura 10), comportamento atribuído ao aumento da porosidade e à menor coesão entre partículas recicladas. Resultados semelhantes foram relatados por Guimarães *et al.* (2021) e Muñoz Pérez *et al.* (2021), que identificaram faixas ideais de substituição entre 20 % e 30 %, nas quais se observa equilíbrio entre resistência mecânica, durabilidade e sustentabilidade.

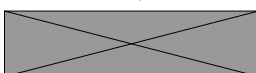
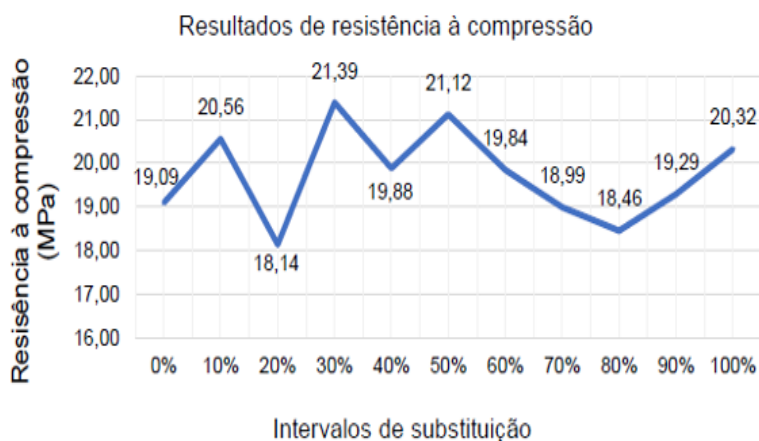


Figura 10 - Resultados de resistência à compressão de Zarpellon *et al.* (2024).

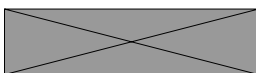


Fonte: Adaptado de Zarpellon *et al.* (2024).

Assim, a integração entre os valores médios obtidos, o comportamento observado no Gráfico 3 e os resultados dos testes estatísticos apresentados nas Tabelas 7 e 8 indica que a substituição parcial do agregado miúdo natural por RMC, dentro dos limites avaliados, é tecnicamente viável e alinhada aos padrões observados na literatura. Essas evidências sustentam a continuidade da análise nas seções seguintes e permitem a elaboração de



conclusões fundamentadas no conjunto dos resultados.



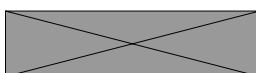
CONSIDERAÇÕES FINAIS



CONSTRUIR
COM CIÊNCIA,
GERIR COM
RESPONSABILIDADE.

O presente estudo avaliou a influência da substituição parcial e total do agregado miúdo natural por resíduo de matriz cimentícia (RMC) nas propriedades do concreto, com ênfase no comportamento mecânico e na trabalhabilidade das misturas. Conforme ilustrado no Gráfico 1, o comportamento do abatimento do tronco de cone (slump test) não seguiu uma tendência linear, apresentando variações pontuais em função do teor de substituição adotado. Essas variações caracterizam apenas o comportamento no estado fresco, sem indicar relação direta ou proporcional com os valores de resistência obtidos, uma vez que não foi identificada correlação estatisticamente comprovada entre abatimento e resistência.

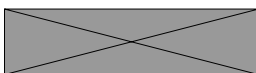
Quanto à resistência à compressão, os teores intermediários de 30 %, 50 %, 60 % e 70 % apresentaram comportamento mais consistente, atingindo valores de 20,5 MPa, 19,6 MPa, 20,4 MPa e 19,4 MPa, respectivamente. Esses valores se mantiveram próximos ou acima do limite mínimo de 20,0 MPa exigido pela NBR 6118 (ABNT, 2023) para concretos estruturais, considerando as variações



experimentais esperadas para ensaios de laboratório. Assim, dentro das condições deste estudo, esses teores apresentaram desempenho compatível com a resistência característica estabelecida pela norma.

