

Avaliação da viabilidade técnica e econômica do concreto reciclado em comparação com o concreto produzido a partir de matéria-prima virgem

Jaime Bittencourt ¹

Geisla Aparecida Maia Gomes²

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade técnica e econômica do uso de concreto reciclado, produzido a partir de resíduos de construção e demolição, comparativamente ao concreto convencional elaborado com matéria-prima virgem. Considerando a importância da construção civil e a crescente preocupação com a gestão de resíduos e a sustentabilidade, a pesquisa busca determinar se o concreto reciclado atende aos requisitos necessários para sua utilização em obras civis. Para isso, serão conduzidos ensaios laboratoriais, incluindo testes de resistência à compressão e absorção de água, para avaliar as propriedades mecânicas e físicas do concreto reciclado em comparação com o convencional. Além disso, será realizada uma análise econômica para comparar os custos de produção e verificar se o concreto reciclado representa uma opção economicamente viável. Com base nos resultados obtidos, a pesquisa fornecerá insights sobre a possibilidade de promover a sustentabilidade na construção civil, reduzindo a quantidade de resíduos destinados a aterros e diminuindo a extração de recursos naturais, contribuindo assim para um setor mais ambientalmente responsável e economicamente eficiente.

Palavras-Chave: Concreto Reciclado. Resíduos de Construção e Demolição. Agregados Reciclados

1 INTRODUÇÃO

O uso do concreto reciclado tem sido uma prática cada vez mais adotada na construção civil, uma vez que apresenta benefícios ambientais e econômicos significativos.

¹ Graduando em Engenharia Civil, Unis MG jaime_bittencourt@hotmail.com

² Prof. Esp. Geisla Aparecida Maia Gomes. Engenheira Civil, Mestranda em Estatística Aplicada. Docente no Centro Universitário do Sul de Minas.

Segundo Zerbino et al. (2019), a utilização do concreto reciclado contribui para a redução de resíduos da construção civil, já que os resíduos de concreto são reaproveitados na produção de novos materiais.

Além disso, o concreto reciclado também apresenta vantagens do ponto de vista econômico. De acordo com Filho e John (2018), a produção de concreto reciclado pode gerar economia de até 30% em relação ao concreto convencional, uma vez que os custos de transporte e disposição de resíduos são reduzidos e há economia de matéria-prima.

Outra vantagem ambiental do uso do concreto reciclado é a redução da extração de recursos naturais. Segundo Souza et al. (2019), a produção de concreto convencional demanda grandes quantidades de agregados naturais, que são obtidos por meio da extração de pedreiras e causam impactos ambientais significativos. Já o concreto reciclado utiliza agregados provenientes de RCD, que seriam descartados no meio ambiente.

A utilização do concreto reciclado também contribui para a redução da emissão de gases de efeito estufa. Segundo o Instituto de Engenharia (2019), a produção de cimento, que é um dos principais componentes do concreto, é responsável por cerca de 8% das emissões globais de CO₂. Já o uso de concreto reciclado reduz a necessidade de produção de cimento, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa.

A construção civil desempenha um papel fundamental na economia global, mas enfrenta desafios significativos relacionados à geração de resíduos sólidos. No Brasil, a construção civil é responsável por uma parcela substancial dos resíduos sólidos produzidos no país, com um impacto considerável no meio ambiente e na saúde pública. Em resposta a esse cenário, a reciclagem de resíduos da construção civil tem surgido como uma alternativa promissora para abordar esse desafio e promover a sustentabilidade na indústria da construção.

O foco deste trabalho é avaliar a viabilidade técnica e econômica do uso de concreto reciclado, produzido a partir de resíduos de construção e demolição, em comparação com o concreto convencional fabricado a partir de matéria-prima virgem. A necessidade de investigar essa viabilidade é evidente devido às implicações significativas para o meio ambiente, a saúde pública e a eficiência econômica da indústria da construção.

Este trabalho aborda duas hipóteses essenciais: a hipótese técnica, que sugere que o concreto reciclado pode apresentar propriedades mecânicas e de desempenho em serviços semelhantes ou até superiores às do concreto convencional; e a hipótese econômica, que

aponta que o concreto reciclado pode ser economicamente viável, considerando os custos de produção e uso em projetos de construção.

Para alcançar os resultados, será conduzida uma pesquisa com a realização de ensaios laboratoriais para avaliar as propriedades mecânicas e a absorção de água do concreto reciclado em comparação com o concreto convencional. Além disso, será feita uma análise econômica para avaliar os custos envolvidos na produção e uso desses materiais em projetos reais.

