



Aplicação do concreto reciclado

Viabilidade técnica e desempenho mecânico

Felipe José Alves Amancio¹, Luanna Rúbia Gonçalves Da Silva², matheus Iury Rodrigues Homem³, Vitor Santos Coelho⁴

Felipe.Usm@outlook.com, Luannarubia10@gmail.com, Matheusiuryrodrigueshomem@gmail.com, Vitorsantos0610@gmail.com

Professora orientadora: Sheila Leal Oliveira Loureiro

Coordenação de curso de Engenharia Civil

Resumo

Este trabalho analisa de forma objetiva a comparação entre o **concreto convencional** e o **concreto reciclado**, enfatizando suas propriedades, desempenho mecânico e aplicabilidade na construção civil. A pesquisa evidencia que o uso de agregados reciclados, provenientes de resíduos da construção e demolição, pode reduzir impactos ambientais, fortalecer práticas de **sustentabilidade** e contribuir para o desenvolvimento de obras mais responsáveis. Os resultados apresentados demonstram que, quando corretamente dosado e aplicado, o concreto reciclado pode alcançar níveis satisfatórios de **resistência**, durabilidade e funcionalidade, tornando-se uma alternativa viável para substituição parcial de materiais naturais. Além disso, o estudo reforça a importância de soluções inovadoras e sustentáveis que mantenham a eficiência estrutural e atendam às demandas crescentes da engenharia civil moderna. Assim, o trabalho contribui para ampliar o conhecimento técnico e incentivar o uso de materiais sustentáveis no setor.

Palavras-chave: Concreto convencional. Concreto reciclado. Sustentabilidade. Agregados reciclados. Resistência. Construção civil.

1. INTRODUÇÃO

A construção civil ocupa posição central no desenvolvimento socioeconômico, mas permanece como um dos segmentos que mais geram impactos ambientais devido ao elevado consumo de recursos naturais e à considerável produção de resíduos. No contexto brasileiro, os resíduos de construção e demolição (RCD) representam parcela expressiva dos resíduos sólidos urbanos, podendo alcançar aproximadamente 60% do total gerado, conforme estabelecido na Resolução CONAMA nº 307 (CONAMA, 2002). Esse conjunto de resíduos engloba materiais como concreto, argamassa, cerâmica, madeira e diversos componentes descartados durante processos de construção, reforma ou demolição.

De acordo com John (2022), “a cadeia produtiva da construção civil apresenta impactos ambientais significativos ao longo de todo o seu ciclo produtivo” (p. 44), sobretudo em razão do modelo

construtivo linear ainda predominante. Paralelamente, a pressão exercida pela crescente demanda por agregados naturais intensifica a exploração de jazidas e desencadeia efeitos ambientais adversos, como erosão, remoção de vegetação nativa e modificações nos cursos d'água (Angulo, 2021). Esse cenário revela a necessidade de alternativas capazes de reduzir tais impactos sem comprometer o desempenho dos materiais utilizados.

Diante desse cenário, os agregados reciclados despontam como solução tecnicamente promissora para a substituição de agregados naturais e como estratégia alinhada aos princípios da economia circular. A **ABNT NBR 15116:2021 — Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland: requisitos e métodos de ensaio**, delimita os critérios de qualidade exigidos para esses materiais, incluindo limites de impurezas e requisitos granulométricos, enquanto a **ABNT NBR 6118:2023 — Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**, reforça que o concreto produzido — independentemente da origem dos agregados — deve assegurar desempenho satisfatório quanto à resistência mecânica, durabilidade e segurança estrutural. Pesquisas recentes indicam que concretos produzidos com agregados reciclados tendem a apresentar maior absorção de água, maior porosidade e variações no módulo de elasticidade (Leite; Dal Molin, 2021); contudo, tais desafios podem ser controlados por meio de ajustes adequados no processo de dosagem, permitindo atingir níveis de desempenho compatíveis com diferentes usos.

Diante dessas considerações, torna-se fundamental compreender se a utilização de agregados reciclados representa, de forma integrada, uma alternativa viável sob os pontos de vista técnico, ambiental e econômico. Assim, este trabalho tem como objetivo geral avaliar a viabilidade técnica, ambiental e econômica do uso de agregados reciclados na produção de concreto. Para alcançar esse objetivo, analisam-se as propriedades dos agregados reciclados e sua influência no comportamento do concreto, a conformidade do material às normas técnicas vigentes, os benefícios ambientais decorrentes da reciclagem dos resíduos de construção e demolição e a comparação dos custos associados aos agregados naturais e reciclados. Nesse contexto, estabelece-se como questão norteadora da pesquisa: os agregados reciclados são tecnicamente, ambientalmente e economicamente viáveis para substituir os agregados naturais na produção de concreto?

2. DESENVOLVIMENTO

A gestão dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD) configura-se atualmente como um dos maiores desafios ambientais enfrentados pelos centros urbanos. O acelerado crescimento das cidades, aliado à modernização da infraestrutura e ao aquecimento do setor imobiliário, faz com que a construção civil figure entre os principais responsáveis pela geração de resíduos sólidos no meio urbano. Segundo Zordan (2021, p. 33), a expressiva produção de RCD está diretamente relacionada às práticas construtivas tradicionais, ainda caracterizadas por elevados índices de desperdício e baixa eficiência operacional. Tal constatação evidencia que a geração desses resíduos, em grande parte, não é inevitável, mas resulta da ausência de planejamento adequado, de capacitação profissional e da adoção limitada de tecnologias mais sustentáveis.

Os RCD são compostos por uma diversidade de materiais, entre os quais se destacam concreto, argamassas, materiais cerâmicos, madeira, metais, plásticos, solos e elementos provenientes de demolições. O descarte inadequado desses resíduos acarreta numerosos impactos ambientais, tais como o assoreamento de corpos hídricos, a degradação de áreas urbanas, a proliferação de vetores transmissores de doenças, a ocupação irregular de terrenos e a sobrecarga dos aterros sanitários. Além disso, representa perda significativa de materiais com potencial de reaproveitamento e reinserção no ciclo produtivo.

Estudos desenvolvidos por Angulo (2021) indicam que, em grandes centros urbanos brasileiros, os RCD podem corresponder a até 70% do total de resíduos sólidos urbanos gerados, o que reforça a dimensão do problema sob os aspectos ambiental, econômico, social e logístico. Tal cenário demonstra a urgência da implementação de políticas públicas e estratégias voltadas à prevenção da geração de resíduos, bem como ao incentivo à reciclagem e ao reaproveitamento, de modo a reduzir os volumes destinados à disposição final e promover maior sustentabilidade no setor da construção civil.

2.1.1 Classificação dos RCD segundo a Resolução CONAMA 307/2002

A gestão adequada dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD) no Brasil foi significativamente fortalecida a partir da publicação da Resolução nº 307, de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente. Essa norma estabeleceu critérios técnicos para a classificação, o manejo e a destinação ambientalmente correta dos resíduos oriundos das atividades da construção civil, promovendo maior controle ambiental e incentivando práticas sustentáveis no setor (BRASIL, 2002).

De acordo com essa resolução, os RCD são organizados em quatro classes distintas, considerando suas características, possibilidades de reaproveitamento e riscos ao meio ambiente e à saúde pública.

Classe A – Resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados

A Classe A compreende os resíduos que apresentam elevado potencial de reaproveitamento na forma de agregados reciclados. Nessa categoria enquadram-se materiais como restos de concreto, produtos cerâmicos, argamassas, solos provenientes de serviços de terraplenagem, além de pavimentos e peças pré-moldadas de concreto. Esses resíduos, após passarem por processos de britagem e beneficiamento, podem ser reutilizados em aplicações como base e sub-base de pavimentos, artefatos de concreto não estruturais e nivelamento de terrenos. O reaproveitamento desses materiais contribui diretamente para a redução da extração de recursos naturais e para a diminuição do volume de resíduos destinados a aterros (BRASIL, 2002).

Classe B – Resíduos recicláveis para outras finalidades

Os resíduos enquadrados na Classe B são aqueles que, embora não sejam reutilizados diretamente como agregados, possuem cadeias de reciclagem consolidadas em outros setores produtivos. Nessa classe estão incluídos materiais como plástico, papel, vidro, metais e madeira. Esses resíduos devem ser segregados na fonte geradora e encaminhados para cooperativas, associações de catadores ou empresas especializadas em reciclagem, possibilitando sua reinserção no ciclo produtivo e reduzindo impactos ambientais associados ao descarte inadequado (BRASIL, 2002).

Classe C – Resíduos sem tecnologia economicamente viável para reciclagem

A Classe C abrange os resíduos que, apesar de apresentarem potencial técnico para reciclagem, ainda não dispõem de tecnologia economicamente viável ou acessível na maioria das regiões do país. Exemplos típicos incluem o gesso quando não segregado adequadamente, determinados polímeros e alguns tipos de espumas e materiais compósitos. Em razão dessas limitações, esses resíduos geralmente necessitam de destinação final em locais devidamente licenciados, conforme as normas ambientais vigentes (BRASIL, 2002).

Classe D – Resíduos perigosos

Os resíduos classificados como Classe D são aqueles que apresentam periculosidade, oferecendo riscos à saúde humana e ao meio ambiente. Nessa categoria estão incluídos materiais como tintas, solventes, óleos, produtos contaminados e resíduos que contêm amianto. Devido ao seu potencial poluidor e tóxico, esses resíduos exigem manejo específico, transporte especializado e destinação final em instalações licenciadas para o tratamento de resíduos perigosos, conforme determina a legislação ambiental (BRASIL, 2002).

2.1.2 Geração, impactos e desafios na gestão dos RCD

O grande volume gerado pelo setor apresenta desafios estruturais: políticas públicas insuficientes, baixa fiscalização, ausência de cultura de segregação e falta de usinas de reciclagem em quantidade compatível com a demanda. A deposição irregular popularmente conhecida como “bota-fora” é uma prática que ainda persiste, causando degradação do solo, proliferação de vetores e gasto público elevado com remoção.

John (2022) destaca que o descarte inadequado dos RCD gera “efeitos cumulativos negativos na paisagem urbana, no consumo de recursos e na ocupação de áreas destinadas a aterros”. Esses efeitos vão além do impacto ambiental, influenciando a logística municipal, a estética urbana e o custo econômico dos serviços públicos.