As faixas intermediárias de substituição mostraram-se tecnicamente viáveis para aplicação estrutural, desde que o processo de dosagem, o controle de umidade e o adensamento sejam rigorosamente conduzidos. A partir de 80 % de substituição, observou-se redução das médias de resistência, atingindo 17,4 MPa em 80 % e 15,3 MPa em 90 %, com posterior recuperação parcial para 18,1 MPa no teor de 100 %. No entanto, essa redução observada graficamente não indica, por si só, diferença estatística entre todos os teores avaliados.

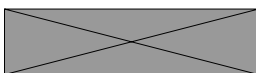
Conforme identificado pelo teste de Tukey, apenas o teor de 90 % apresentou desempenho estatisticamente inferior, especialmente quando comparado aos teores 0 %, 10 %, 20 %, 50 %, 60 % e 70 %. Os teores de 80 % e 100 %, apesar de apresentarem valores médios menores, não diferiram estatisticamente da maior parte dos demais teores



analisados.

Ainda assim, o traço com 100 % de substituição apresentou desempenho próximo ao traço de referência. O teste de Tukey não identificou diferença estatística significativa entre o teor de 100 % e nenhum outro teor, indicando que, embora o valor médio seja numericamente inferior ao dos traços intermediários, esse desempenho não representa queda estatisticamente comprovada. Dessa forma, teores elevados podem apresentar potencial de otimização mediante ajustes na relação água/cimento, emprego de aditivos plastificantes e beneficiamento do resíduo para redução da argamassa aderida.

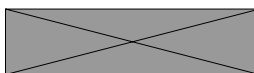
Com base nos resultados obtidos e na análise estatística aplicada, verificou-se que, embora o teor de 30 % tenha apresentado o maior valor médio de resistência à compressão, não é possível afirmá-lo como teor ótimo, uma vez que o teste de Tukey demonstrou que não houve diferença estatisticamente significativa entre os teores intermediários e que o teor de 30 % também não diferiu significativamente dos teores de 80 % e 100 %.



Assim, os resultados indicam que não existe um ponto único de máximo desempenho, mas sim uma faixa de substituição tecnicamente consistente e estatisticamente homogênea, situada entre 30 % e 70 %, na qual as misturas apresentaram comportamento estável, resistência adequada e trabalhabilidade satisfatória.

Essa faixa intermediária demonstrou maior equilíbrio entre variabilidade dos resultados, coesão e estabilidade da mistura, evidenciando-se como a região mais promissora para aplicações estruturais dentro do escopo estudado. Em contrapartida, teores muito elevados de substituição, em especial 90 %, apresentaram desempenho mecanicamente inferior e estatisticamente distinto, demandando estudos complementares voltados ao aprimoramento do beneficiamento do RMC e ajustes de dosagem para mitigar os efeitos negativos associados ao uso de altos percentuais.

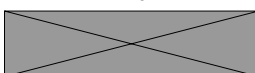
Os resultados desta pesquisa corroboram os estudos de Frotté *et al.* (2017) e Zarpellon *et al.* (2024), que identificaram tendência de ganho de resistência até teores



moderados, seguidos de redução em proporções maiores, ainda que sem diferenças estatísticas marcantes dentro da faixa estável. Trabalhos de Guimarães *et al.* (2021) e Muñoz Pérez *et al.* (2021) também indicam faixas ideais de substituição entre 20 % e 30 %, nas quais se observa equilíbrio entre resistência mecânica, durabilidade e sustentabilidade.

Em consonância com esses autores, o presente trabalho reforça a viabilidade técnica da incorporação gradual do RMC em concretos convencionais, evidenciando seu potencial de aplicação em condições laboratoriais controladas. Todos os objetivos propostos foram plenamente alcançados. O objetivo geral, que consistiu em verificar as propriedades do concreto produzido com diferentes teores de RMC e avaliar sua viabilidade técnica em comparação com estudos anteriores, foi atendido, confirmando que o uso desse resíduo é viável e ambientalmente vantajoso.

