

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia de Materiais e Construção

Maria Júlia de Oliveira e Souza Palhares

CONCRETOS COM RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO: REVISÃO

Belo Horizonte
2023
Maria Júlia de Oliveira Palhares

CONCRETOS COM RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO: REVISÃO

Versão Final

Monografia de especialização apresentada à Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Construção Civil.

Área: Produção e Gestão do Ambiente Construído

Orientador(a): White José dos Santos

Belo Horizonte

2023

Nome: Maria Júlia de Oliveira Palhares

Título: Concretos com Resíduos de Construção e Demolição: Revisão

Monografia de especialização apresentada à Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Construção Civil.

Banca examinadora:

Nome, Titulação - Vinculação Institucional (Orientadora)

Julgamento: _____

Nome, Titulação - Vinculação Institucional (Banca examinadora)

Julgamento: _____

Belo Horizonte, Dezembro de 2023

CONCRETOS COM RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO: REVISÃO

P191c	<p>Palhares, Maria Júlia de Oliveira. Concretos com resíduos de construção e demolição [recurso eletrônico] : revisão / Maria Júlia de Oliveira Palhares. – 2023. 1 recurso online (47 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: White José dos Santos.</p> <p>"Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Produção e Gestão do Ambiente Construído da Escola de Engenharia da UFMG".</p> <p>Bibliografia: f. 40-46. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Construção civil. 2. Agregados (Materiais de construção) - Reaproveitamento. 3. Demolição. 4. Resíduos sólidos. 5. Risco ambiental. I. Santos, White José dos. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 69</p>
-------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------



ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA

ALUNO: MARIA JÚLIA DE OLIVEIRA PALHARES

MATRÍCULA: 2023671030

RESULTADO

Aos 20 dias do mês de dezembro de 2023 realizou-se a defesa da MONOGRAFIA de autoria do aluno acima mencionado sob o título:

“CONCRETOS COM RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO: REVISÃO”

Após análise, concluiu-se pela alternativa assinalada abaixo:

APROVADO

APROVADO COM CORREÇÕES

REPROVADO

NOTA: ---85---

CONCEITO: ---B---

BANCA EXAMINADORA:

Nome

Prof. Dr. White José dos Santos

Assinatura

White Jose dos Santos:04545674640

Motivo: Eu estou aprovando este documento
Data: 2023-12-20 13:47:03:00

Nome

Prof. Dr. Fernando do Couto Rosa Almeida

Assinatura

Fernando do Couto Rosa Almeida

Digitally signed by Fernando do Couto Rosa Almeida
Date: 2023.12.20 13:55:29 -03'00'

O candidato faz jus ao grau de "ESPECIALISTA NA ÁREA DE "TECNOLOGIA E GESTÃO DO AMBIENTE CONSTRUÍDO"

Belo Horizonte, 20 de dezembro de 2023

Antônio Neves de Carvalho Júnior

Assinado de forma digital por Antônio Neves de Carvalho Júnior
Dados: 2023.12.21 03:24:35 -03'00'

Coordenador do Curso

Maria Júlia de Oliveira Palhares

RESUMO

Cerca de 40 a 70% da massa de resíduos sólidos produzidos em municípios brasileiros são de resíduos da construção civil. A correta destinação e gestão destes resíduos são essenciais para a minimização de riscos ambientais. Outro fator alarmante associado à construção civil é o fato de o setor ser um grande consumidor de recursos naturais como areia e brita. Os resíduos da construção civil de classe A têm sido uma resposta para solucionar esses problemas, podendo, esse resíduo específico, ser reutilizado ou reciclado como agregado. Tendo isso em vista, o presente trabalho visa revisar artigos sobre o uso de resíduos de construção e demolição em concretos, a fim de analisar os resultados e encontrar aspectos que ainda não foram estudados. Este trabalho visa ainda fazer um levantamento de dados estatísticos sobre o tema. Para isso, foram lidos mais de cinquenta artigos, todos selecionados usando a técnica de Proknow-C. Após analisar os artigos selecionados, pode-se observar que o agregado reciclado tanto graúdo quanto miúdo pode ser 100% substituído no lugar da brita e areia natural, tendo como ressalva, que o concreto com agregado reciclado pode ter suas propriedades e características melhoradas e adequadas para cada uso ou aplicação. Concluiu-se que apenas uma das pesquisas analisadas, avaliou a durabilidade do concreto com agregado reciclado, sendo que esta avaliação aconteceu ao longo de 3 anos. Há possibilidades de, em pesquisas futuras, avaliar, por exemplo, se a data da demolição interfere nos resultados das características do agregado reciclado e do concreto. Outra proposta é analisar quantas vezes pode-se reutilizar um concreto que já tenha sido usado agregado reciclado.

Palavras-chave: Resíduos da construção e demolição; Concreto com agregado reciclado; Reciclagem de RCD; Propriedades de concretos.

ABSTRACT

About 40 to 70% of the solid waste produced in Brazilian cities consists of construction waste. Proper disposal and management of these residues are essential to minimize environmental risks. Another alarming factor associated with construction is its high consumption of natural resources such as sand and gravel. Class A construction waste has been a response to solving these problems, as this specific waste can be reused or recycled as an aggregate. With that in mind, this study aims to review articles on the use of construction and demolition waste in concrete to analyze the results and identify aspects that have not been studied yet. The study also aims to gather statistical data on the subject. To achieve this, over fifty articles were read, all selected using the Proknow-C technique. After analyzing the selected articles, it was observed that both coarse and fine recycled aggregate can be 100% substituted in place of natural gravel and sand, with the caveat that concrete with recycled aggregate can have its properties and characteristics improved and tailored for each specific use or application. It was concluded that only one of the analyzed research studies evaluated the durability of concrete with recycled aggregate over a period of 3 years. There are possibilities for future research to evaluate, for example, whether the demolition date influences the results of the recycled aggregate and concrete characteristics. Another proposal is to analyze how many times concrete with recycled aggregate can be reused after its initial use.

Keywords: Construction and demolition waste; Concrete with recycled aggregate; Recycling of C&D waste; Properties of concrete

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Propriedades físicas dos AR graúdos.....	25
Tabela 2- Composição de materiais de AR grossos.....	26
Tabela 3- Composição de materiais em ARs finos.....	26
Tabela 4- Composição química de ARs finos.....	27
Tabela 5- Propriedades físicas dos AR finos.....	28

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Resistência à compressão aos 28 dias	33
Gráfico 2-Densidade do concreto.....	34
Gráfico 3- Absorção de água	35
Gráfico 4- Resistência à tração aos 28 dias	36
Gráfico 5- Resistência à compressão aos 28 dias	37
Gráfico 6- Resistência à tração aos 28 dias	37
Gráfico 7- Números de pesquisas sobre uso de AR no concreto ao longo dos anos.....	38
Gráfico 8-Fontes de publicação.....	39

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. OBJETIVOS	18
2.1 Objetivo Geral	18
2.2 Objetivos específicos.....	18
3. METODOLOGIA	19
4. RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL	20
4.1 Classificação	20
4.2 Geração no brasil e no mundo	20
4.3 Usinas de britagem	21
4.4 Economia circular	22
5. TIPOS DE RCD E SUAS CARCATERÍSTICAS	24
5.1 Agregado reciclado grosso	24
5.2 Agregado reciclado miúdo	26
6. USO E APLICAÇÕES DE AGREGADOS RECICLADOS	29
6.1 Agregado reciclado proveniente de cerâmicas	29
6.2 Agregado reciclado proveniente de concreto	29
6.3 Concreto feito a partir de Agregado Reciclado Misto (ARM)	30
6.4 Concreto de autoadensável feito a partir de Agregado Reciclado (AR)	31
6.5 Concreto com Agregado Reciclado com finalidade estrutural	32
7. CARACTERÍSTICAS DOS CONCRETOS COM RCD	33
7.1. Concreto com agregado reciclado grosso misto	33
7.2 Concreto com agregado reciclado fino.....	36
7.3 Dados estatísticos de pesquisas sobre ar no concreto	37
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

1. INTRODUÇÃO

A brita e a areia são componentes indispensáveis do concreto e da argamassa, estes agregados representam aproximadamente 75% do concreto total (MOHAMAD *et.al.*2021). E o concreto é o material de construção mais utilizado a nível mundial (JAGADEH *et.al.*, 2021). Com isso, pode-se notar que a indústria da construção civil é responsável por um alto percentual de consumo de recursos naturais, com consumo de 4 bilhões de toneladas de agregados naturais no ano de 2014 (MADUABUCHUKWU *et.al.*, 2020). Muitas pedreiras danificaram seriamente o ambiente ecológico (MAO *et. al.*, 2021). Nos últimos anos, o agregado natural em algumas partes do mundo se esgotou e isso não só aumenta o custo da construção, mas também agrava o impacto ambiental, já que áreas de mineração são de difícil recuperação e podem conter resíduos perigosos a saúde (CORINALDESI, 2010). Portanto, ao mesmo tempo que a construção consome muitos recursos naturais, ela gera também muitos resíduos sólidos (WANG *et.al.*, 2020).

Além desses problemas, nas últimas décadas têm aumentado as mudanças climáticas e a ciência agora é capaz de atribuir a maior parte disso às emissões antrópicas de dióxido de carbono e conseqüente aquecimento global. Nos últimos cinco anos, os mais quentes já registrados, os riscos relacionados às mudanças climáticas foram mais intensos e aumentaram mais rapidamente do que o esperado (COFFETI *et.al.*, 2022). Em 2019, as emissões de CO₂ do setor de construção foram as mais altas já registradas em cerca de 10 Gt de CO₂ por ano (38% do total de emissões globais de dióxido de carbono relacionadas à energia, incluindo emissões da indústria de construção) (HAMILTON *et.al.*, 2020).

Unindo a ideia de redução de consumo com a destinação correta dos resíduos da construção civil, pesquisadores vêm estudando e avaliando o uso de agregados reciclados a partir de Resíduo de Construção Civil (RCC) ou Resíduo de Construção e Demolição (RCD) em concretos e argamassas (LIU *et.al.*,2021). A geração de resíduo sólidos dentro da vida de um empreendimento ocorre principalmente nas etapas de construção e demolição (AKHTAR,2022). É na etapa de demolição que ocorre a geração dos RCD de classe A. Tais resíduos são provenientes de concreto, blocos, tijolos e cerâmicas, terraplanagens, reformas de vias pavimentadas, que podem ser britados e reduzidos à granulometria de britas e areias. Os chamados

agregados reciclados têm ganhado espaço em termos de pesquisas e utilizações. Eles têm mostrado ser uma solução para os problemas de alto consumo de recursos naturais e alta geração de resíduos na engenharia civil (NEDELJKOVIĆ *et.al.*, 2021).