Além dos entraves institucionais e estruturais, um dos maiores desafios está na **triagem em canteiros**, etapa fundamental para garantir que resíduos classe A não sejam misturados a contaminantes que inviabilizam a reciclagem. A triagem inadequada resulta em materiais de baixa qualidade, que limitam o uso dos agregados reciclados em aplicações de maior valor agregado.

2.2 Processos Industriais de Reciclagem de RCD

A reciclagem de RCD envolve uma cadeia produtiva complexa e organizada, cujo objetivo principal é transformar materiais que, tradicionalmente, seriam descartados em aterros em **insumos de valor agregado** capazes de retornar ao ciclo produtivo da construção civil. Esse processo não se resume apenas à britagem dos resíduos; ele requer um conjunto de etapas interdependentes como triagem, limpeza, seleção e processamento que determinam a qualidade final do agregado reciclado e sua viabilidade para uso em diferentes aplicações construtivas.

2.2.1 Etapas do processamento industrial

A eficiência da reciclagem está diretamente relacionada ao nível de tecnologia adotado pelas usinas, que pode variar desde sistemas mecânicos simples até linhas de processamento altamente automatizadas. Em usinas mais avançadas, a utilização de **britadores de alto desempenho, separadores magnéticos, peneiras vibratórias, classificadores densimétricos e esteiras inteligentes** permite a obtenção de agregados mais homogêneos, com menor teor de impurezas e características granulométricas mais estáveis. Assim, a reciclagem de RCD é composta por várias operações interdependentes:

a) Recebimento e inspeção

Nessa etapa ocorre a verificação da conformidade do material recebido. Resíduos perigosos ou contaminados devem ser descartados imediatamente.

b) Triagem

A triagem pode ser:

- **Manual:** Realizada por trabalhadores que removem impurezas maiores.
- **Mecânica:** Com equipamentos como peneiras rotativas, esteiras e sopradores.

É uma das etapas mais importantes, pois garante que apenas materiais Classe A sigam para britagem.

c) Britagem

Os resíduos passam por britadores primários e secundários que reduzem o tamanho das partículas e conferem granulometria adequada para uso em concretos ou argamassas.

d) Peneiramento

Realiza-se a separação granulométrica, produzindo:

- Agregados graúdos;
- Agregados miúdos;
- Finos;

e) Separação de impurezas

Podem ser usados:

- Eletroímãs (para metais),
- Jatos de ar (para madeira e plástico),
- Classificadores densimétricos

f) Armazenamento

A estocagem é feita separando lotes conforme tipo de resíduo original e granulometria, garantindo rastreabilidade.

Levy (2021) destaca que a eficiência das etapas de beneficiamento está diretamente associada à qualidade final dos agregados e ao seu desempenho no concreto estruturado.

2.2.2 Usinas fixas e móveis

Usinas fixas

As usinas fixas de reciclagem de RCD apresentam elevada capacidade produtiva e controle rigoroso da qualidade dos agregados resultantes. São particularmente adequadas para regiões metropolitanas com grande geração de resíduos, operando com linhas industriais completas que incluem triagem, britagem, peneiramento e classificação granulométrica. No Brasil, diversas cidades possuem estruturas consolidadas dedicadas ao processamento de RCD, entre as quais se destacam algumas:

- **Usina de Reciclagem de Entulho de São Paulo (Loga – Ecoponto/CTR Bandeirantes)**
Endereço: Av. Raimundo Pereira de Magalhães, 15.101 – Vila Jaguara, São Paulo – SP.
- **Usina de Reciclagem de Entulho de Belo Horizonte (SLU – Unidade BR-040)**

Endereço: Rodovia BR-040, Km 528 – Bairro Jardim Filadélfia, Belo Horizonte – MG.

- **Usina de Reciclagem de Entulho de Curitiba (Caximba)**

Endereço: Rua Nicola Pellanda, 6.200 – Caximba, Curitiba – PR.

Segundo a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON, 2020), as usinas fixas respondem por mais de 70% do volume total reciclado no país, oferecendo agregados com menor teor de impurezas e maior homogeneidade, fatores essenciais para a confiabilidade do material.

Usinas móveis

As usinas móveis constituem uma alternativa versátil e economicamente viável para o processamento descentralizado de RCD, sendo amplamente utilizadas em grandes canteiros de obras, empreendimentos de infraestrutura e demolições de grande porte. A possibilidade de instalação temporária diretamente no local da geração dos resíduos reduz significativamente os custos de transporte e os impactos ambientais associados ao deslocamento de materiais.

De acordo com Schiavon (2022), o uso de usinas móveis pode reduzir em até 35% os custos logísticos da reciclagem, especialmente em situações em que o transporte representaria a maior parcela do custo total da operação.

No Brasil, os principais **tipos de usinas móveis** empregadas são:

- **Máquina Solo – Usinas Móveis Komplet**
Endereço: Rua Roberto Venturole, 898 – Bairro Cidade Aracília, Guarulhos – SP.
- **Consórcio Consimares – Base Administrativa**
Endereço: Rua Dom Barreto, 1.003 – Centro, Sumaré – SP.
- **Prefeitura de Monte Mor – Local onde a usina móvel foi apresentada**
Endereço: Avenida Jânio Quadros, 505 – Jardim Monte Mor, Monte Mor – SP.

Fabricantes como **Metso-Outotec**, **Astec** e **Furlan** fornecem equipamentos móveis amplamente utilizados em mineração e infraestrutura, aplicados também à reciclagem de RCD no país.

A flexibilidade operacional desses sistemas permite que grandes obras públicas ou privadas utilizem os agregados reciclados produzidos no próprio canteiro, reduzindo o volume destinado a aterros, aumentando a eficiência logística e fortalecendo práticas de construção sustentável.

2.3 Propriedades dos Agregados Reciclados

Os agregados reciclados apresentam propriedades físicas e químicas significativamente distintas dos agregados naturais, principalmente devido à presença de argamassa aderida, fragmentos cerâmicos e diferentes tipos de contaminantes decorrentes da origem heterogênea dos resíduos. A argamassa antiga, por ser mais porosa e menos densa, aumenta a absorção de água e reduz a massa específica do agregado, alterando a trabalhabilidade e a relação água/cimento do concreto produzido. Já a presença de cerâmica — material altamente poroso — intensifica a variabilidade do comportamento mecânico, afetando tanto a resistência quanto a durabilidade, já que esse tipo de resíduo favorece maior permeabilidade e suscetibilidade à carbonatação. Contaminantes como madeira, gesso, solo e metais também podem comprometer o desempenho, provocando reações químicas indesejáveis, expansões, perda de aderência e aumento da heterogeneidade da mistura. Assim, as diferenças entre

agregados reciclados e naturais não se limitam apenas a parâmetros físicos mensuráveis, mas abrangem um conjunto de fatores microestruturais que influenciam diretamente a resistência, a durabilidade, a reologia e o comportamento estrutural do concreto, exigindo cuidados adicionais na triagem, no beneficiamento e na dosagem para garantir desempenho adequado.

2.3.1 Propriedades físicas

Porosidade e absorção

A porosidade elevada faz com que a absorção de água seja maior. Isso impacta diretamente:

- A trabalhabilidade do concreto
- A relação água/cimento.
- A durabilidade.

Densidade

A densidade menor está relacionada à argamassa aderida. Concretos com esses agregados tendem a apresentar menor peso específico.

Granulometria

A heterogeneidade é maior devido à variabilidade dos resíduos de origem.

Essas características exigem ajustes de dosagem e controle tecnológico rigoroso.

2.3.2 Propriedades químicas e contaminações

A composição química dos agregados reciclados depende diretamente da origem do resíduo. Entre as contaminações mais comuns presentes nesse tipo de material, destacam-se:

- Gesso, que oferece risco de expansões devido à presença de sulfatos;
- Madeira, que aumenta a absorção de água e introduz matéria orgânica;
- Solo, que reduz a resistência mecânica e altera a aderência pasta-agregado;
- Cerâmica, que eleva a porosidade e intensifica a variabilidade do material.

Esses contaminantes podem provocar reações químicas indesejáveis, aumento da expansibilidade, perda de aderência e maior heterogeneidade da mistura, comprometendo a resistência mecânica e a durabilidade do concreto.

Nesse contexto, a **ABNT NBR 15116:2021 — Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland: requisitos e métodos de ensaio** — assume papel central, pois estabelece os requisitos mínimos para produção e recepção de agregados reciclados miúdos e graúdos provenientes do beneficiamento de resíduos classe A, incluindo misturas com agregados naturais. A norma define critérios relacionados à origem do material, às condições de beneficiamento e ao controle de qualidade, além de especificar métodos de ensaio para determinação da granulometria, massa específica, absorção de água e teores de substâncias deletérias, como sulfatos, cloretos, matéria orgânica e partículas leves.

A **NBR 15116:2021 — Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland: requisitos e métodos de ensaio**, também classifica os agregados reciclados em subclasses conforme a natureza predominante do resíduo, diferenciando, por exemplo, o Agregado Reciclado de Concreto (ARCO), o Agregado Reciclado Cimentício (ARCI) e o Agregado Reciclado Misto (ARM). Essa distinção é essencial, uma vez que cada tipo apresenta comportamento distinto em termos de contaminação, estabilidade química e desempenho no concreto. Para concretos com função estrutural, a norma limita o uso a agregados reciclados de melhor qualidade, admitindo apenas o ARCO, que contém maior proporção de fragmentos cimentícios e menor teor de impurezas.

Outro ponto relevante da **NBR 15116:2021 — Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland: requisitos e métodos de ensaio** é a orientação referente à pré-molhagem e à compensação da água absorvida. Em razão da maior porosidade desse tipo de agregado, recomenda-se o pré-umedecimento dos materiais ou, alternativamente, a compensação da água absorvida, que não deve ser contabilizada no cálculo da relação água/cimento efetiva. Essa diretriz influencia diretamente as propriedades reológicas do concreto — como trabalhabilidade, consistência e perda de abatimento — sendo essencial para evitar o aumento não planejado da relação água/cimento, o que prejudicaria resistência e durabilidade.

Dessa forma, a **NBR 15116:2021 — Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland: requisitos e métodos de ensaio**, em conjunto com a **NBR 7211:2022 — Agregados para concreto — Requisitos** e a **NBR 12655:2022 — Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento**, fornece um arcabouço normativo robusto que não apenas define limites para substâncias contaminantes e requisitos químicos dos agregados reciclados, mas também orienta seu uso adequado em argamassas e concretos, contribuindo para que o desempenho mecânico e a durabilidade não sejam comprometidos, mesmo diante da maior heterogeneidade inerente aos RCD.