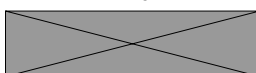
Os objetivos específicos também foram cumpridos: analisaram-se em detalhe as alterações no estado fresco e endurecido, identificaram-se as principais vantagens e



limitações da incorporação do RMC e constatou-se que, embora não exista um teor estatisticamente superior, há uma faixa de substituição eficiente entre 30 % e 70 %, com desempenho estrutural satisfatório. Além disso, houve convergência com as tendências relatadas por Zarpellon *et al.* (2024), validando experimentalmente a metodologia adotada.

De modo geral, o estudo reafirma o potencial técnico e ambiental do reaproveitamento do RMC na produção de concretos sustentáveis, contribuindo para a redução do consumo de agregados naturais e para a mitigação dos impactos ambientais decorrentes da extração mineral. Ademais, reforça a importância de práticas construtivas alinhadas à economia circular e à Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), promovendo uma construção civil mais eficiente e responsável.

Esse compromisso técnico e ambiental está alinhado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030 da ONU, especialmente o ODS 12, que incentiva o uso racional de recursos naturais e a valorização

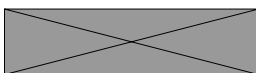


de materiais reciclados. Assim, o emprego do RMC no concreto representa não apenas uma alternativa viável, mas também um passo fundamental rumo à consolidação de um modelo de engenharia civil sustentável, inovador e comprometido com o futuro do planeta.

RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se, primeiramente, a realização de análises mineralógicas e microestruturais, como difração de raios X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV), para aprofundar a compreensão das interações entre o resíduo de matriz cimentícia e a pasta cimentícia, avaliando a influência da argamassa aderida sobre a formação de compostos hidratados e a distribuição de poros na matriz do concreto.

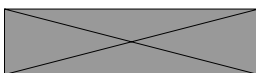
Sugere-se, também, a aplicação do mesmo processo metodológico com a incorporação de aditivos plastificantes e superplastificantes, visando melhorar a trabalhabilidade e a coesão das misturas com altos teores de substituição.



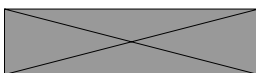
Embora o teor de 100 % não tenha apresentado diferenças estatísticas significativas em relação aos demais teores, observou-se redução dos valores médios de resistência e da fluidez, indicando a necessidade de ajustes para aprimorar o desempenho desse traço, especialmente no estado fresco.

Além disso, recomenda-se a otimização do traço e a calibração da relação água/cimento para concretos com 100 % de RMC, de modo a reduzir a variabilidade dos resultados e viabilizar seu uso em aplicações de maior responsabilidade estrutural. Paralelamente, devem ser realizadas análises econômicas e ambientais detalhadas, considerando custos de beneficiamento, transporte e disponibilidade regional do resíduo, de forma a consolidar sua viabilidade prática e sustentável em escala produtiva.

Por fim, recomenda-se o emprego dos teores intermediários de substituição situados entre 30 % e 70 % em elementos estruturais e não estruturais de baixa e média solicitação mecânica, como pisos, blocos de vedação, calçadas e lajes pré-moldadas. Essa recomendação se fundamenta na estabilidade mecânica observada e



na homogeneidade estatística identificada no presente estudo, contribuindo para o atendimento das metas do ODS 12, Consumo e Produção Responsáveis, bem como para o fortalecimento de práticas construtivas alinhadas à economia circular e à Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei nº 12.305/2010.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS



CONSTRUIR
COM CIÊNCIA,
GERIR COM
RESPONSABILIDADE.

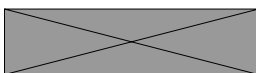
ABDÓ, A.; EL-ZOHAIRY, A.; ALASHKER, Y.; ABD EL-AZIZ BADRAN, M.; AHMED, S. Effect of Treated/Untreated Recycled Aggregate Concrete: Structural Behavior of RC Beams. Sustainability, [S. l.], v. 16, n. 10, p. 4039-4067, 2024. DOI: 10.3390/su16104039.