Todos esses fatos, mostram a necessidade de dar aos entulhos da construção civil uma destinação mais correta, já que é um resíduo altamente gerado. Portanto, existem variados trabalhos e pesquisas sobre o uso de resíduos da construção civil como agregado em concreto ou argamassa estrutural, que precisam ser revisados. Já é de conhecimento geral, que o uso desse resíduo reduz o desempenho do concreto quando não há uso de nenhum aditivo e nenhum método de preparo do agregado reciclado, fato que se deve à heterogeneidade desse tipo de material. Este tipo de resíduo já vem sendo estudado de forma a ser separado em tipos de materiais, para assim obter resultados melhores. No entanto, existem muitas lacunas ainda para tornar o uso de RCC de classe A crucial e econômico.

Com todas essas informações, a presente monografia, tem por objetivos revisar estudos e pesquisas sobre o tema uso de RCD de classe A em concretos, como também fazer um levantamento de dados estatísticos sobre utilização de resíduos da construção civil de classe A em argamassa e concretos estruturais. Pretende-se atingir esses objetivos levantando dados estáticos sobre pesquisas de uso de resíduos de construção civil de classe A no concreto, evidenciando possíveis melhoras no método de fabricação e composição do concreto/ argamassa e identificando pontos negativos e positivos do uso de RCC de classe A em concreto e argamassas.

No segundo capítulo são especificados o objetivo geral e específicos dessa monografia. A metodologia é apresentada no terceiro, abordando como se chegou nas pesquisas referenciadas e análises de resultados. No capítulo quarto os resíduos da construção civil são descritos e classificados e ainda os dados de RCC no mundo e no Brasil são abordados e contextualizados. Destaca-se, também, a importância das usinas de britagem nas características do concreto com agregado reciclado e apresenta-se o conceito de economia circular e sua importância no aproveitamento de resíduos da construção civil. No capítulo quinto, são levantados os tipos e características dos agregados reciclados miúdos e graúdos. No sexto, evidencia-se os usos e as aplicações de agregados reciclados no concreto. No sétimo capítulo gráficos são apresentados para comparar os resultados de ensaios de concretos com

o uso de resíduos da construção civil de diferentes pesquisas e fontes. E por último, as considerações finais.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Revisar bibliografias, levantando informações acerca da utilização de resíduos da construção civil Classe A em concretos, bem como fazer um levantamento de dados estatísticos sobre o tema.

2.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, tem-se os objetivos específicos:

- Levantar informação sobre as características e propriedades do RCC de classe A;
- Analisar o comportamento de concreto RCC de classe A;
- Fazer comparação dos resultados dos ensaios laboratoriais de diferentes referências através de tabelas e gráficos;
- A partir da comparação de dados e resultados de pesquisa, observar qual foi a que obteve o melhor resultado;
- Definir lacunas de pesquisa (temas para estudos futuros).

3. METODOLOGIA

No presente trabalho, foram revisados estudos sobre o uso de agregado reciclado em concreto e argamassa, sob numa uma visão quantitativa e qualitativa. Para tal fim, a escolha dos artigos foi feita usando o método *Proknow-C*. Os artigos selecionados para essa revisão foram publicados entre os anos de 2015 a 2023. As palavras-chave utilizadas foram “*Recycled aggregate*” and “*concrete applications*”, “*Recycled aggregate*” and “*mortar applications*”, “*Construction*” and “*demolition waste*” and “*recycling plant*”, “*Construction and demolition waste*’ and “*recycling and reuse*” e “*Recycled aggregate*” and “*aplications*”.

As bases de dados utilizadas para a seleção dos artigos foram *Science Direct*, Google acadêmico e *Springer*. Com auxílio do gerenciador *Mendeley* foram selecionados cinquenta artigos, dos quais foram feitos resumos, citações, tabulações e gráficos. Os dados de pesquisas selecionadas foram colocados em tabelas e gráficos para fins de comparações e análises de resultados. Foram também citadas informações consideradas de relevância para a melhor compreensão do tema, como os tipos de uso dos concretos com agregados reciclados encontrados nas pesquisas e características desse tipo de concreto, como também conclusões tiradas pelos pesquisadores.

Foram realizados levantamentos de informações sobre as características do RCC de classe A, conhecido como agregado reciclado (AR) e sobre as análises do comportamento de concreto e argamassa com RCC de classe A. Foram feitos comentários ao longo da monografia sobre os pontos negativos e os positivos do uso do resíduo de construção civil em concreto e argamassas, bem como análises de qual a melhor e mais adequada destinação para esse resíduo.

4. RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

4.1 Classificação

Os Resíduos da Construção Civil (RCC), segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (2010), são: “Os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis” (PNRS, 2010).

Segundo a NBR 15114 (ABNT, 2004) e Resolução CONAMA 307 (2003), esses resíduos são classificados de acordo com a sua possibilidade de reaproveitamento em:

“ **Classe A** – resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como solos de terraplanagem, tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento, argamassa, concreto, tubos, meios-fios, etc;

Classe B – resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras etc;

Classe C – resíduos ainda sem tecnologia ou aplicações economicamente viáveis para a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso.

Classe D – resíduos perigosos, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados. ”

No entanto, a Resolução CONAMA 431 (2011) modificou a classificação do gesso, de Classe C para a Classe B. Embora o gesso tenha sido reclassificado como resíduo classe B, ainda necessita ser depositado em recipiente próprio, não sendo permitida a sua mistura com os demais resíduos classe B, muito menos com os das outras classes (CARTAXO *et.al.*2013). O presente trabalho refere-se apenas ao uso de RCD de classe A.

4.2 Geração no Brasil e no mundo

A indústria da construção gera mais de 75 milhões de toneladas (Mt) de resíduos de concreto a cada ano (KAARTHING; MARUTHACHALAM. 2021). Diante desse fato, os resíduos de construção estão tornando-se uma questão ambiental significativa em muitas nações em desenvolvimento e a gestão de resíduos sólidos é uma preocupação enfrentada pela maioria destas nações. Exemplo disso, é um estudo feito no Japão, que mostrou que a produção de concreto com agregado reciclado pode

reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 65% e a utilização de energia não renovável em 58%, quando em comparação com a produção de concreto agregado natural (GEBREMARIAM; TAYE; TAREKEG. 2023).

Segundo Wang *et.al.* (2023) a produção de concreto comercial na China foi de 3,06 bilhões de m³ em 2022, um aumento de 5,53% em comparação com o ano anterior em 2021. O Gabinete Nacional de Estatísticas da China anunciou que a produção anual de resíduos de construção do país atingiu 3,209 mil milhões de metros cúbicos em 2021. Segundo Garg e Shrivastava (2023) a agência governamental indiana, o Conselho de Promoção de Materiais e Tecnologia de Construção, estimou que uma quantidade de cerca de 150 milhões de toneladas de detritos de construção e demolição é produzida anualmente nas cidades indianas. Cerca de 6.500 toneladas/dia. Devido a inexistência de um plano específico para o manejo e aproveitamento desses resíduos, estes acabam indo para os aterros sanitários, perdendo grande parte do potencial para serem reaproveitados ou reciclados.

Na Europa, foi relatado que uma grande parte dos RCD é reciclada através de aterro. Apesar do fato de os resíduos de concreto serem adequados para utilização tanto como substituto do cimento Portland como substituto de agregados, a quantidade de RCA gerada na Europa ainda é insatisfatória, representando cerca de 9,4 % da procura total (OZCELIKCI; SAHMARAN, 2023).

Em 2021, o Brasil produziu cerca de 48 milhões de toneladas, valor 3% maior do que o ano anterior (2020). Sendo que, apenas 6% desse RCD gerado é recuperado (ORTOLAN *et.al.*, 2023). Segundo Faria (2019), o Brasil é capaz de reciclar 98% dos RCCs produzidos no país, mas só tem dado conta de reciclar 21% desses resíduos. Para estes pesquisadores, o problema se encontra nos pequenos geradores desse tipo de resíduo, já que as grandes construtoras estão sujeitas a uma forte fiscalização e também almejam ter um selo de sustentabilidade.

4.3 Usinas de britagem

Sobre a tipologia das usinas de britagem de RCD, podem ser classificadas em usinas fixas, móveis ou híbridas. Considerando que, as usinas fixas se referem às instalações industriais situadas em uma determinada área, cuja linha de produção encontra-se fixada no local e não possui flexibilidade de movimentação. Já as usinas

móveis se referem às instalações industriais que possuem alta capacidade de mobilidade e são montadas temporariamente nos pontos de geração de RCD. As usinas híbridas são aquelas que possuem pelo menos um equipamento móvel que pode se mover para operar fora da planta industrial fixa. Estudos mostram que a maioria das usinas no Brasil são fixas, sendo elas aproximadamente 77% do total (ABRECON, 2018).

Segundo ABRECON (2018), o Distrito Federal e os estados do Rio de Janeiro, Paraná, Espírito Santo e São Paulo são as regiões com incidência de usinas que recebem RCD de origem cimentícia. Já o Ceará, Goiás, Maranhão, Mato Grosso, Pernambuco e Roraima são regiões onde as usinas só recebem material misto. As usinas do Espírito Santo, Minas Gerais, Paraná, Rio Grande do Sul, Santa Catarina e São Paulo tendem a receber maior teor de RCD misto. Todos esses dados mostram como o tipo de resíduo coletado e britado depende da região ou da cidade ou do estado, onde a usina se localiza. Por isso, é essencial analisar cuidadosamente as características do RCA derivado de diversas regiões e identificar como elas afetam o desempenho final antes de integrá-lo em sistemas convencionais de cimento Portland (OZCELIKCI; SAHMARAN.2023).

A situação das usinas de britagem no Brasil está bem precária, a maior parte das usinas não faz controle tecnológico ou ensaios dos RCDs e nos últimos anos, devido uma crise econômica no país, ocorreu um aumento de usinas paralisadas temporariamente e a redução do percentual de usinas em projeto ou em implantação. Além disso foi constatado que percentual de usinas que recebem o material totalmente triado foi de 48% em 2018 (ABRECON, 2018).