2.3.3 Conforme a tabela 1 segue a comparativa entre agregados natural e o reciclado.

Tabela 1 – Diferenças entre agregados naturais e reciclados

Propriedade	Agregado Natural	Agregado Reciclado	Impacto no Concreto
Massa específica	Alta	Média/baixa	Pode reduzir densidade do concreto
Absorção	Baixa (< 2%)	Alta (4–10%)	Aumenta consumo de água
Forma	Angular regular	Angular rugosa	Aumenta aderência pasta-agregado
Porosidade	Baixa	Elevada	Maior risco de carbonatação
Contaminantes	Negligenciáveis	Variáveis	Pode comprometer resistência

Fonte: Elaboração própria dos autores, com base nos resultados descritos pelos autores citados.

Além disso, os agregados reciclados devem atender aos requisitos definidos pela **NBR 7211:2023 — Agregados para concreto – Especificação**, que estabelece limites granulométricos, teores máximos de impurezas, requisitos de absorção e de massa específica para agregados naturais e reciclados. O atendimento a essa norma é essencial para garantir a uniformidade e a qualidade dos materiais empregados, uma vez que variações excessivas podem comprometer a resistência e a durabilidade do concreto (ABNT, 2023).

2.4 Variabilidade dos resíduos de construção e demolição e implicações práticas na viabilidade técnica do concreto reciclado

A variabilidade dos resíduos de construção e demolição (RCD) representa um dos principais entraves para a consolidação do uso do concreto com agregados reciclados em aplicações reais na construção civil. Diferentemente dos agregados naturais, cuja origem geológica e processo de extração conferem maior uniformidade às propriedades físicas e mecânicas, os agregados reciclados são oriundos de múltiplas fontes, como demolições, reformas e sobras de obras, resultando em materiais com composição heterogênea e comportamento variável.

Um aspecto prático fundamental relacionado a essa variabilidade refere-se à **logística das usinas de reciclagem**. A localização das usinas, a distância até os centros consumidores e a capacidade de processamento influenciam diretamente a qualidade final dos agregados reciclados. Usinas que recebem resíduos de origens diversas, sem segregação adequada na fonte, tendem a produzir agregados com maior dispersão granulométrica e maior presença de materiais indesejáveis, o que compromete a previsibilidade do desempenho do concreto produzido.

Outro fator crítico diz respeito às **dificuldades de padronização dos agregados reciclados**. A presença simultânea de fragmentos de concreto, argamassa e materiais cerâmicos resulta em variações significativas de absorção de água, massa específica e resistência. Essa heterogeneidade dificulta o enquadramento dos agregados reciclados em classes padronizadas, exigindo ajustes constantes no traço do concreto e maior rigor no controle tecnológico, especialmente em aplicações que demandam desempenho mecânico mais elevado.

Adicionalmente, os **riscos de contaminação dos materiais** constituem uma preocupação recorrente na utilização de RCD. A presença de contaminantes como madeira, gesso, solo, metais e matéria orgânica pode afetar negativamente as propriedades do concreto, favorecendo o aumento da porosidade, a redução da resistência mecânica e o comprometimento da durabilidade. Esses riscos estão diretamente associados à ausência de triagem eficiente na origem dos resíduos e à deficiência nos processos de beneficiamento adotados pelas usinas de reciclagem.

Do ponto de vista da viabilidade técnica, esses aspectos evidenciam que o desempenho do concreto reciclado não depende exclusivamente das propriedades intrínsecas dos agregados, mas também da **gestão adequada dos RCD**, da eficiência logística e do controle rigoroso dos processos de separação, britagem e classificação granulométrica. Em contextos em que tais condições não são atendidas, a variabilidade dos agregados reciclados pode limitar sua aplicação a obras de baixa solicitação estrutural.

Dessa forma, a literatura destaca que a adoção do concreto com agregados reciclados em escala prática exige não apenas comprovação experimental de desempenho, mas também a implementação de estratégias que minimizem a variabilidade dos resíduos, assegurando maior padronização do material e confiabilidade no seu uso na construção civil.

2.5 Aplicações construtivas do concreto reciclado e parâmetros técnicos para sua especificação

A indicação clara das possíveis aplicações construtivas do concreto com agregados reciclados é fundamental para ampliar a aplicabilidade prática do material e fortalecer sua viabilidade técnica na construção civil. Embora a literatura demonstre desempenho satisfatório em diversas situações, o uso desse tipo de concreto deve ser orientado por critérios técnicos que considerem as exigências mecânicas, a durabilidade e o nível de solicitação dos elementos construtivos.

De modo geral, o concreto reciclado mostra-se mais adequado para **elementos não estruturais ou de baixa e média solicitação**, nos quais pequenas variações de desempenho não comprometem a segurança global da edificação. Entre as aplicações mais indicadas destacam-se calçadas, passeios públicos, blocos de vedação, guias, sarjetas, elementos pré-moldados simples, pavimentações de baixo tráfego, bases e sub-bases de pavimentos, além de obras de infraestrutura urbana. Nessas situações, o uso de agregados reciclados contribui significativamente para a redução do consumo de recursos naturais e para a destinação ambientalmente adequada dos resíduos de construção e demolição.

Por outro lado, o uso do concreto reciclado deve ser **evitado ou cuidadosamente avaliado em elementos estruturais sujeitos a elevadas solicitações mecânicas**, como vigas, pilares, lajes e fundações profundas, especialmente quando empregados altos teores de substituição dos agregados naturais. Nessas aplicações, a maior absorção de água, a variabilidade do material e a possível redução do módulo de elasticidade podem comprometer o desempenho estrutural e a durabilidade do concreto, tornando indispensável um controle tecnológico rigoroso e o atendimento estrito às normas técnicas aplicáveis.

Para a correta especificação do concreto reciclado, alguns **parâmetros técnicos devem ser considerados**, tais como: a origem e o tipo do resíduo, o percentual de substituição dos agregados naturais, a absorção de água, a massa específica, o teor de impurezas, a granulometria e a classe de aplicação prevista. Além disso, ajustes no traço do concreto, como o pré-umedecimento dos agregados reciclados e a correção da relação água/cimento, são medidas essenciais para garantir trabalhabilidade e resistência compatíveis com o uso pretendido.

A literatura também aponta a necessidade de aprofundar os estudos relacionados à **durabilidade do concreto reciclado**, especialmente em condições de exposição mais severas. Ensaios futuros voltados à avaliação da carbonatação, da resistência à abrasão, da penetração de íons cloreto e do comportamento frente a ciclos de gelo e degelo são fundamentais para ampliar a compreensão do desempenho a longo prazo desse material. Esses estudos permitirão definir limites mais precisos de aplicação e contribuirão para a ampliação segura do uso do concreto reciclado em obras de maior complexidade.

Dessa forma, a definição criteriosa das aplicações construtivas, aliada à correta especificação técnica e ao avanço das pesquisas sobre durabilidade, é essencial para consolidar o concreto reciclado como uma alternativa tecnicamente confiável e ambientalmente sustentável na construção civil.

2.6 Concreto com Agregados Reciclados

A incorporação de agregados reciclados na produção de concretos tem ganhado relevância na engenharia civil, sobretudo como alternativa para mitigar os impactos ambientais associados ao elevado consumo de recursos naturais e ao descarte inadequado dos resíduos de construção e

demolição. Diversos estudos demonstram que, quando os processos de seleção, beneficiamento e dosagem são realizados de forma criteriosa, a substituição parcial dos agregados naturais por reciclados pode ser tecnicamente viável, mantendo níveis de desempenho compatíveis com as exigências estruturais. Essa viabilidade decorre do fato de que os agregados reciclados, embora apresentem características físicas diferenciadas como maior porosidade e absorção de água podem ser incorporados ao concreto de maneira controlada, desde que as adaptações necessárias sejam aplicadas ao projeto de mistura. Dessa forma, compreender os efeitos dessa substituição sobre o comportamento do material se torna essencial, especialmente no que se refere às propriedades mecânicas, às condições de trabalhabilidade e comportamento reológico e aos parâmetros de durabilidade.

2.6.1 Desempenho mecânico

A resistência à compressão do concreto produzido com agregados reciclados é diretamente condicionada às características físicas e microestruturais desses materiais. A **porosidade elevada dos agregados reciclados**, resultante da presença de argamassa antiga aderida aos fragmentos de concreto, reduz a rigidez das partículas e aumenta a deformabilidade local, o que contribui para uma menor capacidade de suportar tensões compressivas. De maneira complementar, a **maior absorção de água** associada a essa porosidade altera significativamente o equilíbrio hídrico da mistura, afetando a relação água/cimento efetiva e, conseqüentemente, a formação da microestrutura cimentícia durante o processo de hidratação.

A **qualidade da argamassa aderida** frequentemente mais frágil e menos resistente que o agregado natural introduz zonas de transição interfacial (ITZ) mais vulneráveis, que se tornam pontos preferenciais de microfissuração sob carregamento. Além disso, a **presença de materiais cerâmicos**, caracterizados por elevada porosidade e baixa resistência intrínseca, acentua a heterogeneidade da mistura e compromete a transmissão uniforme de tensões no interior do concreto. Esses fatores combinados resultam em uma matriz mais suscetível a processos de fissuração e redução global da resistência à compressão quando comparada aos concretos convencionais produzidos com agregados naturais.

Silva e Sales (2022, p. 110) evidenciam que substituições de até 30% do agregado graúdo mantêm resistência similar ao concreto convencional. Isso ocorre porque a estrutura da matriz cimentícia pode compensar a menor qualidade do agregado reciclado.

O módulo de elasticidade, porém, tende a ser menor (Cassol e Rossignolo, 2023), devido à menor rigidez das partículas recicladas.

Conforme estabelece a **NBR 12655:2022 — Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação**, o controle tecnológico da produção do concreto é fundamental para garantir desempenho mecânico satisfatório, especialmente em misturas que contenham agregados reciclados. A norma define critérios para resistência característica, procedimentos de amostragem, controle de qualidade e requisitos mínimos de aceitação, reforçando a necessidade de monitoramento rigorosas propriedades dos agregados e da mistura fresca (ABNT, 2022).