ALBERTE, E. P. V.; IGLESIAS, J. T. V. Situação e evolução do setor de reciclagem de RCD no Brasil. In: ENCONTRO NACIONAL DE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO, 6., 2019, [S. l.]. Anais... [S. l.: s. n.], 2019. p. 53–62. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/enarc/article/view/3350>. Acesso em: 25 set. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). Método de dosagem do concreto. São Paulo: ABCP, 2020. Disponível em: https://abcp.org.br/wp-content/uploads/2020/07/Metodo_Dosagem_Concreto_ABCPonLINE_22.07.2020.pdf. Acesso em: 28 out. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR NM ISO 3310-1:2010 – Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação – Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico (ISO 3310-1:2000, IDT). Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR ISO 3310- 1:2016 – Test sieves – Technical



requirements and testing – Part 1: Test sieves of metal wire cloth. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5738:2015 – Concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Versão corrigida: 2016. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

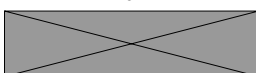
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5739:2018 – Concreto: ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6118:2023 – Projeto de estruturas de concreto. Versão corrigida: 2024. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7211:2022 – Agregados para concreto: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 8953:2015 – Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12655:2015 – Concreto de cimento Portland:



preparo, controle e recebimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15900- 1:2009 – Água para amassamento de concreto: Parte 1 – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

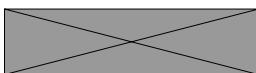
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16697:2018 Cimento Portland: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16889:2020 Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16915:2021 Agregado: amostragem. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16916:2021 Agregado miúdo: determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16917:2021 Agregado graúdo: determinação



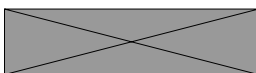
da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16972:2021 Agregados: determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

BASTIDAS-MARTÍNEZ, J. G.; PANIAGUA, A. F.; SÁNCHEZ, L. R.; HERNÁNDEZ, J. A. M.; LÓPEZ, R. E. Recycled concrete aggregate in asphalt mixtures: a review. *Sustainability of Construction Materials*, v. 10, n. 4, p. 155, 2025.

BRASIL. Lei n.º 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n.º 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. *Diário Oficial da União*: Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 7 jan. 2025.

CABRAL, A. E. B. Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição de RCD. 2007. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. DOI:



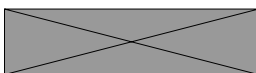
10.11606/T.18.2007.tde-21102007-164548. Acesso em: 30 ago. 2023.

CAPPOZZO, A.; GRESELIN, F.; MURPHY, T. B. A Robust Approach to Model-Based Classification Based on Trimming and Constraints. arXiv preprint arXiv: 1904.06136, 2019. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1904.06136>. Acesso em: 7 nov. 2025.

CHANG, W.; ZHOU, X.; ZANG, Y. A New Algorithm using Component-wise Adaptive Trimming For Robust Mixture Regression. arXiv preprint arXiv: 2005.11599, 2020. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2005.11599>. Acesso em: 7 nov. 2025.

CHEN, X.; LI, Y.; ZHANG, Z.; WANG, P. Discussion of the implementation of water compensation in concrete with recycled aggregates. Construction and Building Materials, 2025.

COUTO, J. A. S.; CARMINATTI, R. L.; NUNES, R. R. A.; MOURA, R. C. A. O concreto como material de construção. Caderno de Graduação – Ciências Exatas e Tecnológicas – UNIT – Sergipe, v. 1, n. 3, p. 49–58, 2013. Disponível em: <https://periodicos.set.edu.br/cadernoexatas/article/view/552>. Acesso em: 30 ago. 2023.



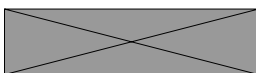
ESTOLANO, A. M. L.; SOUZA, M. T. P.; ALMEIDA, R. F.; OLIVEIRA, V. G.; BARBOSA, L. F. M. Análise da rugosidade de agregados reciclados e a adesão com argamassa cimentícia. *Revista Matéria* (Rio de Janeiro), v. 30, n. 1, p. 1–12, 2025.