2 CONCRETO RECICLADO E A SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Os resíduos de construção e demolição (RCD) representam um desafio ambiental significativo, mas o uso do concreto reciclado tem se destacado como uma solução viável e sustentável. No Brasil, regulamentações como a Resolução nº 307/2002 do CONAMA e normas técnicas, como a NBR 15112/2004 e a NBR 15116:2021, estabelecem diretrizes para a gestão de RCD e a produção de concreto reciclado. Segundo Angulo et al (2011), este tipo de material, obtido a partir da reutilização de resíduos de concreto, pode apresentar uma composição bem variada, sendo necessário fazer um controle rigoroso a fim de atender certas exigências, devendo apresentar teor baixo de contaminantes ($< 1\%$), baixa absorção de água ($< 7\%$) e teores controlados de finos ($< 10\%$) (RILEM RECOMMENDATION, 1994; ABNT NBR 15116:2004; DIN 4226-100:2002).

2.1 Resíduos de construção e demolição (RCD)

Os resíduos de construção e demolição (RCD) são materiais provenientes de obras de construção civil, como reformas, demolições e construções, e podem ser subdivididos em categorias, tais como concreto, argamassa, madeira, plástico, metal, entre outros.

No Brasil, a gestão dos RCD é regulamentada pela Resolução nº 307/2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Segundo a norma, os RCD devem ser gerenciados de forma a minimizar os impactos ambientais e garantir a proteção da saúde pública.

Existem normas técnicas específicas que estabelecem procedimentos para a gestão de RCD, como a NBR 15112/2004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que trata da classificação dos resíduos da construção civil e sua destinação final. A norma classifica os resíduos em quatro classes: classe A, composta por resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados; classe B, composta por resíduos recicláveis para outras destinações, como plásticos e papel; classe C, composta por resíduos que podem apresentar riscos à saúde pública ou ao meio ambiente e que devem ser destinados a locais licenciados; e classe D, composta por resíduos perigosos que devem ser destinados a locais específicos.

Para a produção de concreto reciclado é utilizado resíduos de classe A, mas sua composição varia de acordo com a origem dos RCD utilizados na produção dos agregados. No entanto, segundo Zerbino et al. (2019), a norma técnica brasileira NBR 15116:2021 estabelece que os agregados reciclados devem atender aos requisitos de qualidade especificados para os agregados naturais, tais como granulometria, absorção, desgaste e impurezas.

Segundo a norma técnica brasileira ABNT NBR 15116:2021, que estabelece os requisitos para agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil, os agregados reciclados classe A são aqueles que apresentam características físicas, químicas e mecânicas compatíveis com os agregados naturais. Esses agregados podem ser utilizados na produção de concreto desde que atendam aos requisitos estabelecidos na ABNT NBR 7211:2019, que estabelece o procedimento para a determinação do traço de concreto.

De acordo com Martins et al. (2021), a substituição parcial de agregados naturais por agregados reciclados pode resultar em concreto com propriedades físicas e mecânicas semelhantes ao concreto convencional. Porém, é importante ressaltar que a resistência à compressão do concreto reciclado pode ser menor que a do concreto convencional, devido à presença de impurezas e materiais orgânicos nos agregados reciclados.

Além disso, segundo Silva (2021), a utilização de agregados reciclados pode influenciar na trabalhabilidade e na durabilidade do concreto. Por isso, é fundamental realizar testes de caracterização dos agregados reciclados e do concreto produzido, a fim de garantir a qualidade e a segurança das estruturas construídas com esses materiais.

2.2 Concreto reciclado

O concreto reciclado é um material produzido a partir da reutilização de resíduos de concreto, como blocos, vigas, lajes e outros componentes, que são quebrados e processados para formar um novo agregado, que é misturado com cimento e água para formar uma nova mistura de concreto (ALMEIDA; JOSÉ; JÚNIOR, 2018).

Segundo Almeida, José e Júnior (2018), o concreto reciclado pode ser classificado em dois tipos: o concreto reciclado de alta qualidade e o concreto reciclado de baixa qualidade. O primeiro é produzido a partir de resíduos de concreto de alta qualidade, com baixo teor de impurezas, e é adequado para uso em estruturas de concreto, como colunas e vigas. Já o segundo é produzido a partir de resíduos de concreto de baixa qualidade, com maior teor de impurezas, e é mais adequado para uso em pavimentação e outras aplicações de menor exigência estrutural.