2.6.2 Reologia e trabalhabilidade

A reologia e a trabalhabilidade do concreto produzido com agregados reciclados são significativamente influenciados pelas características físicas desses materiais, especialmente sua

elevada absorção de água. Devido à porosidade acentuada da argamassa aderida, os agregados reciclados tendem a retirar parte da água disponível na mistura, reduzindo a fluidez do concreto e alterando sua consistência. Por esse motivo, torna-se necessário realizar o pré-umedecimento dos agregados, garantindo que eles já estejam saturados antes da mistura e evitando que absorvam a água destinada à hidratação do cimento. Além disso, é comum exigir ajustes na relação água/cimento, de modo a compensar a demanda adicional de água sem comprometer o desempenho mecânico do concreto. Em muitos casos, também se recomenda o uso de aditivos superplastificantes, que melhoram a trabalhabilidade sem aumentar a quantidade total de água, mantendo a compacidade e a resistência do material. Quando esses cuidados não são adotados, o concreto tende a apresentar consistência inadequada, perda de trabalhabilidade, maior risco de segregação e dificuldade de adensamento, comprometendo tanto o processo de execução quanto desempenho final da estrutura.

A NBR 12655:2022 — Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento estabelece requisitos específicos para o abatimento (slump) e para a consistência do concreto fresco, determinando que o material deve atender à classe de trabalhabilidade especificada no projeto. Dessa forma, o ajuste da quantidade de água, o uso de aditivos e o controle da absorção dos agregados reciclados tornam-se medidas essenciais para garantir conformidade com os parâmetros normativos (ABNT, 2022).

2.6.3 Durabilidade

A durabilidade do concreto produzido com agregados reciclados está diretamente relacionada à microestrutura mais porosa desses materiais e à maior variabilidade de suas propriedades físicas. Como os agregados reciclados possuem argamassa aderida e, frequentemente, partículas cerâmicas em sua composição, eles tendem a apresentar **maior permeabilidade**, o que facilita a entrada de agentes agressivos, como dióxido de carbono, íons cloreto e sulfatos. Esse aumento de permeabilidade acelera processos como a **carbonatação**, que reduz o pH da matriz cimentícia e pode expor as armaduras à corrosão.

Outro fator relevante é a **absorção capilar elevada**, que favorece o transporte interno de umidade e pode intensificar ciclos de molhagem e secagem, gerando tensões que contribuem para microfissuração ao longo do tempo. A presença de cerâmica e materiais friáveis também pode influenciar a durabilidade, uma vez que esses componentes são mais suscetíveis à degradação quando submetidos a ambientes com variação térmica ou agentes químicos.

Apesar dessas limitações, diversos estudos apontam que a durabilidade do concreto reciclado pode ser significativamente melhorada com a adoção de estratégias adequadas, como o uso de **adições minerais pozolânicas** (sílica ativa, metacaulim, cinza volante), que refinam os poros da matriz cimentícia e reduzem a permeabilidade global do material. Além disso, ajustes na dosagem, controle rigoroso da qualidade dos agregados e adequada compactação durante o lançamento contribuem para garantir um desempenho satisfatório ao longo da vida útil da estrutura. Assim, embora o concreto com agregados reciclados exija atenção especial, ele pode alcançar níveis adequados de durabilidade quando produzidos e aplicados dentro de critérios técnicos bem estabelecidos.

A NBR 12655:2022 — Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento determina que a durabilidade do concreto deve ser compatível com a classe de exposição ambiental, exigindo controle da relação água/cimento, compacidade adequada e escolha apropriada dos materiais. Assim, o concreto com agregados reciclados deve ser produzido de

modo a atender às exigências normativas, garantindo resistência a processos de carbonatação, penetração de íons cloreto e outros mecanismos de deterioração (ABNT, 2022).

2.7 Sustentabilidade e Economia Circular

O uso de agregados reciclados reduz a extração de recursos naturais, diminui o transporte de resíduos, economiza energia e reduz emissões de CO₂. John (2022) reforça que “a reciclagem de resíduos da construção é prática fundamental para reduzir emissões e preservar recursos naturais”.

O IPT (2024) estima redução de **até 40%** na quantidade de resíduos destinados a aterros quando políticas de reciclagem são adotadas.

2.8 Panorama Internacional (expandido)

O panorama internacional da reciclagem de resíduos de construção e demolição (RCD) revela diferenças marcantes entre países desenvolvidos e em desenvolvimento, influenciadas pela maturidade das políticas públicas, pela infraestrutura tecnológica disponível e pela consolidação da cultura técnica no setor. Pesquisas brasileiras demonstram que, embora o Brasil apresente avanços significativos nas últimas décadas, o país ainda se encontra distante dos índices de reciclagem observados em nações de primeiro mundo.

Dados sistematizados na revista **Ambiente Construído** (2023) indicam que a capacidade instalada das usinas brasileiras permitiria atingir cerca de **45%** de reciclagem de RCD. Contudo, a taxa efetiva de reciclagem permanece próxima de **15%**, evidenciando que parte expressiva dos resíduos ainda é destinada a aterros ou descartada de forma inadequada.

As comparações internacionais reforçam essa diferença. Segundo Geus e Garcias (2016), a **Dinamarca alcança índices superiores a 90%** de reciclagem de RCD, resultado de políticas públicas rígidas, fiscalização contínua e forte integração da reciclagem à economia circular. No mesmo estudo, os autores destacam que **Portugal** apresentava, até recentemente, taxas inferiores a **10%**, demonstrando grande disparidade interna no contexto europeu, mas ainda assim maior consolidação institucional do que a observada no Brasil.

Além disso, estimativas nacionais apontam que apenas cerca de **21%** dos RCD gerados no país têm destinação realmente recicladora, considerando tanto o setor formal quanto o informal (EMBRAPA, 2024). Esse percentual permanece muito abaixo da meta definida pela União Europeia, que recomenda **recuperação mínima de 70%** dos resíduos de construção e demolição em seus Estados-membros.

Assim, a comparação internacional evidencia que o fortalecimento da reciclagem de RCD no Brasil depende da ampliação da infraestrutura de triagem e beneficiamento, do aprimoramento das políticas públicas, da criação de incentivos econômicos e da consolidação de uma cultura técnica orientada à sustentabilidade. A experiência de países líderes demonstra que legislações robustas, fiscalização efetiva e integração dos resíduos ao ciclo produtivo são elementos essenciais para avanços consistentes.

2.9 Estudos de Caso Brasileiros

A aplicação prática dos agregados reciclados no Brasil tem avançado de forma gradual, impulsionada por iniciativas municipais e por parcerias entre o setor público e empresas privadas. Conforme apontado pela Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON, 2020), municípios que estruturaram políticas de gestão de RCD apresentam maior capacidade de reaproveitamento e maior integração dos agregados reciclados em obras públicas. Embora ainda exista um longo caminho para alcançar níveis semelhantes aos de países líderes em reciclagem, algumas cidades brasileiras já demonstram resultados concretos e relevantes.

São Paulo

O município de São Paulo se destaca pela expressiva quantidade de usinas públicas e privadas de reciclagem de RCD. Segundo levantamento da ABRECON (2020), o estado concentra uma das maiores capacidades de processamento do país, com unidades que superam centenas de toneladas por dia. Esses agregados reciclados são amplamente utilizados em pavimentação, base e sub-base de vias, além de obras municipais de manutenção urbana. Estudos publicados em Ambiente Construído reforçam que São Paulo tem sido referência nacional na implementação de políticas locais que incentivam o uso de agregados reciclados em obras públicas, contribuindo para consolidar uma cadeia produtiva sustentável (AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2023).

Curitiba

Curitiba é amplamente reconhecida pela literatura brasileira como referência nacional na utilização de agregados reciclados em obras urbanas. Pesquisas do Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba (IPPUC, 2019) e estudos de universidades locais indicam que o município utiliza concreto com agregados reciclados em pavimentos rígidos, ciclovias, calçadas e blocos intertravados. Além disso, projetos-piloto desenvolvidos em parceria com universidades, como a UFPR, monitoram o desempenho mecânico e a durabilidade desses pavimentos, reforçando a viabilidade técnica do uso de agregados reciclados em tráfego leve e moderado (IPPUC, 2019).

Recife

Em Recife, a implantação de uma usina municipal de reciclagem de RCD permitiu ampliar o reaproveitamento de resíduos em obras públicas. Dados publicados pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2020) indicam que os agregados reciclados produzidos na capital pernambucana são amplamente utilizados em obras de drenagem, reforço de subleitos e manutenção de vias secundárias. Esses resultados demonstram a eficácia do modelo adotado, que prioriza o reaproveitamento de resíduos de obras municipais e reduz tanto os custos logísticos quanto o volume destinado a aterros.

Esses estudos de caso evidenciam que a adoção dos agregados reciclados no Brasil, embora ainda limitada em escala nacional, já apresenta resultados consistentes e tecnicamente viáveis. As experiências de São Paulo, Curitiba e Recife mostram que, quando existe suporte institucional e planejamento adequado, o uso de RCD reciclado pode se tornar uma estratégia eficaz para reduzir impactos ambientais, otimizar custos e fomentar práticas construtivas sustentáveis.

2.10 Análise Econômica

A literatura especializada aponta que o uso de agregados reciclados pode gerar economia significativa em comparação aos agregados naturais. Segundo o estudo de Silva e Mendes (2021),

“os agregados reciclados apresentam custo entre 5% e 20% menor que o dos agregados naturais, dependendo da logística e da escala de produção” (SILVA; MENDES, 2021, p. 87). Esse diferencial econômico ocorre porque a reciclagem reduz etapas como extração mineral, transporte de longas distâncias e pagamento de taxas associadas ao uso de recursos naturais.

Outro fator relevante é o impacto da logística no custo final do material. De acordo com Angulo et al. (2020), o transporte pode representar “até 60% do custo total dos agregados empregados na construção civil, seja natural ou reciclado” (ANGULO et al., 2020, p. 41). Assim, quando a usina de reciclagem está localizada próxima ao canteiro de obras, a vantagem econômica tende a ser ainda maior. Nesse sentido, Schiavon (2022) destaca que o uso de **usinas móveis** pode reduzir de forma expressiva os custos logísticos, uma vez que o processamento ocorre diretamente no local da geração dos resíduos, diminuindo o transporte de materiais e otimizando o reaproveitamento.