EVANGELISTA, L.; BRITO, J. de. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, v. 32, p. 9–14, 2010. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.09.005.

EVANGELISTA, L.; BRITO, J. de. Increased durability of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Materials*, v. 8, n. 9, p. 4300–4316, 2015. DOI: 10.3390/ma8094300.

FERREIRA, A.; MARTINS, M.; MARTINS, M.; MATOS, P.; CASTRO-GOMES, J. Recycled construction and demolition waste as an alternative for natural aggregates in concrete: contribution to the sustainable development goals. *Sustainability*, Basel, v. 14, n. 1923, p. 1-15, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14041923>.

FROTTE, C.; NUBILA, C. S. A. D.; NAGALLI, A.; MAZER, W.; MACIOSKI, G.; OLIVEIRA, L. O. S. Estudo das propriedades físicas e mecânicas de concreto com substituição parcial de agregado natural por agregado



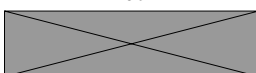
reciclado proveniente de RCD. Matéria (Rio de Janeiro), v. 22, n. 2, e11811, 2017.

GANG, B.; LIN, H.; TONG, T. Unifying Boxplots: A Multiple Testing Perspective. arXiv preprint arXiv: 2510.20259, 2025. Disponível em: <https://arXiv.org/abs/2510.20259>. Acesso em: 7 nov. 2025.

GARCÍA-GONZÁLEZ, J; RODRÍGUEZ-ROBLES, D; JUAN-VALDÉS, A; MORÁN- DEL POZO, J. M.; GUERRA-ROMERO, M. I. Pre-saturation technique of the recycled aggregates: solution to the water absorption drawback in the recycled concrete manufacture. Materials, Basel, v. 7, n. 9, p. 6224-6236, 2014. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma7096224>.

JUNIOR, G. A. F.; LEITE, J. C. T.; MENDEZ, G. D. P.; HADDAD, A. N.; SILVA, J. A. F.; COSTA, B. B. F. A Review of the Characteristics of Recycled Aggregates and the Mechanical Properties of Concrete Produced by Replacing Natural Coarse Aggregates with Recycled Ones—Fostering Resilient and Sustainable Infrastructures. Infrastructures 2025, 10, 213. <https://doi.org/10.3390/infrastructures10080213>

GUIMARÃES, A. S.; DELGADO, J. M. P. Q.; ČERNÝ, R.; BARBOSA de LIMA, A. G. Advances and new challenges

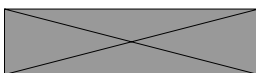


for recycled aggregate concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2021, Article ID 9891634, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2021/9891634>. Acesso em: 7 nov. 2025.

HADDAD, L. D.; COSTA, C. M.; LOPES, P. H. P.; CARVALHO JÚNIOR, A. N. de; SANTOS, W. J. dos. Análise da influência da granulometria do agregado miúdo nas propriedades mecânicas e de durabilidade das argamassas de revestimento. *Matéria*, v. 21, n. 2, p. 357–367, 2016. DOI: 10.1590/S1517-707620160002. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/306132586_Analise_da_influencia_da_granulometria_do_agregado_miudo_nas_propriedades_mecanicas_e_de_durabilidade_das_argamassas_de_revestimento. Acesso em: 6 nov. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Mapa de pedologia do estado de Mato Grosso. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias>. Acesso em: 22 set. 2025.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). Diagnóstico dos resíduos da construção civil no Brasil. Brasília, DF: IPEA, 2017. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/171018_relatorio_residuos_construcao_civil.pdf. Acesso em: 20 jun. 2025.



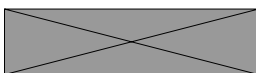
JUNIOR, G. A. F.; LEITE, J. C. T.; MENDEZ, G. P.; HADDAD, A. N.; SILVA, J. A. F.; COSTA, B. B. F. da. A review of the characteristics of recycled aggregates and the mechanical properties of concrete produced by replacing natural coarse aggregates with recycled ones—Fostering resilient and sustainable infrastructures. *Infrastructures*, v. 10, n. 8, p. 213, 2025. DOI: 10.3390/infrastructures10080213.