Outra característica importante do concreto reciclado é sua contribuição para a sustentabilidade ambiental, já que a reutilização de resíduos de concreto reduz a quantidade de material descartado em aterros e diminui a necessidade de extração de novos recursos naturais. Segundo Matos et al (2015), a produção de concreto reciclado consome menos energia e gera menos emissões de gases de efeito estufa do que a produção de concreto convencional.

O concreto reciclado apresenta propriedades físicas e mecânicas semelhantes ao concreto convencional, porém, com algumas diferenças em sua composição e características (SOUSA et al., 2019). De acordo com a pesquisa realizada por Sousa et al. (2019), as propriedades físicas do concreto reciclado, tais como densidade, absorção de água e porosidade, podem ser afetadas pela quantidade e qualidade dos agregados reciclados utilizados na sua produção.

Já as propriedades mecânicas do concreto reciclado, como resistência à compressão, tração e flexão, são influenciadas pela qualidade dos agregados reciclados, pela relação água/cimento e pelos procedimentos de produção (PEREIRA et al., 2012). Miranda et al. (2012) afirmam que o uso de agregados reciclados de alta qualidade e a adoção de procedimentos adequados de produção podem resultar em concreto reciclado com resistência mecânica similar ao concreto convencional.

Além disso, a presença de impurezas nos agregados reciclados, como argamassa e outros materiais aderidos, pode afetar a qualidade do concreto reciclado e diminuir suas propriedades mecânicas (ALMEIDA; JOSÉ; JÚNIOR, 2018).

Contudo, segundo Almeida, José e Júnior (2018), é possível melhorar as propriedades físicas e mecânicas do concreto reciclado com a adição de aditivos e materiais suplementares, como cinza volante e sílica ativa, que ajudam a melhorar sua trabalhabilidade e resistência.

2.3 Viabilidade técnica e econômica do concreto reciclado

O concreto reciclado tem sido amplamente estudado e utilizado em obras civis, apresentando viabilidade técnica e econômica, além de contribuir para a sustentabilidade do setor de construção civil. No Brasil, diversos estudos de caso têm comprovado a eficácia e vantagens do uso de concreto reciclado.

Um exemplo de viabilidade técnica e econômica é o estudo realizado por Menegotti et al. (2020), que analisou o uso de concreto reciclado em pavimentos urbanos. Os autores concluíram que o uso de concreto reciclado apresentou desempenho semelhante ao concreto convencional, além de ter gerado uma economia de 17% nos custos totais da obra.

Outro caso de sucesso é o do edifício sede da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp), que utilizou concreto reciclado em sua estrutura. Segundo o relato da empresa, a utilização de concreto reciclado resultou em uma economia de 6% nos custos totais da obra (SABESP, 2022).

Além disso, o uso de concreto reciclado tem se mostrado viável e sustentável também na construção de moradias populares, como demonstrado no projeto Minha Casa Minha Vida em São Paulo. Nesse projeto, foram utilizados blocos de concreto reciclado em substituição aos blocos convencionais, resultando em uma economia de 10% nos custos de produção e contribuindo para a redução de resíduos gerados pela construção civil (CUNHA et al., 2017).

2.4 Tecnologias e equipamentos utilizados na produção de concreto reciclado

A produção de concreto reciclado envolve a utilização de equipamentos específicos para a trituração e classificação dos resíduos de construção e demolição (RCD) utilizados na produção dos agregados reciclados. Segundo Figueiredo et al (2020), um dos processos

empregados na produção de concreto reciclado é a britagem por impacto, que consiste na utilização de um equipamento chamado britador de impacto para a trituração dos resíduos.

Os autores ainda afirmam que para fazer a triagem dos agregados reciclados, é importante utilizar equipamentos de classificação, como peneiras e separadores magnéticos, que permitem a separação dos materiais de acordo com o tamanho e características físicas. Segundo Amaral et al. (2019), os equipamentos mais comuns utilizados na produção de concreto reciclado são:

- Britador de mandíbulas: utilizado para quebrar os blocos de concreto em pedaços menores, permitindo a separação dos agregados;
- Peneira vibratória: utilizada para classificar os agregados de acordo com a granulometria;
- Separador magnético: utilizado para separar os resíduos metálicos do agregado reciclado;
- Lavador de areia: utilizado para lavar o agregado reciclado e remover impurezas como argamassa e outros materiais aderidos;
- Misturador: utilizado para misturar os agregados reciclados com o cimento, água e outros componentes necessários para a produção do concreto reciclado.