Além das economias diretas, a utilização de agregados reciclados também reduz despesas indiretas. John (2022) observa que a diminuição do envio de resíduos a aterros evita a cobrança de tarifas de disposição, o que contribui para o “balanço econômico positivo do uso de RCD reciclado em obras públicas e privadas” (JOHN, 2022, p. 55). Portanto, os benefícios financeiros vão além do preço de aquisição do agregado e refletem na gestão global dos resíduos da construção.

No que se refere ao concreto, estudos comparativos mostram que o custo do metro cúbico do concreto reciclado tende a ser menor do que o do concreto convencional, especialmente em aplicações não estruturais. Pesquisas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

demonstram que concretos produzidos com agregados reciclados podem representar uma **economia superior a 50% em determinadas condições operacionais**, sobretudo quando há grande disponibilidade de RCD e proximidade entre a usina e o canteiro (SOUZA; GONÇALVES, 2022).

De forma geral, a comparação entre o custo do concreto convencional e do concreto reciclado indica que, em condições favoráveis de logística e disponibilidade de material, o concreto com agregados reciclados apresenta vantagem econômica especialmente para pavimentação, bases de vias, calçadas, ciclovias e elementos não estruturais. Assim, mesmo reconhecendo a variabilidade regional, a literatura converge ao afirmar que o uso de agregados reciclados pode reduzir custos diretos e indiretos da construção, ao mesmo tempo em que promove maior sustentabilidade e eficiência na gestão dos resíduos.

2.11 Síntese Crítica

À luz do panorama discutido ao longo deste capítulo, a síntese da literatura evidencia que, embora o uso de agregados reciclados apresente resultados promissores, sua aplicação ainda é limitada por desafios como a variabilidade de qualidade, a necessidade de triagem rigorosa, a persistência de barreiras culturais e o insuficiente apoio normativo. Esses obstáculos impactam a confiança técnica e dificultam a adoção em larga escala. Ainda assim, os benefícios ambientais, econômicos e sociais associados ao reaproveitamento dos RCD apontam para uma tendência irreversível de avanço, consolidando os agregados reciclados como uma alternativa cada vez mais relevante e necessária para a construção civil sustentável.

3. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho foi desenvolvida com o objetivo de possibilitar uma análise aprofundada e comparativa sobre o uso de agregados reciclados na produção de concreto,

considerando simultaneamente aspectos técnicos, ambientais e econômicos. Para isso, empregou-se uma abordagem qualitativa e quantitativa, fundamentada em pesquisa bibliográfica, documental e análise normativa, com tratamento sistemático dos dados extraídos da literatura.

A pesquisa é classificada como aplicada, pois busca soluções práticas para a construção civil, especialmente no campo da sustentabilidade. Segundo Gil (2019, p. 27), “a pesquisa aplicada visa resultados que possam ser utilizados imediatamente na resolução de problemas concretos”, característica que se adequa ao estudo de materiais alternativos como os agregados reciclados.

O estudo também apresenta caráter exploratório e descritivo. A pesquisa exploratória permitiu ampliar a compreensão dos processos de reciclagem e dos impactos do uso dos agregados reciclados, enquanto a pesquisa descritiva possibilitou a organização, interpretação e comparação dos dados técnicos obtidos na literatura (Prodanov; Freitas, 2013; Lakatos; Marconi, 2017).

Os dados foram obtidos por meio de pesquisa bibliográfica e documental. A pesquisa bibliográfica envolveu a análise de livros, artigos científicos, dissertações e relatórios técnicos publicados entre 2020 e 2024, priorizando estudos experimentais com resultados quantitativos sobre concretos produzidos com agregados reciclados. A pesquisa documental incluiu a análise das normas **ABNT NBR 15116:2023 – Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland — Requisitos e métodos de ensaios**, **ABNT NBR 6118:2023 – Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**, **ABNT NBR 12655:2023 – Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento**, **ABNT NBR 7211:2022 – Agregados — Especificação** e **ABNT NBR 15575:2021 – Edificações habitacionais — Desempenho — Requisitos gerais**.

3.1 Critérios De Seleção Dos Estudos

A seleção dos estudos utilizados nesta pesquisa seguiu critérios previamente definidos, buscando garantir aderência direta ao objetivo de avaliar a viabilidade técnica, ambiental e econômica do uso de agregados reciclados em concretos. Dessa forma, foram incluídos trabalhos que:

- Investigassem concretos produzidos com agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição (RCD);
- Apresentassem análises quantitativas de resistência à compressão, módulo de elasticidade, absorção de água ou indicadores de durabilidade;
- Utilizassem metodologias experimentais compatíveis com ensaios normalizados;
- Analisassem diferentes percentuais de substituição dos agregados naturais por reciclados, especialmente nas faixas de 10%, 20%, 30% e 50%, valores também utilizados como referência neste trabalho;
- Estivessem alinhados às exigências das normas ABNT NBR pertinentes ao tema (NBR 15116, NBR 7211, NBR 12655 e NBR 6118);
- Fossem publicados, preferencialmente, entre 2020 e 2024, considerando a atualização normativa e o avanço recente das pesquisas sobre viabilidade técnica do concreto reciclado no Brasil.

3.1.2 Critérios De Exclusão

Foram excluídos estudos que apresentaram informações insuficientes para avaliação comparativa, ausência de dados experimentais ou falta de mensuração quantitativa de propriedades mecânicas.

Também foram desconsiderados trabalhos que abordaram somente reciclagem de resíduos sem aplicação direta em concreto, além de estudos muito anteriores às atualizações normativas recentes que fundamentam a pesquisa.

3.2 Justificativa Dos Estudos Selecionados

Os estudos de Leite e Dal Molin (2021), Silva e Sales (2022) e Cassol e Rossignolo (2023) foram adotados como referência principal devido à qualidade metodológica, ao rigor experimental e ao alinhamento com normas brasileiras recentes, além de contemplarem caracterização física, química e mecânica dos agregados e do concreto produzido. Esses trabalhos analisam diferentes percentuais de substituição e apresentam resultados quantitativos comparáveis, o que possibilita avaliar a influência dos agregados reciclados nas propriedades tecnológicas do concreto de forma consistente.

A seleção desses autores reforça a confiabilidade técnica da discussão desenvolvida, oferecendo base científica sólida para analisar a viabilidade do concreto reciclado sob os aspectos técnico, ambiental e econômico, em conformidade com os objetivos centrais desta pesquisa.

Após a coleta, os dados foram organizados em tabelas comparativas, permitindo a análise dos indicadores técnicos referentes à resistência mecânica, absorção de água, densidade, módulo de elasticidade e parâmetros de durabilidade.

Foram selecionados trabalhos que apresentaram metodologia experimental bem definida, ensaios normalizados e dados quantitativos comparáveis. Priorizaram-se estudos que analisaram diferentes percentuais de substituição dos agregados naturais por reciclados, especialmente nas faixas de 10%, 20%, 30% e 50%. Trabalhos de Leite e Dal Molin (2021), Silva e Sales (2022) e Cassol e Rossignolo (2023) foram utilizados como referência principal por apresentarem caracterização física, química e mecânica dos agregados e dos concretos produzidos.

A abordagem quantitativa consistiu na análise estatística descritiva dos valores de resistência à compressão, módulo de elasticidade, absorção de água, densidade aparente e indicadores de durabilidade, com comparação direta entre concretos convencionais e concretos com agregados reciclados.

A abordagem qualitativa envolveu a interpretação crítica dos processos de reciclagem, beneficiamento, logística de transporte, impactos ambientais e exigências normativas, possibilitando correlacionar os resultados técnicos com a viabilidade prática de aplicação dos agregados reciclados.

A análise dos dados foi organizada em três dimensões:

- **Dimensão técnica:** avaliação do desempenho mecânico e físico dos agregados e dos concretos, considerando resistência, rigidez, absorção e durabilidade.
- **Dimensão ambiental:** verificação dos benefícios ambientais decorrentes da reciclagem dos RCD, como redução da extração de agregados naturais, diminuição do volume destinado a aterros e mitigação de impactos ambientais.
- **Dimensão econômica:** comparação dos custos de produção do concreto convencional e do concreto com agregados reciclados, considerando custos de material, transporte e processamento.

A principal limitação do estudo é a ausência de ensaios laboratoriais próprios, uma vez que as análises foram baseadas exclusivamente em dados secundários. Contudo, a utilização de fontes científicas reconhecidas, aliada à análise normativa e à comparação entre diferentes estudos experimentais, confere confiabilidade aos resultados obtidos, conforme preconiza Gil (2019).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta os resultados obtidos a partir da análise comparativa de dados da literatura sobre o uso de agregados reciclados no concreto, organizados sob os aspectos técnico, ambiental e econômico. Os resultados foram interpretados de forma quantitativa e qualitativa, conforme a metodologia proposta.

4.1 Resultados da Análise Técnica

Os estudos analisados demonstram que o desempenho do concreto com agregados reciclados está diretamente relacionado ao percentual de substituição adotado, ao tipo de resíduo utilizado e à qualidade do beneficiamento do material. Leite e Dal Molin (2018) observaram que agregados reciclados apresentam absorção de água entre **4% e 10%**, enquanto os agregados naturais normalmente apresentam valores inferiores a **2%**, o que exige ajustes na relação água/cimento para garantir a resistência final do concreto.

Silva e Sales (2022) verificaram que, para substituições de até **30% do agregado graúdo natural por agregado reciclado**, a resistência à compressão aos 28 dias manteve-se em níveis equivalentes ao concreto convencional, com variações inferiores a **5%**. Entretanto, para substituições superiores a **40%**, passou-se a observar reduções progressivas de resistência, podendo chegar a **20% de perda** quando a substituição atingiu **50%**.

Quanto ao módulo de elasticidade, Cassol e Rossignolo (2023) identificaram reduções médias entre **10% e 25%**, resultado associado à maior porosidade da argamassa aderida aos agregados reciclados e à presença de fragmentos cerâmicos. Esse comportamento indica que, embora o concreto reciclado possa atingir resistências adequadas, ele tende a apresentar **maior deformabilidade**, o que exige verificação estrutural conforme a NBR 6118:2023.