4.4 Economia circular

É de conhecimento que o modelo de economia linear da indústria da construção, que funciona seguindo o ditado de “fazer-usar-descartar” ao longo dos anos, resulta em um alto fardo ambiental e econômico. Levando em conta que o setor da construção provoca a maior utilização de recursos naturais do que qualquer outra indústria é evidente a necessidade de serem tomadas medidas para garantir a sustentabilidade a longo prazo. Para tal, o setor da construção pode se integrar no modelo de economia circular, que enfatiza a política dos 3Rs, ou seja, “reduzir-reciclar-reutilizar”. A

incorporação de RCD no modelo de economia circular ainda está no começo (OZCELIKCI; SAHMARAN.2023).

A economia circular (EC) oferece uma oportunidade de reduzir a extração de matérias primas e seus impactos ambientais, por meio de estratégias como redução, reutilização e reciclagem de materiais na produção/processos de distribuição e consumo (KIRCHHERR *et al.*, 2017).

Uma economia circular dentro da construção civil é de extrema importância. O uso de RCD como agregados no concreto trata-se de um processo de reaproveitamento dentro do conceito de EC. Tal circunstância, pode ser explicado pelo fato do ciclo do resíduo da construção civil usado no concreto se fechar, ele não volta de forma a impactar a natureza. No entanto, a EC é muito difícil e complexa de se aplicar, como os pesquisadores MUNARO e TAVARES (2021) mostraram em seu trabalho:

“A construção civil exerce pressão aos recursos naturais. A transição para um sistema circular de produção e consumo é crucial para reduzir os impactos ambientais do setor. Entretanto, a falta de compreensão dos princípios da economia circular (EC) e a complexidade da sua cadeia de valor dificultam essa transição.”

5. TIPOS DE RCD E SUAS CARCATERÍSTICAS.

Estudos mostram que o agregado proveniente de resíduos da construção e demolição tem maior capacidade de absorver a água livre presente na argamassa do que os agregados naturais (GARG; SHRIVASTAVA.2023).

5.1 Agregado reciclado graúdo

Salgado *et al.* (2022) observou que a forma dos grãos do agregado graúdo influencia diretamente na qualidade do concreto, pois altera sua trabalhabilidade e, conseqüentemente, sua resistência mecânica. Os grãos irregulares, alongados e lamelares têm uma superfície específica maior (NEDELJKOVIĆ *et.al.*, 2021). Eles podem ficar presos entre as barras de aço do concreto armado, resultando em um preenchimento irregular das formas e na formação de nichos de concretagem, fenômeno altamente prejudicial ao desempenho dos elementos estruturais de concreto (KIM *et.al.*, 2022). Fato que mostra que quanto maior o refino e o preparo do agregado reciclado melhora o resultado do uso dele em concretos e argamassas (MASLEHUDDIN *et.al.*, 2022).

A Tabela 1 mostra os resultados de ensaios físicos de AR graúdos de acordo com diversas fontes. Verifica-se que, em geral, o agregado tem alto nível de absorção de água, tendo uma média de 6,98 %. Esses agregados são relativamente menos densos (1000 a 2000 Kg/m³) se comparados com os agregados graúdos naturais (STARLING *et.al.*, 2017). No entanto, comparando aos resultados laboratoriais de Ortorlan *et. al.* (2023) de peso específico os agregados reciclados grossos estão abaixo do valor da brita natural de 2810 Kg/m³. Além disso, eles possuem um alto desgaste abrasão, variando com a origem do AR, no entanto a minoria dos ARs avaliados apresentou valor igual ou maior que 50% de desgaste, o que invalida o seu uso do agregado em concreto de acordo com a NBR 16974 (ABNT, 2021).

Já a Tabela 2, mostra que os agregados reciclados (AR) graúdos são compostos predominantemente por concretos e argamassas, seguidos de alvenaria e argila e solo, respectivamente. Pode-se observar também, que os teores de vidros e materiais betuminosos são significativos. Fontes são os diferentes locais em que

amostras de agregado reciclado foram retiradas ou diferentes origens desse agregado, como por exemplo agregado reciclado proveniente apenas de cerâmica.

Tabela 1: Propriedades físicas dos AR graúdos

Autor	Fonte	Absorção (%)	Densidade aparente (kg/m ³)	Peso específico (Kg/m ³)	Módulo de Finura	Índice de esmagamento (%)	Porosidade (%)	Índice de impacto (%)	Índice de forma (%)	Desgaste Abrasão (%)
A	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	8,6	1095	-	-	-	-	-	24	52
	3	8,4	1236	-	-	-	-	-	24	46
	4	9,9	1288	-	-	-	-	-	14	44
	5	6,4	1261	-	-	-	-	-	25	39
	6	5,5	1285	-	-	-	-	-	21	43
B	CRA	3,5	2500	-	-	-	-	-	16,5	21,5
C	A	6,25	2420	-	-	-	-	-	-	-
D	H	1,53	2360	2600	-	8,9	-	-	-	-
E	I	5,01	2400	-	-	-	-	-	--	34
F	C	5,4	2557	-	7,15	-	-	-	-	34,28
G	J	4	2680	-	3,2	-	-	-	-	27,67
H	CRA	4,15	2410	-	-	-	-	-	-	37
I	Tipo	3,63	-	2520	-	-	-	-	-	-
J	1	3,98	2579	-	-	22,8	-	-	-	-
	2	-	-	1950	-	28,8	-	53,5	-	60
	3	-	-	1920	--	26,82	-	23,18	-	43,64
	RUC	-	-	1820	-	24,86	-	23,64	-	51,48
K	RCC	5,4	-	2400	-	23,74	-	-	-	28,69
	RBC	6,43	-	2250	-	-	-	-	-	-
L	Tipo 0	1,59	-	2440	-	-	-	-	-	-
	Tipo 1	7,7	2360	2350	1,21	-	20	-	-	-
	Tipo 2	5,5	-	-	-	-	7,8	-	-	-
M	MRA30	5,7	-	-	-	-	8,2	-	-	-
N	5-10mm	6,64	2510	2510	-	-	-	-	-	-
	10-16mm	4,68	2558	2560	-	-	-	-	15,74	--
	10-20mm	4,31	2600	2600	-	-	-	--	-	-
	5-10mm	5,11	2535	2540	-	-	-	-	-	-
	10-16mm	3,77	2576	2580	-	-	-	-	-	-
	10-20mm	3,58	2608	2610	-	-	-	-	13,64	-
O	RA	2,98	980	2490	6,84	-	7,94	-	-	-
	RCA-1	6,56	2640	2400	-	-	-	-	-	-
	RCA-2	8,65	2630	2330	-	-	-	-	-	-
	RCA-3	5,56	2650	2440	-	-	-	-	-	-

Fontes: [A] Bravo *et al.* (2015); [B] Revilla *et al.* (2020); [C] Zergadyo. (2022); [D] Abera *et al.* (2022); [E] Fonteboa *et al.* (2022); [F] Sajan *et al.* (2022); [G] Carro-Lopez *et al.* (2015); [H] Amhed *et al.* (2020); [I] Chen *et al.* (2022); [J] Abera *et al.* (2022); [K] Kumar *et al.* (2022); [L] Fernando *et al.* (2022); [M] Shmlis *et al.* (2022); [N] Tang *et al.* (2023); [O] Ortolan *et al.* (2023).

Tabela 2: Composição de materiais de AR grossos (%)

Autor	Fonte	Concretos, argamassas	Alvenaria e argila	Solo	Papel	Plástico	Asfalto	Gesso	Concreto	Metais	Vidro	Materiais Betuminosos	Argilas e materiais finos	Outros
A	U 1	70,8	28,6	-	-	-	-	-	-	-	0,5	0	-	0,1
	U 2	68,1	28,6	-	-	-	-	-	-	-	2,1	0	-	0,2
	U 3	85,6	4,2	-	-	-	-	-	-	-	10,2	0	-	0
	U 4	79,8	11,1	-	-	-	-	-	-	-	1	6,2	-	2
	U 5	79,9	17,1	-	-	-	-	-	-	-	0,2	2,8	-	0
	U 6	83,7	0,9	-	-	-	-	-	-	-	15,4	0	-	0
	U 7	75,2	11,6	-	-	-	-	-	-	-	1	10,5	-	1,7
	U 8	68,8	26,5	-	-	-	-	-	-	-	3,4	1	-	0,3
B	H	61,4	2,7	-	-	-	5	0,2	-	-	-	-	-	-
C	I	61,46	-	-	0,07	0,07	10,37	0,22	-	-	-	-	0,3	-
D	1,2,3	-	31	36	-	-	-	-	23	5	-	2	-	-

Fontes: [A] Bravo *et al.* (2015); [B] Fonteboa *et al.* (2016); [C] Abera *et al.* (2022); [D] Abera *et al.* (2022).

5.2 Agregado reciclado miúdo

Segundo Bravo *et al.* (2015) os ARs finos possuem porcentagens elevadas de concretos e argamassas, sendo a maior parte composta por esses materiais, que são seguidos de argila e alvenaria, vidro e materiais betuminosos (Tabela 3).

Tabela 3: Composição de materiais em ARs finos (%)

Autor	Fonte	Concretos, argamassas	Alvenaria e argila	Vidro	Materiais Betuminosos	Outros
A	Usina 1	83,7	0,9	15,4	0	0
	Usina 2	75,2	11,6	1	10,5	1,7
	Usina 3	68,8	26,5	3,4	1	0,3

Fontes: [A] Bravo *et al.* (2015).

A composição química dos Ars finos de diferentes fontes pode ser visualizada na Tabela 4. Em todas as amostras o teor de sílica (SiO₂) foi relativamente alto, o que é bom já que o composto possui excelente resistência a intempéries e é altamente presente na areia natural (METHA; MONTEIRO; 2014). Os compostos encontrados em menores proporções nas amostras foram o óxido de manganês (MnO), trióxido de enxofre (SO₃) e dióxido de titânio (TiO₂).

Tabela 4: Composição química de ARs finos (%)

Autor	Fonte	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	CO ₂	SO ₃	LEI	Ca(OH) ₂	CaCO ₃
A	CSW1	15,6	3,42	3,11	0,87	0,23	0,17	<0,1	0,36	0,13	28,67	0,97	29,33	4,54	55,05
	CSW2	21,6	5,25	2,28	1,66	0,28	0,16	<0,1	0,71	0,17	17,85	1,3	23,5	5,11	32,67
	CSW3	41,5	9,42	2,87	1,35	0,33	0,18	1,75	1,38	0,18	8,03	1,07	12,28	4,85	16,49
B	RCON	23,81	4,16	1,96	8,41	0,2	-	0,6	0,67	0,08	-	-	29,6	-	-
	RTIJ	60,31	15,61	7,72	3,05	0,88	-	0,56	4,48	0,11	-	-	0,41	-	-
	RTEL	61,22	10,33	1,01	17,63	0,46	-	0,27	0,75	0,01	-	-	0,3	-	-
C	FRA-1	34,8	4,36	3,45	4,46	-	-	0,19	-	-	-	1,32	22	-	-
	FRA-2	56,9	8,76	4,01	1,5	-	-	1,16	-	-	-	0,85	9,76	-	-
	FRA-3	56	8,88	4,23	1,51	-	-	1,03	-	-	-	0,72	8,84	-	-

Fontes: [A] Santos *et al.* (2021); [B] Mahmoodi *et al.* (2023); [C] Ozcelikci *et al.* (2023).