Além desses equipamentos, há também processos específicos que podem ser empregados na produção de concreto reciclado, como o processo de aquecimento controlado, que permite a remoção da argamassa aderida aos agregados.

3 METODOLOGIA

Para se atingir o resultado foi adotado uma metodologia que visa comparar a viabilidade técnica e econômica do uso de concreto reciclado com o concreto produzido a partir de matéria-prima virgem.

Inicialmente, foi feita uma revisão bibliográfica para coletar informações sobre o tema e embasar o projeto. Em seguida, foi realizada a coleta de seis amostras de concreto produzido a partir de agregados reciclados e seis amostras de concreto produzido a partir de matéria-prima virgem. Todas as amostras foram devidamente etiquetadas com numeração e identificação do tipo de agregado utilizado. O traço do concreto utilizado nas amostras foi

1:2:3, tendo utilizado cimento CP-V, areia média virgem e reciclada como agregado miúdo e brita zero virgem e reciclada como agregado graúdo. As amostras foram ensaiadas no Laboratório de Materiais de Construção do Centro Universitário Sul de Minas - UNIS-MG para avaliar suas propriedades mecânicas, sendo realizados o ensaio de resistência à compressão e o teste de absorção de água do concreto

O ensaio de compressão foi realizado de acordo com a ABNT NBR 5739:2018 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, seguindo os seguintes procedimentos:

Preparação das amostras: Foram moldadas três amostras de concreto feito a partir de agregados reciclados e três amostras de concreto feito a partir de agregados virgem. As amostras de concreto foram moldadas em cilindros de dimensões padronizadas, com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm untado com óleo para facilitar a retirada da forma. A moldagem foi realizada de acordo com a ABNT NBR 5738:2016 - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.

Cura das amostras: As amostras de concreto foram mantidas em ambiente protegido da luz solar por um período de 24 horas após a moldagem. Após o período, as amostras foram retiradas da forma e continuaram o processo de cura por 7 dias, até o dia do ensaio.

Preparação da máquina de ensaio: A máquina de ensaio de compressão foi calibrada e ajustada para o ensaio, de acordo com a ABNT NBR NM ISO 7500-1:2023 - Máquinas de ensaio de materiais - Calibração e verificação da precisão - Parte 1: Máquinas de ensaio uniaxial. O dispositivo de apoio da amostra foi nivelado e possui uma superfície plana e rígida.

Realização do ensaio: As amostras de concreto foram posicionadas entre os dispositivos de apoio da máquina de ensaio e a carga foi aplicada gradualmente até a ruptura da amostra. A taxa de carregamento foi controlada para não ultrapassar 0,2 MPa/s e a carga máxima foi registrada.

Cálculo da resistência à compressão: A resistência à compressão média da amostra foi calculada dividindo-se a carga máxima pela área da seção transversal do cilindro. Foram consideradas três amostras de cada tipo de concreto para obtenção da resistência média.

Registro dos resultados: Os resultados do ensaio foram registrados contendo as informações de idade da amostra, a resistência à compressão média e individual de cada corpo de prova.

Interpretação dos resultados: Os resultados obtidos no ensaio foram interpretados de acordo com a ABNT NBR 6118:2014 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Os dados foram utilizados apenas para fins comparativos de resistência à compressão entre o concreto produzido com agregados reciclados e o concreto produzido a partir de agregados virgem.

Outro procedimento que foi realizado é o teste de absorção de água do concreto, seguindo a norma ABNT NBR 9778:2009 - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.

Preparação e identificação das amostras: Os corpos de prova foram preparados seguindo as especificações da NBR 5739. Cada corpo de prova foi devidamente identificado com número e tipo de agregado utilizado na amostra.

Secagem: Após o período de 24hrs de secagem na forma, as amostras foram desmoldadas e colocadas em estufa, à temperatura de $(105 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ por um período de 24hrs até atingirem massa constante, conforme especificado na NBR 5738. Foi registrado a massa seca de cada corpo de prova.

Absorção de água: Os corpos de prova foram colocados em água potável à temperatura de $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ e ficaram imersos por um período de 48 horas. Após o período de imersão, os corpos de prova foram retirados da água e envoltos em um pano para remover o excesso de água superficial, em seguida, as amostras foram pesadas e foi registrado a massa úmida de cada corpo de prova.

Cálculo da absorção de água: A absorção de água foi calculada utilizando a fórmula: $\text{Absorção de água (\%)} = [(\text{Massa úmida} - \text{Massa seca}) / \text{Massa seca}] \times 100$. Foi considerado o valor médio da absorção de água de três corpos de prova de cada tipo de concreto para representar a absorção de água de cada concreto ensaiado.