As normas técnicas reforçam essa necessidade de controle. A **NBR 15116:2023 – Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland — Requisitos e métodos de ensaios** estabelecem limites para absorção e impurezas; a **NBR 12655:2023 – Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento** orienta o controle tecnológico do concreto; e a **NBR 6118:2023 – Projeto de estruturas de concreto — Procedimento** exige comprovação de desempenho estrutural. Dessa forma, os resultados indicam que o concreto com agregados reciclados é **tecnicamente viável para aplicações estruturais de baixa e média solicitação**, desde que seja produzido com rigoroso controle de dosagem e qualidade.

4.1.1 Integração dos resultados da literatura com os limites da ABNT NBR 15116

A **ABNT NBR 15116:2023 – Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland — Requisitos e métodos de ensaios** estabelecem critérios técnicos para o uso de agregados reciclados em argamassas e concretos de cimento Portland, definindo limites para propriedades físicas e químicas que influenciam diretamente o desempenho do concreto. Dentre os

parâmetros mais relevantes para a avaliação da viabilidade técnica, destacam-se a absorção de água, a massa específica, o teor de impurezas e as restrições quanto à aplicação estrutural do material.

A literatura analisada indica que os agregados reciclados apresentam valores de absorção de água significativamente superiores aos dos agregados naturais. Enquanto a **NBR 15116:2023 – Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland — Requisitos e métodos de ensaios** admitem agregados reciclados com absorção elevada, desde que haja controle tecnológico e compensação da água absorvida, os estudos de Leite e Dal Molin (2021) e Silva e Sales (2022) reportam absorções variando entre 4% e 9%, e Cassol e Rossignolo (2023) valores entre 6% e 10%. Esses resultados demonstram que, embora os valores estejam acima dos observados para agregados naturais (geralmente inferiores a 2%), eles não inviabilizam o uso, desde que sejam adotadas as medidas previstas na norma, como o pré-umedecimento e o ajuste da relação água/cimento. Portanto, observa-se atendimento condicional às exigências normativas.

No que se refere à massa específica, a **NBR 15116:2023 – Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland — Requisitos e métodos de ensaios** não estabelece um valor mínimo fixo, mas exige controle e caracterização do material. Os estudos analisados apontam massas específicas inferiores às dos agregados naturais, associadas à presença de argamassa aderida. Ainda assim, os valores reportados permanecem dentro da faixa aceitável para uso em concretos, desde que consideradas as adaptações de dosagem, caracterizando atendimento aos requisitos normativos.

Quanto ao teor de impurezas, a norma define limites máximos para substâncias deletérias, como madeira, gesso, materiais orgânicos e partículas leves. Os estudos de referência indicam que, quando os agregados reciclados são provenientes de usinas com triagem e beneficiamento adequados, os teores de impurezas permanecem dentro dos limites estabelecidos pela **NBR 15116:2023 – Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland — Requisitos e métodos de ensaios**. Entretanto, a literatura também evidencia que a ausência de controle na origem dos resíduos pode levar ao não atendimento desses limites, tornando o uso do material tecnicamente inadequado. Assim, o atendimento normativo depende diretamente da qualidade do processo de reciclagem, sendo classificado como condicional ao controle tecnológico.

No que diz respeito à aplicação estrutural, a **NBR 15116:2023 – Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland — Requisitos e métodos de ensaios** adotam postura restritiva, especialmente para concretos com função estrutural, admitindo apenas agregados reciclados de melhor qualidade e com controle rigoroso. Os resultados da literatura demonstram que substituições de até 30% do agregado gráudo natural por reciclado mantêm resistência à compressão equivalente ou com variações inferiores a 5%, atendendo às exigências de desempenho mecânico. Para substituições superiores a 40%, entretanto, os estudos reportam reduções de resistência que podem alcançar 20%, o que caracteriza não atendimento às exigências normativas para aplicações estruturais convencionais.

Dessa forma, a comparação numérica direta entre os valores apresentados na literatura e os limites estabelecidos pela ABNT **NBR 15116:2023 – Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland — Requisitos e métodos de ensaios** evidenciam que o concreto com agregados reciclados atende às exigências normativas de forma parcial, sendo tecnicamente viável principalmente em substituições moderadas e sob rigoroso controle de qualidade. A conformidade plena com a norma está condicionada à origem do resíduo, ao processo de

beneficiamento e à aplicação prevista, reforçando a necessidade de controle tecnológico contínuo para garantir desempenho e segurança.

4.1.2 Limitações do estudo, análise quantitativa e avaliação estrutural aplicada

Do ponto de vista crítico, observa-se que a presente análise se baseia predominantemente em dados provenientes da literatura científica, não contemplando a realização de ensaios experimentais próprios. Essa abordagem, embora adequada para uma revisão técnica e normativa, impõe limitações quanto à validação direta dos resultados para contextos específicos de aplicação, devendo as conclusões ser interpretadas à luz das condições experimentais adotadas pelos autores de referência.

Outro aspecto limitante refere-se à **restrita exploração quantitativa da variabilidade dos resultados**. A maioria dos estudos analisados apresenta valores médios de propriedades mecânicas e físicas, com pouca ênfase em parâmetros estatísticos como desvio padrão ou coeficiente de variação. A ausência desses indicadores dificulta a avaliação da dispersão dos dados e da confiabilidade dos resultados, especialmente considerando a heterogeneidade intrínseca dos agregados reciclados. Uma abordagem estatística mais aprofundada permitiria compreender de forma mais clara os impactos da variabilidade dos resíduos no desempenho do concreto.

Além disso, embora alguns valores sejam citados de forma pontual na literatura, nem sempre há **comparação direta com os limites estabelecidos pelas normas técnicas**, especialmente a ABNT NBR 15116. Essa lacuna pode enfraquecer as conclusões, uma vez que a viabilidade técnica do concreto reciclado depende não apenas do desempenho relativo em relação ao concreto convencional, mas do efetivo atendimento aos requisitos normativos. A integração sistemática entre resultados experimentais e limites normativos, conforme discutido neste trabalho, mostra-se essencial para fortalecer a análise técnica.

No que se refere à **avaliação estrutural aplicada**, observa-se que a literatura concentra-se majoritariamente em ensaios laboratoriais de corpos de prova, havendo menor discussão sobre o comportamento do concreto reciclado em elementos construtivos reais. A análise de cenários práticos, como o uso em calçadas, pavimentos de baixo tráfego e lajes de pequenas edificações, permitiria uma avaliação mais concreta da viabilidade do material. Em aplicações como calçadas e pavimentos, por exemplo, a literatura indica que resistências à compressão compatíveis e maior tolerância à variabilidade tornam o concreto reciclado tecnicamente viável. Já em lajes e outros elementos estruturais, o desempenho do módulo de elasticidade e o controle da fissuração tornam-se fatores críticos, exigindo restrições quanto ao percentual de substituição e maior rigor no controle tecnológico.

Dessa forma, reconhece-se que a ausência de experimentação própria, a limitada abordagem estatística dos resultados e a escassez de análises estruturais aplicadas constituem limitações do presente estudo. Por outro lado, essas lacunas também indicam oportunidades para pesquisas futuras, especialmente voltadas à avaliação do comportamento estrutural e da durabilidade do concreto reciclado em condições reais de uso.

4.1.3 Limitações normativas, aplicação estrutural e análise crítica do concreto reciclado

A ABNT NBR 15116:2021 — **Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland: requisitos e métodos de ensaio** apresentam limitações quanto ao uso estrutural do concreto com agregados reciclados, pois concentra-se principalmente na caracterização física dos

agregados, não estabelecendo critérios completos de desempenho mecânico e de durabilidade do concreto endurecido. Dessa forma, sua aplicação estrutural deve ser conduzida com cautela e sob rigoroso controle tecnológico.

Estudos indicam que substituições entre **10% e 30% do agregado graúdo natural por agregado reciclado de concreto (RCA)** apresentam comportamento mecânico mais estável. Essa faixa é considerada mais segura para **elementos estruturais de baixa a média solicitação**, como lajes maciças de pequeno porte, vigas secundárias, escadas e elementos pré-moldados simples. Em elementos mais solicitados, como pilares e fundações, o uso do RCA deve ser evitado ou limitado a teores inferiores.

O desempenho do concreto reciclado está diretamente relacionado ao **processo de beneficiamento dos agregados**. Procedimentos adequados de triagem, britagem e classificação granulométrica reduzem a variabilidade do material, a absorção de água e a porosidade, resultando em resistências mais próximas às do concreto convencional. Agregados mal beneficiados tendem a apresentar maior dispersão dos resultados e redução do desempenho mecânico.

A maior estabilidade observada na faixa de 10% a 30% de substituição ocorre porque o agregado natural permanece predominante na matriz do concreto, minimizando os efeitos negativos associados à heterogeneidade do RCA. Substituições superiores a 40% resultam, de forma recorrente, em reduções do módulo de elasticidade e da resistência à compressão, restringindo o uso estrutural do material.

Para a validação do desempenho a longo prazo, recomenda-se a realização de **ensaios adicionais de durabilidade**, tais como carbonatação acelerada, penetração de íons cloreto, resistência à abrasão, absorção por capilaridade e comportamento frente a ciclos de gelo e degelo. Esses ensaios são essenciais para definir limites mais seguros de aplicação do concreto reciclado em diferentes condições de exposição ambiental.

4.2 Resultados da Análise Ambiental

Do ponto de vista ambiental, os resultados evidenciam ganhos expressivos com a reciclagem dos resíduos da construção civil. Segundo dados do IPT (2024), a implantação de sistemas de reciclagem pode reduzir em até **40%** o volume de resíduos destinados a aterros sanitários, contribuindo para o aumento da vida útil desses empreendimentos e a diminuição de áreas degradadas por descarte irregular.

Além disso, a substituição parcial de agregados naturais por agregados reciclados reduz diretamente a necessidade de exploração de jazidas, minimizando impactos como **supressão vegetal, erosão do solo, assoreamento de cursos d'água e consumo energético** associado à extração e ao transporte dos materiais.

John (2022) destaca que a reciclagem de RCD constitui uma das principais estratégias para a redução das emissões de CO₂ no setor da construção, uma vez que diminui o consumo de recursos virgens e reduz distâncias de transporte. Esse aspecto é especialmente relevante em áreas urbanas densas, onde a geração de resíduos e a demanda por materiais são simultaneamente elevadas.

A Resolução CONAMA nº 307/2002 reforça esse entendimento ao estabelecer a reciclagem como diretriz prioritária para a gestão dos resíduos da construção civil. Assim, os resultados indicam que o

uso de agregados reciclados representa uma **alternativa ambientalmente sustentável e alinhada aos princípios da economia circular**.