LARSEN, O. A.; KOMOLEVA, I. V.; TOBOLEV, P. D.; NARUTS, V. V.; BADAMSHIN, S. O. Structure and properties of recycled concrete aggregate. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 1614, p. 012005, 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1614/1/012005.

LETELIER, V.; FERNÁNDEZ, A. Effect of mortar reduction in recycled aggregates used in concrete. *Open Construction and Building Technology Journal*, v. 11, p. 363–370, 2017.

LI, Q.; WANG, N.; ZHOU, H.; CHEN, X.; SONG, Y. Performance enhancement of recycled fine aggregates treated by mechanical–chemical methods. *Materials Research Proceedings*, v. 24, p. 45–56, 2023.

MAHMOOD, A.; NANOS, N.; BEGG, D. An evaluation of the strength for recycled fine aggregate replacement in



cementitious mortars. *Buildings*, v. 14, n. 2, p. 470, 2024. DOI: 10.3390/buildings14020470.

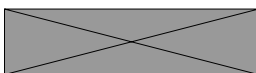
MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2008.

MUÑOZ PÉREZ, S. P.; DÍAZ SÁNCHEZ, D. M.; GAMARRA CAPUÑAY, E. E.; CHANAME BUSTAMANTE, J. A. The influence of RCD in replacement of aggregates for the elaboration of concrete: a literature review. *Ecuadorian Science Journal*, v. 5, n. 2, 2021. DOI: 10.46480/esj.5.2.111. Disponível em: <https://doi.org/10.46480/esj.5.2.111>. Acesso em: 7 nov. 2025.

NEDLJKOVIĆ, M.; VISSER, J.; ŠAVIJA, B.; VALCKE, S.; SCHLANGEN, E. Use of fine recycled concrete aggregates in concrete: a critical review. *Journal of Building Engineering*, v. 38, p. 102196, 2021. DOI: 10.1016/j.job.2021.102196.

NENO, C.; BRITO, J. de; VEIGA, R. Using fine recycled concrete aggregate for mortar production. *Materials Research*, v. 17, n. 1, p. 168–177, 2014. DOI: 10.1590/S1516-14392013005000164.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do concreto*. 5. ed. São Paulo: Bookman, 2016.



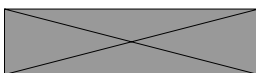
NOGUEIRA, L. G. S. Utilização de RCD na confecção de um concreto sustentável. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas – FATECS, Brasília, 2013. Disponível em: <https://repositorio.uniceub.br/jspui/bitstream/235/6363/1/20916233.pdf>. Acesso em: 29 ago. 2023.

PEREIRA, A. L.; LIMA, R. T.; CASTRO, F. A. Aproveitamento de resíduos na construção civil: aspectos econômicos e ambientais. Revista Matéria, Rio de Janeiro, v. 27, n. 4, p. 1–12, 2022.

PREFEITURA MUNICIPAL DE NOVA XAVANTINA. História de Nova Xavantina e dados gerais do município. Disponível em: <https://novaxavantina.mt.gov.br>. Acesso em: 22 set. 2025.

SANTANA, T. S.; PEREIRA, C. H. A. F. Avaliação da influência da utilização de agregado miúdo reciclado em argamassas estabilizadas. Ambiente Construído, v. 20, n. 3, p. 305–318, 2020. DOI: 10.1590/s1678-86212020000300430.

SANTOS, F. S.; AZEREDO, P. H. A.; VENEU, D. M. Avaliação de concreto sustentável contendo teores de resíduos de agregados reciclados. Brazilian Journal of



Development, v. 6, n. 7, p. 45457–45471, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n7-244. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/12996>. Acesso em: 6 nov. 2025.