A partir dos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais, foi feita uma análise comparativa entre o desempenho do concreto reciclado e do concreto produzido a partir de matéria-prima virgem. Foram avaliadas as características físicas dos materiais, como absorção de água e resistência à compressão.

Em seguida, foi realizada uma análise econômica para comparar os custos de produção do concreto reciclado com o concreto produzido a partir de matéria-prima virgem. Foram considerados os custos de matéria prima que envolvem a produção de 1m^3 de cada tipo de concreto.

Por fim, foram apresentadas as conclusões da pesquisa e as considerações para o uso de concreto reciclado em diferentes tipos de projetos. A metodologia adotada permitiu avaliar de forma sistemática e objetiva a viabilidade técnica e econômica do uso de concreto reciclado, contribuindo para o desenvolvimento sustentável da construção civil.

4 RESULTADOS

Na cidade de Varginha MG, está localizada a primeira usina de reciclagem de resíduos da construção civil do Sul de Minas, a ECOVIA - Reciclagem de Resíduos da Construção Civil, pertencente ao grupo LIMPAVIA, que atua no município desde 2008. A usina tem como objetivo o descarte adequado de resíduos de construção e demolição (RCD). Filiada à ABRECON, a usina opera desde 2015, sendo a única no Sul de Minas que recebe resíduos de construção e demolição de terceiros para a reciclagem.

A usina tem capacidade de processamento de 200m³ diários e separa os resíduos recebidos em seu pátio de triagem. Segundo o proprietário da empresa, cerca de 65% dos resíduos recebidos diariamente são passíveis de reciclagem como agregados, que são novamente comercializados, sendo eles: brita e areia de diferentes granulometrias. A empresa forneceu brita zero e areia média reciclada para realização dos ensaios descritos neste trabalho.

O traço do concreto em ambos os testes foi fixado em 1:2:3, composto por cimento CP-V, areia média, e brita zero. Todos os corpos de prova foram produzidos no dia 09/11/2023 utilizando o laboratório de materiais de construção do Centro Universitário Sul de Minas. Todos os doze moldes utilizados foram limpos e untados com óleo mineral.

Para produzir os corpos de prova com agregados reciclados foram utilizados:

Cimento CP-V - 3,5kg

Areia Média reciclada - 7kg

Brita zero reciclada – 10,5 KG

Água – 2,5L

Para produzir os corpos de prova com agregados virgem foram utilizados:

Cimento CP-V - 3,5kg

Areia Média virgem - 7kg

Brita zero virgem – 10,5 KG

Água – 2,5L

Todos os corpos de prova ficaram na forma por 24 horas até serem desenformados.

4.1 Resultados do Ensaio de Resistência à Compressão:

Os ensaios de resistência à compressão foram conduzidos após um período de cura de sete dias. Foram utilizados dois conjuntos de corpos de prova: um com agregado reciclado (AR4, AR5, AR6) e outro com agregado virgem (AV4, AV5, AV6).

Os valores de resistência foram medidos em toneladas-força (TF) e posteriormente convertidos para megaPascal (MPa), utilizando a fórmula:

$$\text{Resistência (MPa)} = (\text{Força (TF)} \times 9806,65 / \text{Área da Seção transversal (m}^2\text{)}) / 1000000$$

Onde 9.80665 é o fator de conversão de toneladas-força para Newton. A área da seção transversal foi mantida constante para todos os corpos de prova, tendo cada forma 10cm de diâmetro, a área ficou estabelecida em 0,0079m²

4.1.1 Resultados do Teste de Resistência à Compressão com agregado reciclado (AR):

$$\text{AR4} = 5,76 \text{ TF} - \text{Convertendo para MPa} = (5,76\text{TF} \times 9806,65 / 0,0079\text{m}^2) / 1000000 = 7,15 \text{ MPa}$$

AR5 = 4,59 TF - Convertendo para MPa = $(4,59\text{TF} \times 9806,65/0,0079\text{m}^2) / 1000000 = 5,95 \text{ MPa}$

AR6 = 7,16 TF - Convertendo para MPa = $(7,16\text{TF} \times 9806,65/0,0079\text{m}^2) / 1000000 = 8,89 \text{ MPa}$

Resistência média dos corpos de prova com agregado reciclado = 7,33 Mpa

4.1.2 Resultados da resistência à compressão com agregado virgem (AV):

AV4 = 7,00 TF - Convertendo para MPa = $(7,00\text{TF} \times 9806,65/0,0079\text{m}^2) / 1000000 = 8,69 \text{ MPa}$