4.3 Resultados da Análise Econômica

A análise econômica demonstra que a viabilidade financeira dos agregados reciclados depende fortemente das condições logísticas e da infraestrutura de reciclagem disponível. Vieira e Figueiredo (2022) apontam que, quando as usinas de reciclagem estão localizadas próximas aos centros consumidores, o custo dos agregados reciclados pode ser **10% a 20% inferior** ao dos agregados naturais.

Oliveira e Cabral (2023) destacam que essa redução decorre principalmente da economia com transporte, da eliminação dos custos de extração mineral e da redução das taxas de destinação final de resíduos. Em contextos urbanos com produção elevada de RCD, a utilização de usinas fixas ou móveis potencializa ainda mais essa vantagem econômica.

Entretanto, em regiões onde a infraestrutura de reciclagem é limitada ou distante, os custos de transporte podem neutralizar parte desse benefício, reduzindo a competitividade do agregado reciclado. Assim, os resultados mostram que a viabilidade econômica é **regionalmente dependente**, sendo mais favorável em grandes centros urbanos.

4.4 Análise Crítica dos Resultados

De modo geral, os resultados apresentados pelos autores analisados demonstram que a substituição parcial dos agregados naturais por agregados reciclados pode ser tecnicamente viável, especialmente em porcentagens inferiores a 30%. Contudo, apesar dos valores de resistência e desempenho físico encontrados por Leite e Dal Molin (2021), Silva e Sales (2022) e Cassol e Rossignolo (2023) evidenciarem um comportamento satisfatório, observa-se que a variabilidade apresentada entre estudos indica que o desempenho do RCA depende fortemente do processo de beneficiamento, da qualidade do resíduo de origem e do controle tecnológico empregado na produção do concreto.

Outro aspecto relevante é que os estudos costumam enfatizar a resistência à compressão como principal parâmetro de desempenho, porém a literatura ainda carece de investigações consolidadas sobre durabilidade e comportamento em longo prazo. Essa lacuna limita a extrapolação dos resultados para aplicações estruturais mais exigentes, mesmo quando o desempenho mecânico inicial se apresenta dentro dos limites normativos. Portanto, embora os resultados indiquem potencial técnico, a aprovação definitiva do uso em larga escala depende da padronização de processos de reciclagem e de ensaios complementares.

Do ponto de vista comparativo, as pequenas diferenças observadas entre substituições de 10 a 30% sugerem uma oportunidade real para aplicação prática, principalmente em concretos não estruturais ou em aplicações de menor solicitação mecânica. Entretanto, o aumento para 50% de substituição mostrou reduções significativas de resistência e maior variabilidade, o que exige cautela na sua utilização, além de processos de beneficiamento mais rigorosos.

Assim, a análise crítica dos resultados mostra que os benefícios ambientais podem ser mais rapidamente alcançados em substituições moderadas, enquanto o uso mais intensivo dos agregados reciclados ainda depende de maior consolidação técnica e normativa, especialmente quanto à durabilidade e padronização dos resíduos.

4.5 Aplicabilidade Das Normas Aos Resultados Obtidos

Ao analisar conjuntamente os resultados dos autores e as exigências normativas brasileiras, observa-se que a **ABNT NBR 15116:2023 – Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland — Requisitos e métodos de ensaios** estabelecem limites e requisitos específicos para o uso dos agregados reciclados, indicando parâmetros de absorção, granulometria, durabilidade, massa específica e contaminação por materiais indesejáveis. Os estudos analisados se alinham parcialmente a esses requisitos, porém nem sempre apresentam avaliação completa dos parâmetros normativos, concentrando-se principalmente na resistência e absorção.

Em relação à **NBR 7211:2023 — Agregados para concreto – Especificação**, verifica-se que as propriedades básicas dos agregados reciclados apresentadas pelos autores, como granulometria e absorção, atendem aos requisitos mínimos, mas a variação dos valores em função do tipo de resíduo reforça a necessidade de controle sistemático do material reciclado, conforme previsto na norma.

Já a **NBR 12655:2023 – Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento**, ao abordar a necessidade de controle tecnológico do concreto produzido, reforça o argumento de que o desempenho do RCA depende diretamente do processo de produção, especialmente quanto ao controle de umidade, fator água/cimento e beneficiamento dos agregados, elementos que os autores analisados destacam como essenciais para manutenção do desempenho mecânico.

Por fim, a **NBR 6118:2023 – Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**, ao regular o uso do concreto estrutural, ainda é restritiva no uso de agregados reciclados em estruturas convencionalmente solicitadas, o que justifica o enfoque dos autores em aplicações parciais e substituições inferiores a 30%. Assim, a literatura identificada contribui para consolidar a aplicação normativa, porém ainda não é suficiente para alterar substancialmente as limitações impostas pela norma nas obras estruturais.

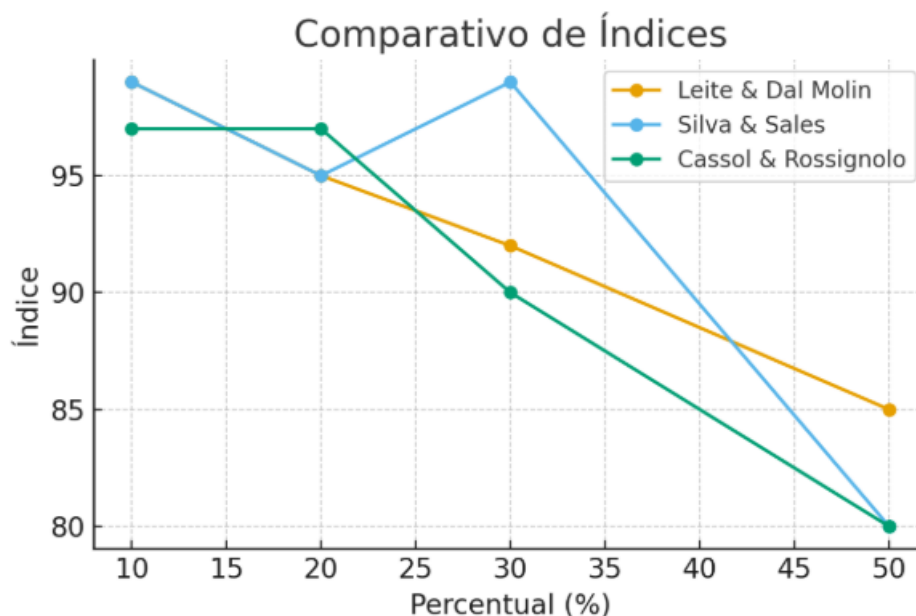
Em síntese, observa-se que as normas brasileiras oferecem o direcionamento técnico necessário, mas a literatura analisada evidencia que ainda existe uma distância entre o potencial tecnológico apresentado pelos pesquisadores e a aplicação normativa plena em campo, especialmente em termos estruturais e de durabilidade.

4.6 Análise Integrada Dos Dados Técnicos E Estudos De Caso

Os resultados apresentados consolidam as evidências técnicas discutidas ao longo deste estudo, permitindo visualizar, de forma integrada, como o uso de agregados reciclados se comporta tanto em ensaios laboratoriais quanto em aplicações práticas. A combinação entre o desempenho mecânico e os estudos de caso oferece uma leitura abrangente da viabilidade do material no contexto brasileiro.

Para compreender inicialmente o comportamento mecânico, o gráfico a seguir sintetiza a variação da resistência à compressão conforme aumentam os percentuais de substituição por agregado reciclado. Os três autores analisados convergem ao apontar que substituições moderadas (até 30%) mantêm desempenho compatível ao concreto convencional, enquanto percentuais superiores exigem maior controle tecnológico. Esse panorama reforça um dos pilares do trabalho: a substituição parcial é técnica e operacionalmente viável quando bem controlada.

Gráfico 1 – Desempenho da Resistência à Compressão em Diferentes Percentuais de Substituição



Fonte: Elaboração própria dos autores, com base nos resultados descritos pelos autores citados.

O gráfico apresentado compara o desempenho mecânico do concreto com agregados reciclados em diferentes percentuais de substituição (10%, 20%, 30% e 50%) segundo três estudos de referência utilizados no trabalho: **Leite & Dal Molin (2021)**, **Silva & Sales (2022)** e **Cassol & Rossignolo (2023)**.

Cada linha representa como a resistência à compressão varia conforme aumenta a quantidade de agregado reciclado na mistura. Essa comparação é essencial para verificar **até que ponto a substituição é tecnicamente viável** sem comprometer o desempenho estrutural do concreto.

Com base nesse comportamento mecânico, as tabelas seguintes aprofundam como cada estudo aborda aspectos complementares desde caracterização dos materiais até recomendações práticas. Enquanto o gráfico traduz numericamente o impacto da substituição, as tabelas ampliam a interpretação técnica ao evidenciar diferenças de enfoque, cobertura normativa e indicações práticas dos autores analisados.

Tabela 2 – Comparação dos Principais Estudos sobre Concreto com Agregados Reciclados

Critério / Estudo	Leite & Dal Molin (2021)	Silva & Sales (2022)	Cassol & Rossignolo (2023)
Ênfase principal	Caracterização físico-mecânica e faixas de substituição	Resistência à compressão comparativa (28 dias)	Módulo de elasticidade e variabilidade do RCA
Tratamento do beneficiamento	Descrito; efeito destacado	Moderado	Descrito com foco em deformabilidade
Cobertura normativa	Mencionada/Parcial	Mencionada/Parcial	Mencionada/Parcial
Indicação prática	Substituições moderadas	Substituições moderadas	Cautela acima de 30%; atenção

	(≤30%)	(≤30%)	à deformabilidade
Limitação destacada	Durabilidade a longo prazo pouco explorada	Falta de estudos de longo prazo	Alta variabilidade entre amostras

Fonte: Elaboração própria dos autores, com base nos resultados descritos pelos autores citados.

A tabela apresentada faz uma comparação entre os estudos analisados, evidenciando que cada autor aborda aspectos distintos do concreto com agregado reciclado. Leite & Dal Molin (2021) enfatizam a caracterização físico-mecânica e as faixas de substituição, enquanto Silva & Sales (2022) focam na resistência à compressão aos 28 dias. Já Cassol & Rossignolo (2023) destacam o módulo de elasticidade e a deformabilidade do material.