Segundo Sosa *et al.* (2023), o que mais diferencia o agregado fino de concreto reciclado do agregado fino natural é a pasta de cimento endurecida aderida ao agregado reciclado. Por causa disso, a absorção de água e a porosidade são maiores, e a densidade e a solidez são menores em agregados finos reciclados.

A Tabela 5, mostra as propriedades físicas de agregados reciclados miúdos de diversas fontes. Com ela pode-se perceber que a absorção de ARs miúdos é um pouco maior ao comparada aos valores de ARs graúdos. Em geral, os valores de densidade aparente e peso específico deram resultados próximos ao valor esperado de uma areia natural de 2620 Kg/m³ (Sosa *et al.*, 2023). Os módulos de finura apresentados estão dentro dos valores de 2,20 e 2,90 considerados ótimos para agregados finos segundo a norma NBR 7211(2022).

Nassar *et al.* (2012) mostram, em sua pesquisa, que a quantidade de argamassa aderida sobre o agregado graúdo reciclado é reduzida no início do processamento mecânico. No entanto, à medida que se esfarela gradualmente, a argamassa de cimento acumula-se em AR de pequena dimensão (GOKCE *et al.*, 2011). Esta é também a razão pela qual a densidade do agregado miúdo reciclado é geralmente menor do que a do agregado graúdo reciclado. Estudos mostraram que

argamassa é responsável pelo aumento dos poros na estrutura do concreto, chegando a aumento a absorção dele de 2,3 a 4,6 vezes a mais do que a do convencional (SURYAWANSHI *et al.*, 2015). Algumas pesquisas mostram que o teor de sulfato no AR é maior do que no AN devido à presença de sulfato na argamassa envelhecida aderida, fato que pode levar ao maior desgaste a brasão, pois excesso dessa substância pode levar a uma expansão do concreto (JUAN *et al.*, 2009).

Tabela 5: Propriedades físicas dos AR finos

Autor	Fonte	Absorção (%)	Peso específico (Kg/m ³)	Densidade aparente (Kg/m ³)	Módulo de Finura	Área de superfície específica (m ² /g)	Volume de Poro (m ³ /g)	Diâmetro de poro (nm)	Índice de vazios (%)	Índice de forma (%)
A	Usina 1	12,9	2110	-	-	-	-	-	-	14
	Usina 2	10,1	2070	-	-	-	-	-	-	25
	Usina 3	10,4	2060	-	-	-	-	-	--	21
B	CSW1	-	2430	-	-	21	0,14	4	-	-
	CSW2	-	2540	-	-	27,9	0,18	12,9	-	-
	CSW3	-	2580	-	-	23,8	0,14	12,9	-	-
C	FRA	7,36	2370	-	-	-	-	-	-	-
D	-	4,84	-	2250	2,66	-	-	-	36,38	-
E	-	13,2	-	2410	-	-	-	-	-	-
E	-	4,84	-	2450	2,69	-	-	-	-	-
G	ARF	4,6	2490	-	-	-	-	-	-	-
H	RCON	-	2710	-	-	1,18	-	-	-	-
	RTIJ	-	2690	-	-	0,94	-	-	-	-
	RTELH A	-	2870	-	-	1,28	-	-	-	-
I	FRA-1	11,8	2260	2620	-	-	-	-	-	-
	FRA-2	12,4	2170	2600	-	-	-	-	-	-
	FRA-3	11,4	2280	2560	-	-	-	-	-	-

Fontes: [A] Bravo *et al.* (2015); [B] Santos *et al.* (2021); [C] Cuesta *et al.* (2020); [D] Sajan *et al.* (2022); [E] Ahmed *et al.* (2020); [F] Sajan *et al.* (2022); [G] Sosa *et al.* (2023); [H] Mahmoodi *et al.* (2023); [I] Ozcelikci, Sahmaran (2023).

6. USO E APLICAÇÕES DE AGREGADOS RECICLADOS

Existem vários estudos e pesquisas acerca do uso de agregados reciclados a partir de resíduos da construção civil. Nos itens a seguir serão explicadas algumas dessas aplicações.

6.1 Agregado reciclado proveniente de cerâmicas

Análises microscópicas da estrutura de agregados cerâmicos mostram que os grãos de cerâmica triturada são porosos e possuem alta absorvibilidade. O tamanho desses poros significa que a pasta pode penetrar no agregado durante o processo de mistura (TORGAL *et al.*, 2010). O resultado do dimensionamento de concretos contendo agregados cerâmicos por métodos tradicionais são compostos em que a quantidade de pasta é muito baixa em relação ao agregado e a pasta de cimento não preenche todos os vazios entre os grãos (ZEGARDLO, 2022). No entanto, os resultados do estudo de Zegardlo (2022) comprovaram o uso apenas de agregados cerâmicos brancos na composição de concretos que precisam resistir a altas temperaturas, eficaz.

6.2 Agregado reciclado proveniente de concreto

Este material é obtido pela britagem de elementos de concreto rejeitados, geralmente da indústria de pré-moldados e resíduos de demolição. Muitas das vezes não é possível separar somente esse tipo de agregado, já que pode conter argamassa aderida, cimento e argamassa alterados na fração fina, sendo provável também a presença de alguns contaminantes (KUMAR *et al.*, 2022).

Em sua pesquisa, Gebremariam *et al.* (2023), mostraram que o concreto com AR proveniente apenas de concreto depende muito da resistência do concreto original. Os pesquisadores fizeram concretos puros nas resistências iniciais de 20, 25, 30, 35 e 45 MPa e após 28 dias britaram e fabricaram concretos com ARS de cada resistência, respectivamente. Concluíram que quanto maior a resistência do concreto original, menor a absorção de água, menor desgaste abrasão, menor os valores de índice de esmagamento e impacto e menos poroso o concreto com AR. Eles

observaram que quando a resistência do concreto original é mais baixa pior é a adesão entre a argamassa e os agregados empregados.

6.3 Concreto feito a partir de Agregado Reciclado Misto (ARM)

Em sua pesquisa, Bai *et al.* (2020) verificou que concretos com AR necessitam de maior teor de cimento para atingir a resistência à compressão de um concreto convencional. Os pesquisadores Gomes (2014) e Zong (2009) descobriram que a utilização de AR em concreto compromete seu desempenho mecânico e aumenta sua permeabilidade. Ambos, comprovaram que ao se aumentar as proporções de substituição de AR no lugar de agregado convencional ocorre quedas na resistência do concreto. De acordo com Robalo *et al.* (2021), a taxa de substituição gradual de AR de 43% para 80% resultou em diminuições na resistência à compressão entre 28% e 46%, resistência à tração entre 6% e 33% e resistência à flexão entre 17% e 34 %.

A maioria das pesquisas feitas, concluiu que concreto feito a partir de AR tem uma perda significativa no módulo de elasticidade, podendo essa diminuição variar de 18% a 40% em relação ao módulo de elasticidade do concreto convencional (KOU *et al.* 2004). Oliveira *et al.* (2004) concluíram que quando os AR contêm material cerâmico, a perda no módulo de elasticidade é maior, devido à menor densidade de partículas desse material.

Estudos mostram a maior sensibilidade da resistência à tração de rachadura ao se adicionar teores de AR finos médios (SILVA *et al.*, 2019). Também foi observada a redução significativa da resistência à tração ao adicionar teores a partir de 50% de AR finos. Ainda segundo a autora, a partir desse valor a diminuição de resistência à tração é maior do que a diminuição da resistência à compressão.

Portanto, embora a tecnologia do concreto de agregado graúdo reciclado possa reaproveitar o concreto residual e tenha as vantagens de promover o desenvolvimento social sustentável e o equilíbrio ecológico do meio ambiente, o agregado graúdo reciclado é envolvido com argamassa envelhecida, resultando em alta absorção de água e má interface de adesão (KIM *et al.*, 2022). Portanto, os índices mecânicos e de durabilidade do concreto com AR são inferiores aos do concreto com agregado natural graúdo, o que restringirá a aplicação e o desenvolvimento do concreto reciclado na prática da engenharia (MENG *et al.*, 2021).

O concreto convencional é um compósito bifásico com uma zona de transição interfacial (ZIT) entre o agregado e a matriz de cimento. A ZIT serve de ponte entre o agregado e a matriz da argamassa (ZHANG *et al.*, 2022). Além disso, quando os componentes individuais têm alta rigidez, a rigidez do concreto pode ser baixa por causa dos vazios e microfissuras na ZIT, que não permitem a transferência de tensões (KISKU *et al.*, 2017). O concreto feito com agregado reciclado difere do concreto convencional pela presença de duas ZITs: uma velha, entre o agregado graúdo convencional e a argamassa aderida (velha); e uma nova, entre argamassa aderida (antiga) e matriz cimentícia nova. Portanto, neste caso, a microestrutura do concreto com agregado reciclado é muito mais complicada do que o concreto convencional (XIAO *et al.*, 2013).

6.4 Concreto de autoadensável feito a partir de Agregado Reciclado (AR)

Recentemente, o uso de resíduos foi estendido ao concreto autoadensável. A principal característica deste tipo de concreto é sua alta fluidez, que possibilita sua colocação sem vibração (LOPEZ *et al.*, 2022). Podendo ser definido também como um tipo especial de concreto capaz de ser adensado pela ação de seu peso, que pode se depositar nas seções altamente armadas e profundas, preenchendo as fôrmas e corre entre estruturas de difícil acesso ou moldes complexos (BURON *et al.*, 2006).