AV5 = 7,64 TF - Convertendo para MPa = $(7,64\text{TF} \times 9806,65/0,0079\text{m}^2) / 1000000 = 9,48 \text{ MPa}$

AV6 = 7,00 TF - Convertendo para MPa = $(7,00\text{TF} \times 9806,65/0,0079\text{m}^2) / 1000000 = 8,69 \text{ MPa}$

Resistência média dos corpos de prova com agregado virgem = 8,95 Mpa

4.1.3 Interpretação dos Resultados do Teste de Resistência à Compressão:

Observa-se que, em média, os corpos de prova com agregado reciclado apresentaram uma resistência à compressão 18,1% menor em comparação com os corpos de prova com agregado virgem. A diferença nas resistências pode ser influenciada por características intrínsecas dos agregados reciclados, indicando que o processo de reciclagem pode afetar as propriedades mecânicas do concreto.

4.2 Resultados do Teste de Absorção de Água:

Os resultados do teste de absorção de água foram obtidos medindo a variação de peso das amostras antes e após a imersão em água. As amostras ficaram na estufa a 105° por 24h

antes da pesagem com massa seca, após ficaram imersas em água potável por 48h antes da pesagem com massa úmida. Foram utilizados dois conjuntos de corpos de prova: um com agregado reciclado (AR1, AR2, AR3) e outro com agregado virgem (AV1, AV2, AV3). As porcentagens de absorção foram calculadas utilizando a fórmula:

$$\text{Absorção (\%)} = ((\text{Peso úmido} - \text{Peso seco}) / \text{Peso seco}) \times 100$$

4.2.1 Absorção de água em amostras com agregado reciclado:

$$\text{AR1: Peso seco: 2,98kg - Peso úmido} = 3,32 \text{ Kg}$$

$$\text{Absorção} = ((3,32-2,98) / 2,98) * 100 = 11,41\%$$

$$\text{AR2: Peso seco: 3,00kg - Peso úmido} = 3,34 \text{ Kg}$$

$$\text{Absorção} = ((3,34-3,00) / 3,00) * 100 = 11,33\%$$

$$\text{AR3: Peso seco: 3,00kg - Peso úmido} = 3,34 \text{ Kg}$$

$$\text{Absorção} = ((3,34-3,00) / 3,00) * 100 = 11,33\%$$

$$\text{Absorção média dos corpos de prova com agregado reciclado} = 11,36\%$$

4.2.2 Absorção de água em amostras com agregado virgem:

$$\text{AV1: Peso seco: 3,00kg - Peso úmido} = 3,22 \text{ Kg}$$

$$\text{Absorção} = ((3,22-3,00) / 3,00) * 100 = 7,33\%$$

$$\text{AV2: Peso seco: 3,12kg - Peso úmido} = 3,38 \text{ Kg}$$

$$\text{Absorção} = ((3,38-3,12) / 3,12) * 100 = 8,33\%$$

$$\text{AV3: Peso seco: 3,16kg - Peso úmido} = 3,44 \text{ Kg}$$

$$\text{Absorção} = ((3,44-3,16) / 3,16) * 100 = 8,86\%$$

Absorção média dos corpos de prova com agregado virgem = 8,17%

4.2.3 Interpretação dos Resultados do Teste de Absorção de Água:

Os resultados indicam que os corpos de prova com agregado reciclado tendem a absorver uma quantidade 16,64% maior de água em comparação com os corpos de prova com agregado virgem. Isso pode ser atribuído às características físicas dos agregados reciclados, como maior porosidade em comparação com os agregados virgem. Esse resultado destaca a importância de considerar a absorção de água ao projetar estruturas de concreto com agregado reciclado.

No geral, tanto o Teste de Resistência à Compressão quanto o Teste de Absorção de Água apresentaram desempenho inferiores aos números indicativos estabelecidos pela norma, isso se deve porque a quantidade de água que foi utilizada no traço do concreto na preparação dos corpos de prova ficou acima da média. Como o objetivo dos testes é apenas para fins comparativos entre os tipos de concreto, foi respeitada a mesma proporção para ambos.

4.3 Análise Econômica

De acordo com a tabela SINAPI, o consumo de cimento para 1 m³ de concreto no traço 1:2:3 é de 344 kg. Para o traço 1:2:3, a relação água-cimento é de 0,5. Portanto, para produzir 1 m³ de concreto com esse traço, é necessário 0,5 kg de água por kg de cimento.