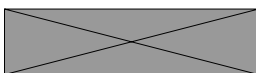
SILVA, R. B. da; ANGULO, S. C.; PILEGGI, R. G.; SILVA, C. O. Concretos secos produzidos com agregados reciclados de RCD separados por densidade. *Ambiente Construído*, v. 15, n. 4, p. 335-349, out./dez. 2015. DOI: 10.1590/s1678- 86212015000400054. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/7znYKMj3jhgPWyxWdX8RQr/?lang=pt>. Acesso em: 6 nov. 2025.

SILVA, R. V.; BRITO, J. Comparative analysis of the properties of recycled and natural aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 24, n. 8, p. 1646–1651, 2010. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.02.035.

SOSA, M. E. A critical review of the resulting effective water-to-cement ratio in recycled aggregate concretes. *Cement & Concrete Composites*, v. 116, p. 103572, 2021.

RODRIGUES, F. A new method to determine the density and water absorption of fine recycled concrete aggregates. *Materials Research*, v. 16, n. 4, 2013.

TRUMMER, P.; AMMERER, G.; SCHERZ, M. Sustainable



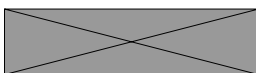
consumption and production in the extraction and processing of raw materials – measures sets for achieving SDG Target 12.2. Sustainability, Basel, v. 14, n. 10971, p. 1-18, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su141710971>.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. R. L. Dosagem dos concretos de cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (org.). Concreto: ciência e tecnologia. São Paulo: Ibracon, 2022. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/1a05cae2-8454-49ce-aebe-c334e88b8c20/Helene-2022-dosagem.pdf>. Acesso em: 28 out. 2025.

TZOUMAS, V.; ANTONANTE, P.; CARLONE, L. Outlier-Robust Spatial Perception: Hardness, General-Purpose Algorithms, and Guarantees. arXiv preprint arXiv: 1903.11683, 2019. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1903.11683>. Acesso em: 7 nov. 2025.

WANG, Y.; LIU, J.; ZHU, P.; LIU, H.; WU, C. Investigation of adhered mortar content on recycled aggregate using image analysis method. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 33, n. 9, p. 04021225, 2021. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003864.

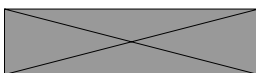
ZARPELLON, C. S. de S.; MORAIS, P. H. R. B. de; SOUZA, L. P. S.; RAMALHO, L. V.; TUSSOLINI, M.; FONSECA, G. D. B.; CHIOVETO, A. T.; FERREIRA, M.



D.; ANDRADE, K. L.; OLIVEIRA, R. A. de. Gestão de resíduos provenientes de matrizes cimentícias na produção de concreto estrutural. João Pessoa: Periodicojs Editora, 2024. E-book. ISBN 978-65-6010-129-6.

ZARPELLON, C. S. de S.; SOUZA, M. G. de; OLIVEIRA, R. A. de; CHIOVETO, A. T.; TUSSOLINI, M.; RAMALHO, L. V.; FONSECA, G. D. B.; FERREIRA, M. D.; ARRUDA, E. M. Análise experimental para dosagem de concreto estrutural. Caderno Pedagógico, [S. l.], v. 21, n. 10, p. e9219, 2024. DOI: 10.54033/cadpedv21n10-179. Disponível e m : <https://ojs.studiespublicacoes.com.br/ojs/index.php/cadped/article/view/9219>. Acesso em: 1 nov. 2025.

ZHANG, W.; LI, H.; FENG, X.; ZHAO, M. Investigation of water absorption behavior of recycled aggregates for use in high-strength concrete. Materials, v. 16, n. 13, p. 4505, 2023. DOI: 10.3390/ma16134505.



Esta obra reúne conhecimentos científicos atualizados, promovendo uma abordagem crítica e multidisciplinar sobre os principais desafios e avanços em sua área de estudo. Com capítulos elaborados por pesquisadores e profissionais experientes, o livro integra evidências, práticas e reflexões que contribuem para a formação acadêmica e o aperfeiçoamento profissional. Destina-se a estudantes, docentes e especialistas que buscam uma compreensão aprofundada e aplicada dos temas apresentados, estimulando a produção do conhecimento e a inovação científica.