Este comportamento é alcançado através do uso de grandes quantidades de superplastificantes, cuja quantidade deve ser cuidadosamente escolhida para obter um equilíbrio adequado entre todas as propriedades frescas do concreto autoadensável, bem como uma alta relação a/c. A alta proporção de agregado miúdo em comparação com agregado graúdo também é importante no projeto da mistura CAA (LOPEZ *et al.* 2022), sendo que o concreto autoadensável, uma vez endurecido, denso e homogêneo, possui as mesmas propriedades de engenharia e durabilidade do concreto vibrado tradicional (NAIR *et al.*, 2020)

Autores como Verian, *et al.* (2018) mostraram que um concreto atinge maior autocompactibilidade ao se colocar na mistura AR graúdo, isso ocorre pelo fato de que tanto a hidratação do ligante quanto a absorção de água dos agregados são maximizadas neste tipo de processo. O alto teor de agregado miúdo necessário para atingir a autocompactibilidade nesse tipo de concreto, geralmente, implica em uma menor resistência à tração (REVILLA *et al.*, 2020).

6.5 Concreto com Agregado Reciclado com finalidade estrutural

O uso de resíduos de construção e demolição como agregados para concreto estrutural tem sido muito estudado (XIAO, 2018). Como isso, diversas expressões e métodos têm sido avaliados para o dimensionamento de concreto estrutural utilizando agregados reciclados (TOSIĆ N *et.al.*, 2019).

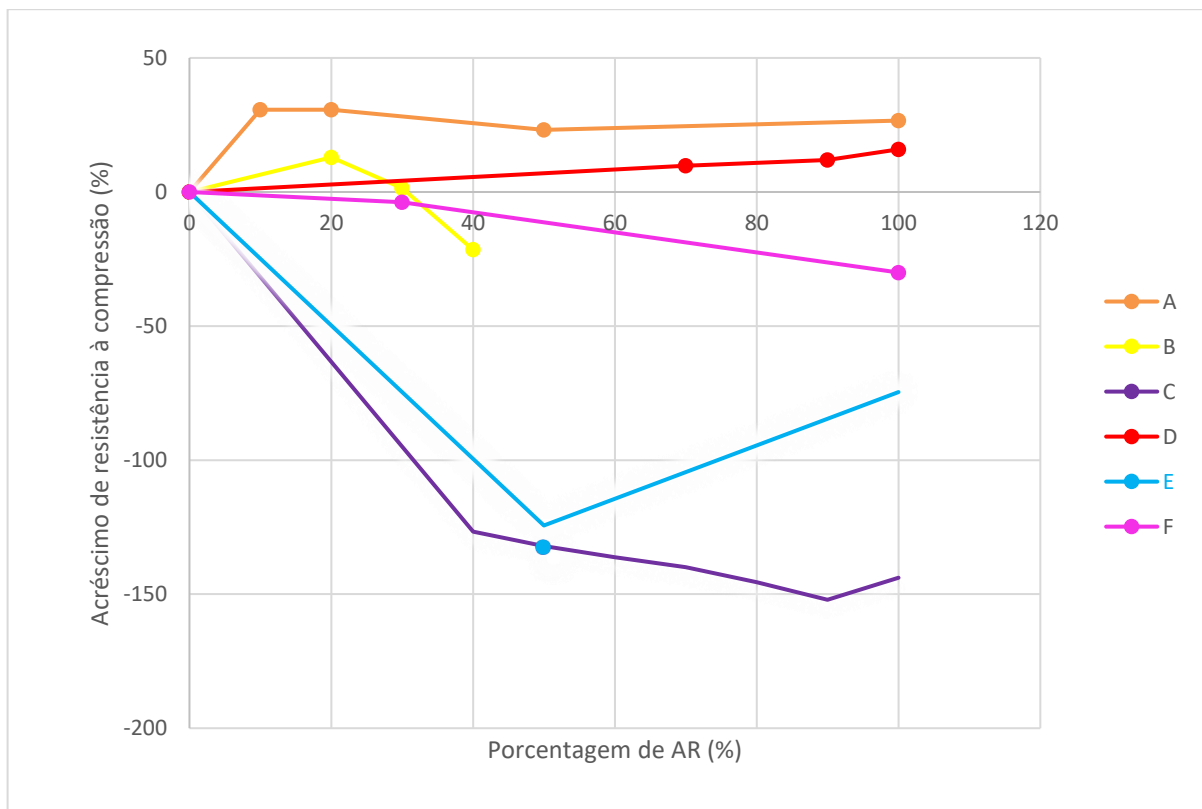
Para promover o uso de concreto reciclado no projeto de elementos estruturais, é necessário determinar os principais fatores que influenciam o desempenho estrutural do concreto e como esses fatores são afetados pelo uso de agregados reciclados. Dentre os fatores analisados estão desempenho, fluência, retração deformações devidos a carregamentos, hidratação, fissuração e envelhecimento do concreto. Em todos os testes os resultados apresentados foram próximos dos valores obtidos com concreto convencional (FONTEBOA *et.al.*, 2022). O uso de AR em concreto estrutural é tão possível que, a **NBR 15116 (2021)** é que admitiu esse tipo de agregado em concretos estruturais. A versão antiga recomendava o uso apenas em concretos **sem função estrutural**. Essa norma especifica que poderá apenas ser usado para elementos estruturais o agregado reciclado proveniente apenas de concreto de classes de agressividade I e II e podendo apenas ser substituído em até 20% do agregado natural.

7. CARACTERÍSTICAS DOS CONCRETOS COM RCD

7.1. Concreto com agregado reciclado graúdo misto

As diversas fontes analisadas (Gráfico 1) mostraram que os ARs graúdos ou mistos podem ser usados em concretos em substituição dos agregados naturais. Foi observado que, apesar da baixa resistência à compressão encontrada nos resultados dos ensaios, muitas pesquisas obtiveram uma baixa perda de resistência ao aumentar a substituição de AN por AR. Uma maior resistência com maior substituição possível depende dos aditivos, fibras usadas, modo de preparo do AR e do concreto. Como exemplo, estão Shmls, *et.al.* (2022) que chegaram a uma resistência de 46,4 MPa usando fibra de aço, superplastificantes (poli-carboxilato), um plastificante (lignossulfonato) e um aditivo capaz de impedir a absorção de água em agregados reciclados. O teor de 40 % parece ser o ideal, sem uso de qualquer aditivos, como mostra o gráfico e o texto de diversos estudiosos, pois a resistência não sofre alterações relevantes.

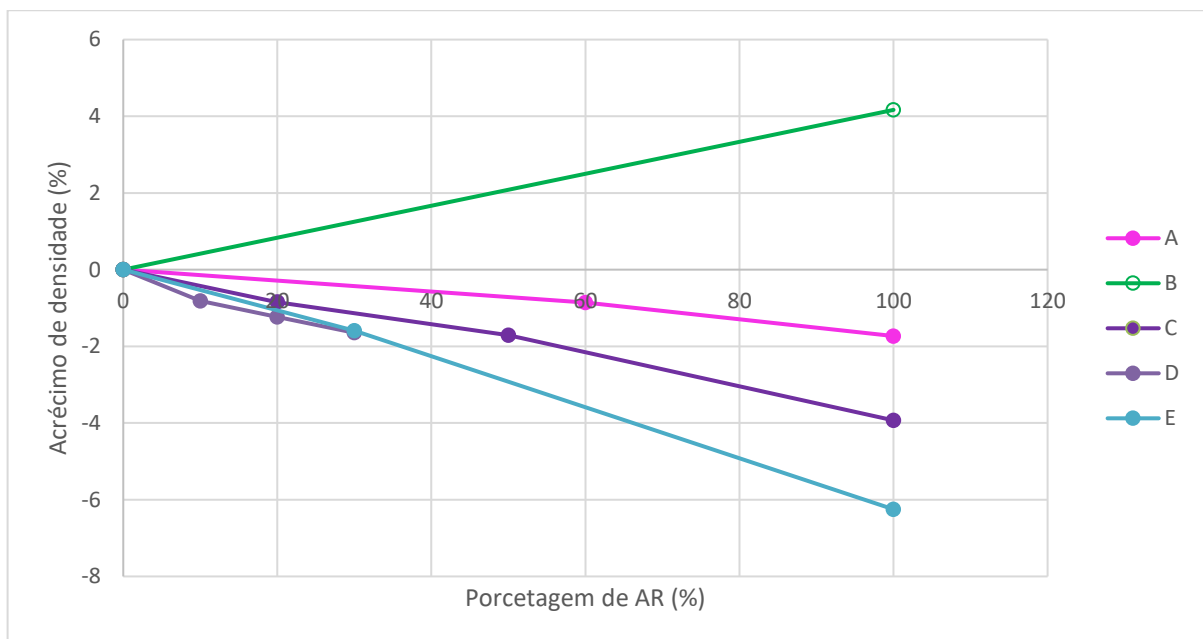
Gráfico 1: Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)



Fontes: [A] Bravo *et al.* (2015); [B] Sajan *et al.* (2022); [C] Abera *et al.* (2022); [D] Ozcelickci *et al.* (2023); [E] Lozano *et al.* (2022); [F] Kumar *et al.* (2020).

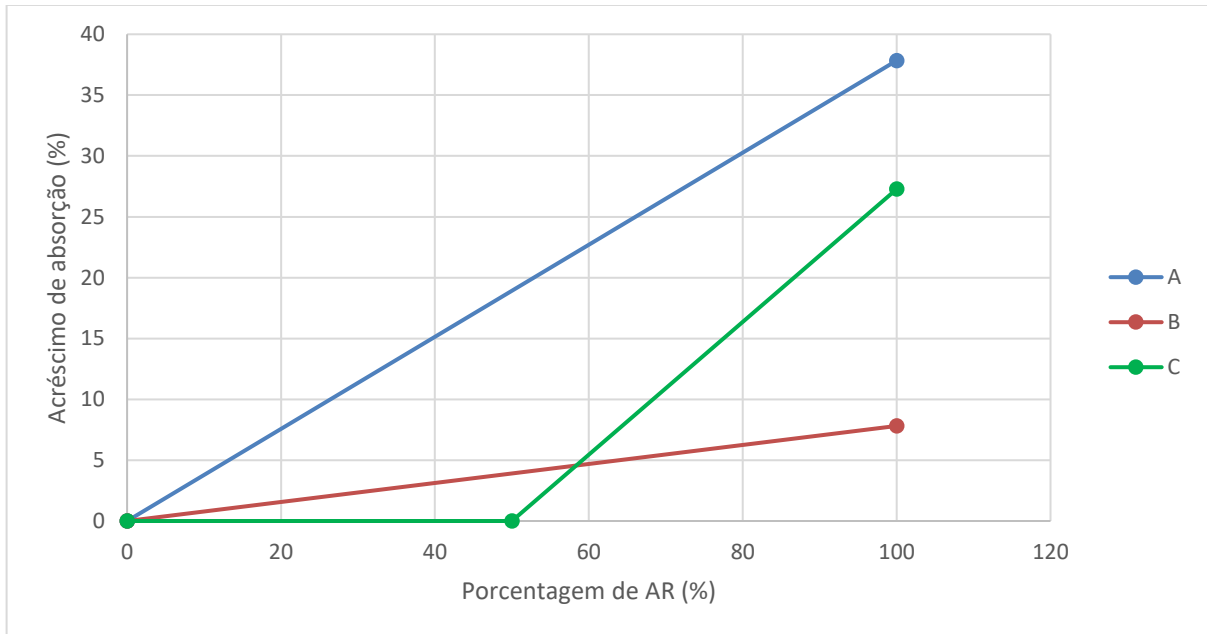
O Gráfico 2 mostra as densidades de acordo com alguns autores. Os concretos com ARs graúdos apresentaram densidades relativamente normais e próximos do valor de 2,4 (g/cm³) do concreto convencional simples. No entanto, pode-se observar que, ao aumentar a quantidade de agregado reciclado, ocorreu uma queda na densidade.