Quantidade de Água = Quantidade de cimento x Relação água-cimento

Quantidade de Água = 344 Kg x 0,5 = 172 Kg de Água

Seguindo as proporções do traço do concreto utilizado para análise, temos:

Quantidade de Areia Média: 344 kg x 2 = 688 kg

Quantidade de Brita Zero: 344 Kg x 3 = 1032 Kg

Portanto, para produzir 1 m³ de concreto no traço 1:2:3, são necessários 177 kg de água, 344 kg de cimento, 688 Kg de areia média e 1032 Kg de brita zero.

4.3.1 Custo da matéria prima na cidade de Varginha MG

Foi feita uma pesquisa e considerado o preço médio de três fornecedores de cada material, também foi considerado o preço dos agregados reciclados fornecidos pela ECOVIA, único fornecedor deste tipo de agregado na região.

Cimento CP-V = R\$35,00 (saco de 50Kg)

Areia Média Virgem = R\$ 215,00 m²

Brita Zero Virgem = R\$ 260,00 m³

Areia Média Reciclada = R\$ 30,00 m³

Brita Zero Reciclada = R\$ 50,00 m³

4.3.2 Custo de produção de 1m³ de concreto

Para calcular o custo de produção de cada tipo de concreto, foi considerado o peso específico da brita zero 1200 kg/m³ e da areia média 1600 kg/m³. Para os agregados reciclados foram considerados com os mesmos valores atribuídos aos agregados virgem.

Traduzindo o traço dos agregados do concreto para metros cúbicos para precificar a produção:

Areia média: $688 \text{ Kg} / 1600 \text{ Kg/m}^3 = 0,43 \text{ m}^3$

Brita zero: $1032 \text{ Kg} / 1200 \text{ Kg/m}^3 = 0,86 \text{ m}^3$

Cimento CP-V: $344 \text{ Kg} / 50 \text{ Kg/saco} = 6,88 \text{ Sacos}$

Custo de produção do concreto reciclado: Cimento (6,88 sacos x R\$ 35,00) + Areia (0,43 m³ x R\$ 30,00) + Brita (0,86 m³ x R\$ 50,00) = R\$ 296,7/m³

Custo de produção do concreto virgem: Cimento (6,88 sacos x R\$ 35,00) + Areia (0,43 m³ x R\$ 215,00) + Brita (0,86 m³ x R\$ 260) = R\$ 556,85/m³

4.4 Considerações

O concreto reciclado tem um custo de produção 47% menor do que o concreto produzido com agregados virgem. A escolha entre concreto reciclado e virgem dependerá das necessidades específicas do projeto e dos requisitos de desempenho. A análise econômica, além de considerar o custo de produção, deve levar em conta também os benefícios ambientais da utilização do concreto reciclado.

5 CONCLUSÃO

O estudo realizado proporcionou insights valiosos sobre a viabilidade técnica e econômica do uso de concreto reciclado, proveniente de resíduos de construção e demolição, em comparação com o concreto convencional produzido a partir de matéria-prima virgem. Os resultados dos ensaios laboratoriais indicam que o concreto reciclado apresenta resistência à compressão levemente inferior em relação ao concreto convencional, com uma redução média de 18,1%. No entanto, essa diferença pode ser considerada aceitável para muitas aplicações na construção civil.

O concreto reciclado também apresentou um percentual de absorção de água ligeiramente maior comparado ao concreto convencional, com uma média de absorção de 16,64% a mais. Isso sugere que as propriedades físicas do concreto reciclado estão dentro de uma variação que viabiliza a utilização, também sendo possível o uso de aditivos impermeabilizantes, devendo-se ter um cuidado maior ao utilizar em estruturas de sustentação.

A análise econômica revelou que, apesar da redução na resistência à compressão e aumento na absorção de água, o concreto reciclado pode ser uma opção viável, resultando em economia de custos. Mesmo se utilizando aditivos para modificar as propriedades físicas, o concreto reciclado continua sendo economicamente atrativo e uma opção mais sustentável. Estes resultados sustentam a hipótese econômica inicial, sugerindo que o concreto reciclado

pode ser competitivo em termos financeiros, gerando uma economia de 47% no custo de produção.

Portanto, com base nos resultados obtidos, conclui-se que o uso de concreto reciclado é uma alternativa sustentável e economicamente viável na construção civil, contribuindo para a redução de resíduos, diminuição da extração de recursos naturais e mitigação das emissões de gases de efeito estufa.