Todos os estudos reconhecem a importância do beneficiamento, embora em profundidades diferentes, e mencionam parcialmente as normas aplicáveis. Em relação à indicação prática, há consenso de que substituições de até 30% são viáveis, apresentando desempenho semelhante ao concreto convencional, enquanto percentuais superiores exigem maior cautela devido ao aumento da variabilidade e da deformabilidade.

Além das análises laboratoriais e comparações bibliográficas, é fundamental observar como esses resultados se materializam em contextos reais. Por isso, a última tabela reúne estudos de caso de cidades brasileiras que já adotam agregados reciclados em obras públicas. Esses exemplos demonstram que, na prática, o desempenho verificado em laboratório encontra correspondência no campo, especialmente quando há infraestrutura adequada, parcerias técnicas e logística eficiente.

Tabela 3 – Estudos de Caso Brasileiros sobre o Uso de Agregados Reciclados

Cidade	Principais aplicações	Observações práticas
São paulo	Pavimentação, bases, obras municipais	Alta capacidade de usinas; escala de processamento favorece economia logística
Curitiba	Pavimentos rígidos, calçadas, blocos	Parcerias com universidades; monitoramento de desempenho em campo
Recife	Drenagem, subleitos, manutenção	Usina municipal; redução de transporte e logística local

Fonte: Elaboração própria dos autores, com base nos resultados descritos pelos autores citados.

A tabela apresenta três estudos de caso brasileiros que exemplificam a aplicação prática dos agregados reciclados em obras públicas. Em São Paulo, o uso concentra-se em pavimentação e bases, favorecido pela alta capacidade das usinas e pela economia logística. Curitiba se destaca pela aplicação em pavimentos rígidos, calçadas e blocos, impulsionada por parcerias com universidades e monitoramento técnico contínuo. Já Recife utiliza agregados reciclados principalmente em drenagem, subleitos e manutenção urbana, beneficiando-se de uma usina municipal que reduz custos de transporte e facilita a logística local.

A síntese evidencia que, apesar das diferentes estratégias, todas as cidades demonstram resultados positivos e tecnicamente viáveis, reforçando a aplicabilidade dos agregados reciclados no contexto urbano.

Assim, ao integrar resultados técnicos, análises comparativas e experiências municipais, o conjunto de evidências confirma que o uso de agregados reciclados é uma solução viável, estratégica e alinhada às diretrizes de sustentabilidade urbana. A consistência entre estudos, ensaios e aplicações reforça a possibilidade de ampliar o uso do material em diferentes escalas, desde obras locais até projetos de maior complexidade.

5. CONCLUSÃO

A partir das análises realizadas, verificou-se que o uso de agregados reciclados em concretos apresenta viabilidade técnica principalmente em substituições de até 30%, intervalo em que os estudos analisados demonstram que a resistência à compressão permanece próxima aos valores do concreto convencional. Os estudos de caso consultados reforçam essa constatação, mostrando que diversas cidades brasileiras já utilizam o material em aplicações como pavimentação, bases e elementos de infraestrutura, com resultados consistentes. Dessa forma, os objetivos propostos foram atendidos, uma vez que foi possível reunir, comparar e discutir dados que confirmam o potencial do agregado reciclado para uso na construção civil.

Entretanto, o trabalho apresenta limitações importantes. A ausência de ensaios experimentais próprios restringe a análise ao que está disponível na literatura e aos dados já publicados, impossibilitando validar diretamente os resultados apresentados pelos autores. Além disso, a variabilidade do agregado reciclado, decorrente de sua procedência e do processo de beneficiamento, pode gerar diferenças significativas no desempenho final do concreto, o que deve ser considerado na interpretação dos resultados.

Com base nessas limitações, recomenda-se que trabalhos futuros incluam ensaios laboratoriais que avaliem diferentes percentuais de substituição em condições controladas. Estudos que investiguem propriedades complementares, como módulo de elasticidade, absorção, durabilidade e comportamento em ciclos climáticos, também podem ampliar a compreensão sobre o desempenho do material. Pesquisas que relacionem custo, impacto ambiental e ciclo de vida do agregado reciclado podem contribuir para decisões mais completas no âmbito da engenharia.

No campo prático, recomenda-se que profissionais da área utilizem agregados reciclados provenientes de usinas com controle de qualidade, garantindo menor presença de contaminantes e granulometria adequada. Para aplicações em obras de baixa e média solicitação, a substituição de até 30% se mostra uma alternativa tecnicamente segura, desde que acompanhada por controle tecnológico e pela conformidade com as normas vigentes. Em obras urbanas, o uso do agregado reciclado pode ser ampliado para bases, sub-bases, pavimentos intertravados e elementos não estruturais, contribuindo para a redução dos impactos ambientais e para o avanço da economia circular no setor.

Conclui-se que o agregado reciclado representa uma alternativa viável e alinhada às práticas sustentáveis da construção civil. Quando utilizado de forma controlada e dentro das recomendações normativas, o material apresenta potencial para reduzir resíduos, otimizar recursos e colaborar para um modelo mais sustentável de desenvolvimento urbano. Diante dos resultados apresentados, surge a seguinte questão que pode orientar pesquisas futuras e reflexões no campo da engenharia civil: até

que ponto o concreto reciclado pode se consolidar como uma alternativa técnica e economicamente viável ao concreto convencional, garantindo segurança, desempenho estrutural e sustentabilidade nas obras?

AGRADECIMENTOS

Concluir este Trabalho de Conclusão de Curso, após cinco anos de dedicação, desafios e muito aprendizado, representa para nós mais do que o encerramento de uma etapa: é a celebração de uma trajetória que nos transformou como estudantes e como pessoas. Este trabalho é resultado do esforço coletivo e do apoio de todos que caminharam ao nosso lado.

A Deus, agradecemos pela força diária, pela coragem nos momentos difíceis e pela luz que guiou nossos passos ao longo dessa jornada.

À Faculdade UNA, nosso sincero agradecimento pelo ambiente de crescimento acadêmico e humano. Agradecemos aos professores e à equipe institucional que contribuíram para nossa formação como futuros engenheiros.

À nossa orientadora, Sheila Leal Oliveira Loureiro, deixamos um agradecimento especial pela paciência, disponibilidade e orientação segura, fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradecemos com carinho às nossas famílias, que foram nossa base, oferecendo apoio, amor e incentivo durante toda a graduação. Aos amigos, que compreenderam nossas ausências e celebraram conosco cada conquista, nossa gratidão pela parceria constante.

À banca examinadora, agradecemos pelo tempo dedicado, pelas contribuições valiosas e pela oportunidade de aprimorar ainda mais este estudo por meio de suas considerações e análises.

A nós mesmos — Luanna, Matheus, Vitor e Felipe — agradecemos pela união, resiliência e compromisso. Foram inúmeras reuniões, ideias compartilhadas e desafios superados em conjunto, que fortaleceram nossa parceria e deram vida a este trabalho.

Encerramos esta etapa com gratidão, orgulho e a certeza de que a Engenharia nos preparou para novos desafios. Esta conquista é coletiva e ficará marcada em nossa história.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGULO, Sérgio Cirelli. Reciclagem de resíduos de construção e demolição: fundamentos e aplicações. São Paulo: Oficina de Textos, 2021.

ANGULO, Sérgio Cirelli; ZORDAN, Sérgio Eduardo; JOHN, Vanderley Moacyr. Impactos ambientais e logísticos dos agregados na construção civil. São Paulo: PINI, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118:2023 – Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 12655:2023 – Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15116:2023 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil — Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural — Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15575:2021 – Edificações habitacionais — Desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7211:2022 – Agregados para concreto — Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA n.º 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 17 jul. 2002.

CASSOL, Rodrigo; ROSSIGNOLO, João Adriano. Propriedades mecânicas do concreto com agregados reciclados. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, São Paulo, v. 16, n. 2, p. 1–15, 2023.

DE BRITO, J.; SAID, J. Durability performance of recycled aggregate concrete. Materials and Structures, v. 45, n. 1–2, p. 1–15, 2012.

EVANGELISTA, L.; DE BRITO, J. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. Cement and Concrete Composites, v. 29, n. 5, p. 397–401, 2007.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). Reciclagem de resíduos da construção civil no Brasil: panorama técnico e ambiental. São Paulo: IPT, 2024.

JOHN, Vanderley Moacyr. Sustentabilidade na construção civil: princípios e práticas. 3. ed. São Paulo: PINI, 2022.

KOU, S. C.; POON, C. S. Properties of concrete prepared with recycled aggregates at different replacement levels. Cement and Concrete Composites, v. 31, n. 6, p. 403–410, 2009.

LEITE, Mônica Barros; DAL MOLIN, Denise Carpena Coitinho. Concreto com agregados reciclados: comportamento mecânico e durabilidade. Porto Alegre: Editora UFRGS, 2021.

OLIVEIRA, L. A.; CABRAL, A. E. B. Viabilidade econômica do uso de agregados reciclados na construção civil. Revista Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 23, n. 1, p. 89–104, 2023.

POON, C. S.; CHAN, D. The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong. Resources, Conservation and Recycling, v. 50, n. 3, p. 293–305, 2007.

SAGOE-CRENTSIL, K. K.; BROWN, T.; TAYLOR, A. H. Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. Cement and Concrete Research, v. 31, n. 5, p. 701–712, 2001.

SCHIAVON, Paulo Ricardo. Usinas móveis de reciclagem de RCD e seus impactos logísticos. Curitiba: UTFPR, 2022.

SILVA, Matheus Pereira; SALES, Marcos Vinícius. Análise da resistência à compressão de concreto com agregado reciclado. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, São Paulo, v. 15, n. 3, p. 101–118, 2022.

SILVA, Ricardo José da; MENDES, André Luiz. Viabilidade econômica de agregados reciclados na construção civil. Revista Engenharia Sustentável, Belo Horizonte, v. 10, n. 1, p. 75–92, 2021.

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. Performance of recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials, v. 105, p. 400–416, 2016.

SOUZA, Felipe Henrique; GONÇALVES, Renato Alves. Avaliação econômica do concreto reciclado em obras públicas. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2022.

VIEIRA, L. L.; FIGUEIREDO, A. D. Custos de produção e logística de agregados reciclados na construção civil. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, São Paulo, v. 15, n. 3, p. 1–13, 2022.

ZORDAN, Sérgio Eduardo. Gestão de resíduos na construção civil: diagnóstico e soluções. São Paulo: Blucher, 2021.