Gráfico 2: Densidade do concreto (g/cm³)



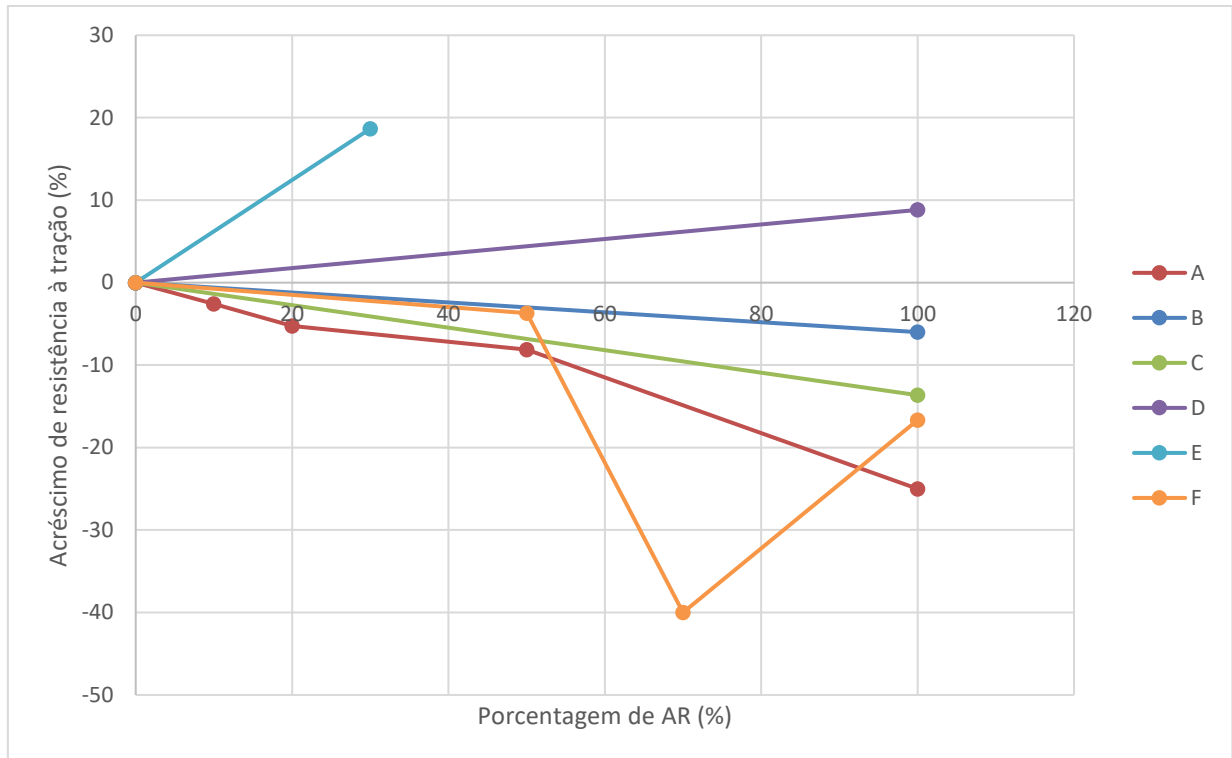
Fontes: [A] Zegardio *et al.* (2022); [B] Lozano *et al.* (2022); [C] Tang *et al.* (2023); [D] Sajan (2022); [E] Fernando *et al.* (2022).

Em todos os casos, em que o ensaio de absorção de água foi realizado, observou-se aumento dessa absorção com o aumento de agregado reciclado. Ao se colocar 100% de AR observou-se aumentos de 37,5% de absorção de água comparado ao concreto convencional (MOHMMED *et al.*, 2021.), aumento de 8,4 % (CUESTA *et al.*, 2020) e aumento de 60,87 % (FONTEBOA *et al.*, 2016). Já em Cuesta *et al.* (2022), observou-se menor aumento de absorção com 100% de substituição ao usar CEM I 52,5 R e dois aditivos superplastificantes nas proporções de 0,5-1,5% em peso de cimento e enchimento de calcário.

Gráfico 3: Absorção de água (%)

Fontes: [A] Fonteboa *et al.* (2016); [B] Cuesta *et al.* (2020); [C] Amin *et al.* (2022).

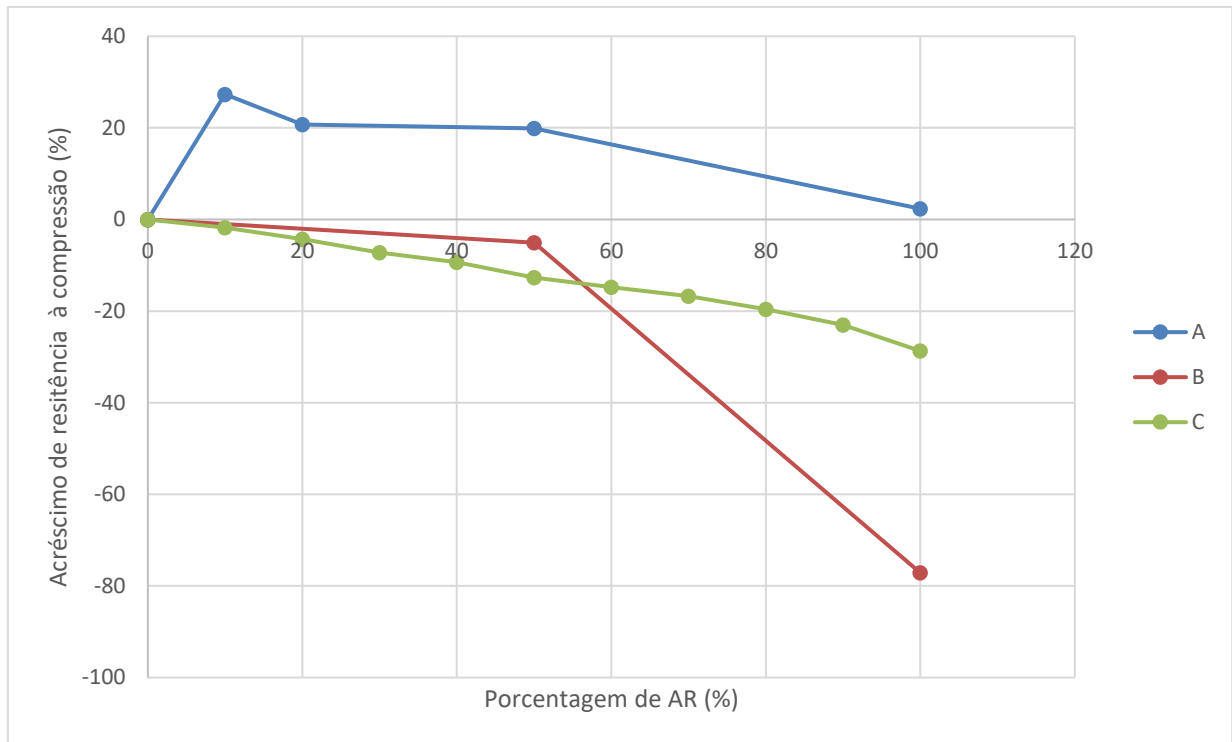
As resistências à tração, conforme os ensaios e amostras, tiveram valores similares aos valores do concreto convencional, como se pode observar pelo Gráfico 4, no entanto, de forma geral, teve-se uma redução de resistência à tração com aumento dos AR.

Gráfico 4: Resistência à tração aos 28 dias (MPa)

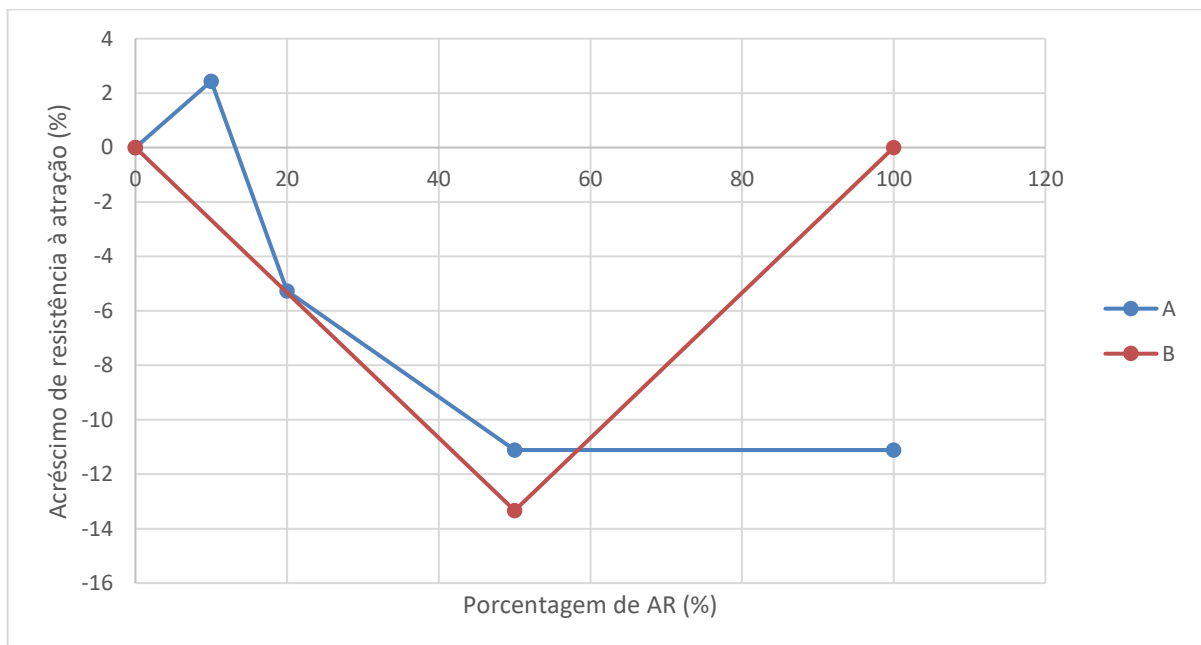
Fontes: [A] Bravo *et al.* (2015); [B] Cuesta *et al.* (2020); [C] Kumar *et al.* (2022); [D] Lozano *et al.* (2022); [E] Shmls *et al.* (2022); [F] Amin *et al.* (2022).