ABSTRACT

This work aims to assess the technical and economic feasibility of using recycled concrete, produced from construction and demolition waste, in comparison to conventional concrete made from virgin raw materials. Considering the significance of the construction industry and the growing concern for waste management and sustainability, the research seeks to determine whether recycled concrete meets the necessary requirements for its use in civil engineering projects. To achieve this, laboratory tests, including compressive strength and water absorption tests, will be conducted to evaluate the mechanical and physical properties of recycled concrete compared to conventional concrete. Additionally, an economic analysis will be carried out to compare production costs and determine whether recycled concrete represents an economically viable option. Based on the obtained results, the research will provide insights into the potential to promote sustainability in the construction industry by reducing the amount of waste sent to landfills and decreasing the extraction of natural resources, thereby contributing to a more environmentally responsible and economically efficient sector.

Keywords: Recycled Concrete. Construction and Demolition Waste. Recycled Aggregates.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, E. R. et al. **Viabilidade técnica e econômica da utilização de resíduos de construção e demolição na produção de concreto.** Revista Materiais de Construção, São Paulo, v. 68, n. 286, p. 143-154, 2018.

AMARAL, A. M. et al. **Avaliação do desempenho de concreto com agregado reciclado em larga escala.** Revista Materiais de Construção, São Paulo, v. 69, n. 262, p. 217-226, 2019.

ANGULO S. C. et al. **Concreto com agregados reciclados.** Revista Concreto: Ciência e Tecnologia, São Paulo, 2(47) p, 1731-1767, 2011

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: **Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de Vazios e massa específica .** Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10786: **Concreto endurecido - Determinação do coeficiente de permeabilidade à água .** Rio de Janeiro, 2013

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15116: **Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaios .** Rio de Janeiro, 2021

CUNHA, F. S. et al. **A reciclagem de resíduos da construção civil e a sustentabilidade: estudo de caso em uma cidade do interior do Rio de Janeiro.** Revista Gestão e Desenvolvimento em Contexto, Taubaté, v. 6, n. 1, p. 98-118, 2017.

FIGUEIREDO, P. O. et al. **Influência dos métodos de britagem nas propriedades do agregado reciclado de concreto.** 2020 Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/Pxt5wX7wdCDd94Jxrt8BsYh/#> . Acesso em out. 2023

FILHO, J. A. M., & JOHN, V. M. **Concreto reciclado: uma revisão.** Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, 11(6), p. 1073-1092, 2018

INSTITUTO DE ENGENHARIA. **Cimento: por que as emissões de carbono deste material são importantes para a mudança do clima?** 2019 Disponível em: <https://www.institutodeengenharia.org.br/site/2019/05/13/cimento-por-que-as-emissoes-de-carbono-deste-material-sao-importantes-para-a-mudanca-do-clima/>. Acesso em: out. 2023.

MARTINS, L. et al. **Influência de agregados reciclados de concreto nas propriedades de novos concretos.** 2021 Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/350852319_Influencia_de_agregados_reciclados_d_e_concreto_nas_propriedades_de_novos_concretos . Acesso em: out. 2023

MATOS, J. M. E. et al. **Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil.** 2015. Disponível em <https://www.scielo.br/j/ce/a/8v5cGYtby3Xm3Snd6NjNdtQ/#> Acesso em out. 2023

MELO, A. S. et al. **Desafios e perspectivas do concreto reciclado na construção civil brasileira.** Revista Engenharia Civil, São Paulo, v. 12, n. 2, p. 101-114, 2020.

MENEGOTTI, A. C. C. et al. **Viabilidade técnica e econômica da utilização de concreto reciclado em pavimentos urbanos.** Revista de Engenharia Civil IMED, v. 6, n. 1, p. 1-12, 2020

PEREIRA, E. et al. **Durabilidade de concretos com agregados reciclados: uma aplicação de análise hierárquica.** 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/PTWFj8jRnTbRY4PXJccRjKF/#> . Acesso em out. 2023

SILVA, D. A. et al. **Agregado reciclado, uma fonte sustentável de matéria prima: uma revisão.** Revista Principia, Brasília, v. 60 n. 2, 2021.

SOUZA, R. C. et al. **Concreto reciclado: uma alternativa sustentável para a construção civil.** Revista de Engenharia Civil IMED, 6(1), p. 1-12, 2019

ZERBINO, S. M. et al. **Utilização de concreto reciclado na construção civil.** Revista de Saneamento e Energia, v. 14, n. 2, p. 303-314, 2019.