7.2 Concreto com agregado reciclado miúdo

O Concreto com agregado reciclado miúdo, até o momento, foi menos pesquisado do que o concreto com o agregado reciclado graúdo. Entretanto, pode-se dizer que o uso de AR fino também é viável, já que apresenta bons resultados de resistência à compressão e a tração ao comparados com o concreto convencional como mostram os Gráficos 5 e 6. Assim, como no concreto com AR graúdo, tem-se redução de ambas as resistências, tem-se o mesmo com o aumento de AR miúdo na mistura do concreto. Porém, com o agregado reciclado fino, a redução da resistência com o aumento de AR foi maior.

Gráfico 5: Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)

Fontes: [A] Evangelista *et al.* (2014); [B] Cuesta *et al.* (2020); [C] Abera *et al.* (2022).

Gráfico 6: Resistência à tração do concreto aos 28 dias (MPa)

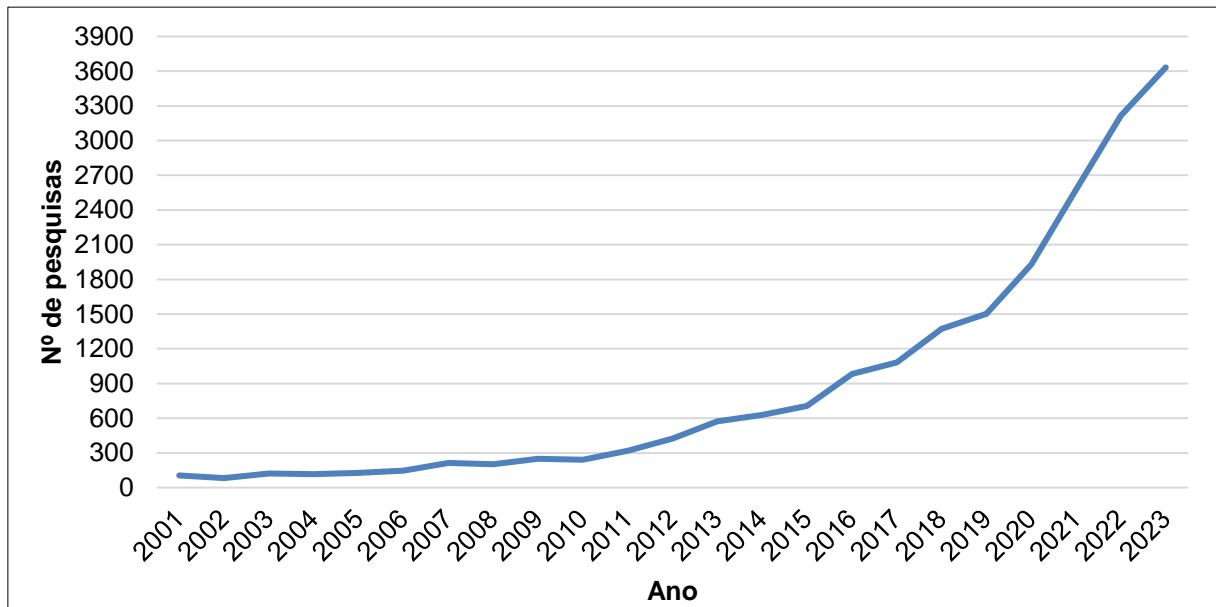
Fontes: [A] Evangelista *et al.* (2014); [B] Cuesta *et al.* (2020).

7.3 Levantamento de pesquisas sobre agregado reciclado no concreto

O gráfico 7 mostra como os números de pesquisas com AR em aplicações no concreto manteve-se constante até o ano de 2012 e começou a crescer de forma

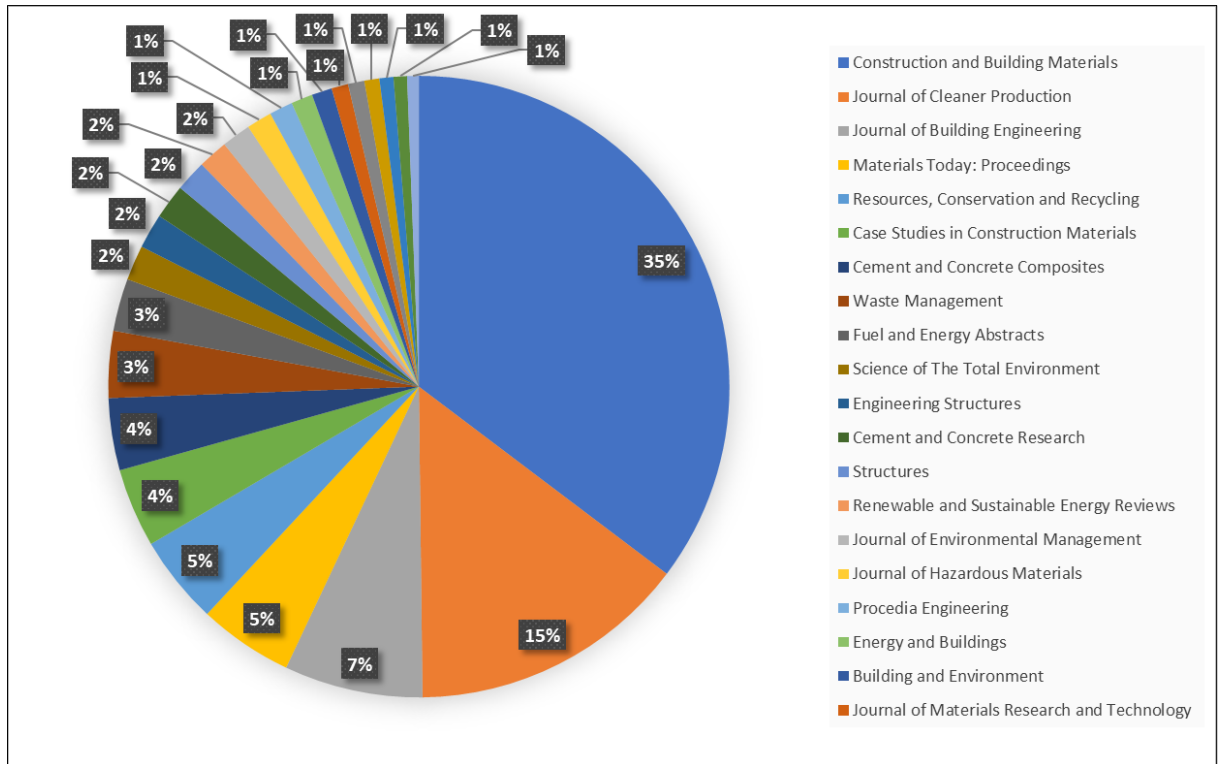
significativa e exponencial a partir de 2013. Logo ainda se mostra como um tema interessante a ser pesquisado.

Gráfico 7: Números de pesquisas sobre uso de AR no concreto ao longo dos anos



O gráfico 8 mostra as fontes de publicações sobre o tema ao longo dos anos, sendo as revistas que mais houve publicações foram a *Construction and Building Materials*, com 35% das publicações e a *Journal of Clear Production* com 15%.

Gráfico 8: Fontes de publicação



8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de AR no concreto vem sendo estudado desde os anos 2000 e já se pode dizer que o AR tanto graúdo quanto miúdo pode ser 100% substituído no lugar da brita e areia natural, tendo como ressalva, que o concreto com agregado reciclado pode ter suas propriedades e características melhoradas e adequadas para cada uso ou aplicação. Pesquisas mostram que a separação dos agregados reciclados por tipo de material pode resultar em concretos com substituições mais altas e apresentam melhor desempenho sem uso de qualquer aditivo. Artigos mostraram também que alguns fatores podem influenciar nas propriedades do agregado reciclado, como o tipo de britagem que o RCD é submetido, a região de recebimento do resíduo, o tipo de preparo do agregado e a triagem do resíduo. 40% parece o percentual ideal, pois apresenta maior desempenho e melhora as propriedades como absorção e porosidade sem o uso de qualquer aditivo. Em geral os agregados reciclados finos (aproximadamente 10%) mostraram ter maior absorção de água ao compará-los com os graúdos (aproximadamente 6%). No concreto só de AR de concreto, foi comprovado que a resistência do concreto original interfere no concreto com AR.

Apenas uma das pesquisas analisadas, avaliou a durabilidade do concreto com AR, sendo que esta avaliação aconteceu ao longo de 3 anos. Há possibilidades de, em pesquisas futuras, avaliar, por exemplo, se a data da demolição interfere nos resultados das características do agregado reciclado e do concreto. Outra proposta é analisar quantas vezes pode-se reutilizar um concreto que já tenha sido usado agregado reciclado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABERA, Y. (SHANKO) A. Performance of concrete materials containing recycled aggregate from construction and demolition waste. **Results in Materials**, v. 14, 1 jun. 2022.
- AHMED, H. et al. Recycled aggregate concrete from large-scale production to sustainable field application. **Construction and Building Materials**, v. 262, 30 nov. 2020.
- AKHTAR, Mohammad Nadeem, et. al. Incorporation of recycled aggregates and sílica fume in concrete: an environmental savior-a systematic review. **Journal of Materials Research and Technology**.2022
- AMIN, M. et al. Influence of recycled aggregates and carbon nanofibres on properties of ultra-high-performance concrete under elevated temperatures. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, 1 jun. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 15114**: Agregados Reciclados de Resíduos Sólidos da Construção Civil –Diretrizes para projetos, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 16974**: Agregado graúdo: Ensaio de Abrasão Los Angeles.2021
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 7211**: Agregados para concretos- Especificações. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 15116**: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2021
- BRAVO, M. et al. Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants. **Journal of Cleaner Production**, v. 99, p. 59–74, 15 jul. 2015.
- BRAVO, Miguel.; Brito, Jorge de.;Pontes, Jorge.;Evangelista, Luís. Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants. **Construction and Building Materials** 2014.
- BRITO, J. de, et. al. Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties, **Mag. Concr. Res.** 2011

- CARRO-LOPEZ D, Gonzalez-Fonteboa B, De Brito J, Martí'nez Abella F, Gonzalez-Taboada I, Silva P. Study of the rheology of self-compacting concrete with fine recycled concrete aggregates. **Construct Build Mater** 2015.
- CARTAXO, G.A.A.; Freitas, I.M.DP.; Zanta, V.M. Análise do gerenciamento de resíduos de gesso no município de salvador-BA.UFBA. **Enegep**.2013
- CHEN, Y. *et al.* Mechanical properties and damage constitutive of recycled aggregate concrete with polyvinyl alcohol fiber under compression and shear. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, 1 dez. 2022.
- COFFETTI, D. *et al.* Pathways towards sustainable concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 154, 1 abr. 2022.
- CORINALDESI, V. Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates, **Construction and Building Materials**. 2010
- CUESTA, V. R. *et al.* Simultaneous addition of slag binder, recycled concrete aggregate and sustainable powders to self-compacting concrete: a synergistic mechanical-property approach. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 18, p. 1886–1908, 1 maio 2022.
- CUESTA, V. R., Skaf M, Faleschini F, Manso JM, Ortega Lopez V. Self-compacting concrete manufactured with recycled concrete aggregate: an overview. **J. Clean Prod.** 2020.
- CUESTA, V.R. *et al.* Using recycled aggregate concrete at a precast-concrete plant: A multi-criteria company-oriented feasibility study. **Journal of Cleaner Production**, v. 373, 1 nov. 2022.
- DING, Y.N., *et al.*, Influence of different fibers on the change of pore pressure of self-consolidating concrete exposed to fire, **Construction and Building Materials**. 2016
- FANG, C. *et al.* Mechanical properties and microscopic characterization of mortar with recycled aggregate from waste road. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, 1 dez. 2022.
- FARIA, Vivian. **Sustentabilidade. Gazeta do povo**, Paraná, 30, setembro de 2019.Disponívelem:<<https://www.gazetadopovo.com.br/haus/sustentabilidade/brasil-pode-reciclar-98-dos-residuos-da-construcao-civil-mas-so-consegue-dar-conta-de-21/>>. Acesso em: 05/09/2023.
- FERNANDO, A. *et al.* **Development** of high strength recycled aggregate concrete-composite effects of fly ash, silica fume and rice husk ash as pozzolans. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 55, n. 7, 1 set. 2022.

- FONTEBOA, Belén González, et . al. Structural recycled concrete: Behaviour under low loading rate. **Construction and Building Materials**. 2011
- FONTEBOA, Belén González, et . al. Time-dependent behaviour of structural concrete made with recycled coarse aggregates. Creep and shrinkage. **Construction and Building Materials**. 2016
- GOKCE, A. *et.al.* Identification of frost-susceptible recycled concrete aggregates for durability of concrete. **Constr. Build. Mater**. 2011
- HAMILTON, Ralpf, et.al. Global status report for buildings and construction. **Global Change**. 2020
- JAGADESH, P.; Juan-Valdés, A.; Guerra-Romero, M.I.; . Mor´ an-Del Pozo, J.; García-Gonzalez, J.; Martínez-García, R.Effect of design parameters on compressive and split tensile strength of self-compacting concrete with recycled aggregate: an overview. **Appl. Sci**. 2021.
- KIM, J. Influence of quality of recycled aggregates on the mechanical properties of recycled aggregate concretes: An overview. **Construction and Building Materials**, 18 abr. 2022.
- KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 127(April), p. 221–232, 2017.
- KISKU, N. *et.al.* A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material, **Construct. Build. Mater**.2017
- KUMAR, S. *et. al.* A review on the properties of natural and recycled coarse aggregates concrete made with different coal ashes. **Cleaner Materials**, 1 set. 2022
- LIU, K.; Alam, M.S. J.; Zhu, J. Zheng, L. Chi, Prediction of carbonation depth for recycled aggregate concrete using ANN hybridized with swarm intelligence algorithms, **Constr. Build. Mater**. 2021.
- LOZANO, Jose A. Ortiz. Structural use of Fiber-Reinforced Self-Compacting Concrete with Recycled Aggregates: Case Study of a Foundation Wall in Spain. **Case Studies in Construction Materials**. Junho. 2022.
- MADUABUCHUKWU NWAKAIRE, C. et al. Utilisation of recycled concrete aggregates for sustainable highway pavement applications; a review. **Construction and Building Materials**. Elsevier Ltd., 28 fev. 2020.
- MAHMOOD, O. ;Siad, H.; Lachemi, M.; Dadsatan, S.; Ahmaran, M.Extensive rheologicaevaluation of geopolymers mortars incorporating maximum amounts of

recycled concrete as precursors and aggregates. **Material and Building Construction**. 2023

MAO, Y.G.; Liu, J.H.; Shi, C.J. Autogenous shrinkage and drying shrinkage of recycled aggregate concrete: a review, **J. Clean**. 2021

MENG, D. et al., A strength-based mix design method for recycled aggregate concrete and consequent durability performance, **Construction Building Materials**. 2021

MENG, T. et al. Effect of brick aggregate on failure process of mixed recycled aggregate concrete via X-CT. **Construction and Building Materials**, v. 327, 11 abr. 2022.

METHA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. **IBRACON**

MOHAMAD, B.K.A.; Ridho Ali; Ngamkhanong, C.; Wu, Y.; Kaewunruen, S. Recycled aggregates concrete compressive strength prediction using artificial neural networks. **Infrastructures**. 2021

MUNARO, M.R; TAVARES, S.F. A economia circular na construção civil: principais barreiras e oportunidades para a transição do setor. **Revista Tecnologia e Sociedade**.2021

NASSAR, R.U.D. *et.al.* Strength and durability of RAC containing milled glass as partial replacement for cement. **Constr. Build. Mater**. 2012

NEDELJKOVIĆ, M. *et.al.* Use of fine recycled concrete aggregates in concrete: A critical review. **Journal of Building Engineering**. 1 jun. 2021.

NEPOMUCENO MCS, Pereira-De-Oliveira LA, Lopes SMR. Methodology for the mix design of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders. **Construct Build Mater** 2014;

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. Bookman. 5ªEdição.2015.

OLIVEIRA, M., Assis, C., Wanderley, A., Study on compressed stress, water absorption and modulus of elasticity of produced concrete made by recycled aggregate. In: Use of Recycled Materials in Buildings and Structures, International RILEM **Conference, Barcelona, Spain**, pp. 636e642. 2004

OLIVEIRA, T. V.; CORDEIRO, L. DE N. P.; BESSA, S. A. L. Experimental study of self-leveling mortars produced with recycled concrete aggregates. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, 1 dez. 2022.

ORTOLAN, T.; Borges, P.; Silvestro, L.; Silva, S.; Possan, E.; Andrade, J. Durability of concrete incorporating recycled coarse aggregates: carbonation and service life

prediction under chloride-induced corrosion. **Construction and Building Materials**.2023

OZCELIKCI, E.; Sahmaran, M. Characterization and value added application of low quality concrete waste based recycled aggregates. **Materials Today: Proceedings**.2023

POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS. Lei nº 12.305. Governo Federal.2 de agosto de 2010

ROBALO, Keila *et. al.* Experimental development of low cement content and recycled construction and demolition waste aggregates concrete. **Construction and Building Materials**. 2021

SAJAN, K. C. *et al.* Mechanical characterization of recycled concrete under various aggregate replacement scenarios. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 7, 1 abr. 2022.

SANTOS, White José dos *et al.* Influence of replacing Portland cement with three different concrete sludge wastes. **Construction and Building Materials**. 2021

SEARA-PAZ, S. *et. al.* Deformation recovery of reinforced concrete beams made with recycled coarse aggregates. **Engineering Structures**, v. 251, 15 jan. 2022.

SHMILLS, M. *et. al.* Multicriteria based optimization of second generation recycled aggregate concrete. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, 1 dez. 2022.

SILVA RV, de Brito J, Dhir RK. Use of recycled aggregates arising from construction and demolition waste in new construction applications. **J Clean Prod** 2019.

SOSA, M.; Etcheverry, J.; Zaccardi, Y.; Zega, C. Mechanical and microstructural properties of mortar with fine recycled aggregates. **Materials Today: Proceedings**.2023

STARLING, *et.al.* *Materias de Construção Civil*. Editora UFMG.2017.4ª Edição.

SURYAWANSHI, S.R, *et.al.* Characterization of recycled aggregate concrete. **Adv. Struct. Eng.** 2015

TAM, Vivian WY.; Soomro, Mahfooz.; Evangelista, Ana Catarina Jorge. **A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017)** (CCW). 2018.

TANG, B.; Meng, F.; Yang, Z.; Sol, Y.;Yuan, L. A comparison study of aggregate carbonation and concrete carbonation for enhancement of recycled aggregate pervious concrete. **Construction and Building Materials**. 2023

- Tošić N, Marinković S, de Brito J. Deflection control for reinforced recycled aggregate concrete beams: Experimental database and extension of the fib Model Code model. **Struct. Concr.** 2019
- VERIAN KP, Ashraf W, Cao Y. Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production. **Resour. Conserv. Recycl.** 2018.
- WANG, D.; Lu, C.; Zhu, Z.; Zhang, Z.; Liu, S.; Ji, Y.; Xing, Z. Mechanical performance of recycled aggregate concrete in green civil engineering: Review. **Case Studies in Construction Materials.** 2023
- WANG, R.; YU, N.; LI, Y. Methods for improving the microstructure of recycled concrete aggregate: A review. **Construction and Building Materials**, 10 maio 2020.
- XIAO J. Recycled aggregate concrete structures. Berlin Heidelberg, Berlin: Springer Verlag; 2018
- XIAO, J. et.al. Properties of interfacial transition zones in recycled aggregate concrete tested by nanoindentation, **Cement Concr. Compos.** 2013
- ZEGARDŁO, B. Heat-resistant concretes containing waste carbon fibers from the sailing industry and recycled ceramic aggregates. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, 1 jun. 2022.
- ZHANG, Hongru, et. al. Influence of the moisture states of aggregate recycled from waste concrete on the performance of the prepared recycled aggregate concrete (RAC) – A review. **Constr.Build.Mater.**2022