



Análise das propriedades mecânicas de concretos contendo substituição parcial e total dos agregados graúdos naturais por reciclados

Analysis of the mechanical properties of concretes with partial and total replacement of natural coarse aggregates by recycled aggregates

Análisis de las propiedades mecánicas de concretos con reemplazo parcial y total de los agregados gruesos naturales por reciclados

Gerardo Alves da Fonseca Junior¹, Juliana Corrêa Trindade Leite², Gabriel de Pinna Mendez³, Assed Naked Haddad⁴, José Augusto Ferreira da Silva⁵, & Bruno Barzellay Ferreira da Costa⁶

^{1,3,5,6} Instituto Federal Fluminense, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental ^{2,6} Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico ^{4,6} Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental Rio de Janeiro

¹ gerardo.junior@gsuite.iff.edu.br ² julianatrindade@macae.ufrj.br ³ gabriel.mendez@iff.edu.br ⁴ assed@poli.ufrj.br
⁵ jasilva@iff.edu.br ⁶ bruno.barzellay@macae.ufrj.br

ARTIGO INFO.

Recebido: 25.09.2025

Aprovado: 03.11.2025

Disponibilizado: 28.11.2025

PALAVRAS-CHAVE: concreto reciclado; agregado graúdo; sustentabilidade.

KEYWORDS: recycled concrete; coarse aggregate; sustainability.

PALABRAS CLAVE: concreto reciclado; agregado grueso; sostenibilidad.

*Autor Correspondente: Costa, B. B. F. da.

RESUMO

Diante do aumento do consumo global de concreto, ocorre o aumento dos impactos ambientais. Necessitando que o setor de construção civil desenvolva uma produção de concreto em atendimento aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Neste contexto, surge a utilização do Resíduo de Construção e Demolição em substituição aos agregados naturais. Logo o objetivo deste estudo foi analisar a resistência à compressão e à tração do concreto produzido com agregado reciclado em comparação ao concreto referência, através de um programa experimental utilizando agregados graúdos reciclados de concreto com diâmetros máximos de 9,5 mm e 19 mm. Para cada granulometria foi produzida dosagens do concreto utilizando taxas de substituição de agregado natural por reciclado de 0%, 30%, 50% e 100%. Os ensaios de resistência revelaram que a resistência à compressão alvo de 25 MPa foi atingida por todas as dosagens, enquanto a resistência à tração atingiu de 8% a 12% do ensaio à compressão. O método estatístico ANOVA verificou que todas as dosagens estudadas apresentaram estatisticamente médias iguais entre si de resistência no período de 28 dias. Demonstrado que o concreto reciclado pode ser promissor para a construção civil, além de atender o ODS nº 12, que é produção e consumo responsáveis.

ABSTRACT

Given the increase in global concrete consumption, environmental impacts have also intensified, requiring the construction sector to develop concrete production in line with the Sustainable Development Goals (SDGs). In this context, the use of Construction and Demolition Waste (CDW) as a replacement for natural aggregates emerges as an alternative. Therefore, the objective of this study was to

analyze the compressive and tensile strength of concrete produced with recycled aggregate in comparison to reference concrete, through an experimental program using recycled concrete coarse aggregates with maximum diameters of 9.5 mm and 19 mm. For each granulometry, concrete mixtures were produced with natural aggregate replacement ratios of 0%, 30%, 50%, and 100%. Strength tests revealed that the target compressive strength of 25 MPa was achieved by all mixtures, while tensile strength reached between 8% and 12% of compressive test values. The ANOVA statistical method verified that all studied mixtures presented statistically equal mean strengths at 28 days. These results demonstrate that recycled aggregate concrete can be a promising material for the construction sector, while also contributing to SDG 12: Responsible Consumption and Production.

RESUMEN

Ante el aumento del consumo global de hormigón, se produce un incremento de los impactos ambientales, lo que hace necesario que el sector de la construcción desarrolle una producción de hormigón en conformidad con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). En este contexto, surge la utilización de los Residuos de Construcción y Demolición en sustitución de los agregados naturales. El objetivo de este estudio fue analizar la resistencia a la compresión y a la tracción del hormigón producido con agregado reciclado en comparación con el hormigón de referencia, mediante un programa experimental que utilizó agregados gruesos reciclados de hormigón con diámetros máximos de 9,5 mm y 19 mm. Para cada granulometría se produjeron dosificaciones de hormigón con tasas de sustitución del agregado natural por reciclado de 0%, 30%, 50% y 100%. Los ensayos de resistencia revelaron que la resistencia a la compresión objetivo de 25 MPa fue alcanzada por todas las dosificaciones, mientras que la resistencia a la tracción se situó entre el 8% y el 12% de la obtenida en el ensayo de compresión. El método estadístico ANOVA verificó que todas las dosificaciones estudiadas presentaron, estadísticamente, medias iguales de resistencia en el período de 28 días. Esto demuestra que el hormigón reciclado puede ser una alternativa prometedora para la construcción civil, además de contribuir al cumplimiento del ODS nº 12, que se refiere a la producción y consumo responsables.



INTRODUÇÃO

A sociedade com finalidade de atingir as premissas de sustentabilidade, busca soluções de consumo e produção sustentável para minimizar a extração de recursos naturais e as emissões de gases responsáveis pelo efeito estufa (Smitha & Thomas, 2021). Um setor que é um desafio para as políticas de sustentabilidade, é o ramo de construção, sendo o mesmo responsável por 50% consumo de recursos minerais, 30% consumo de água, emissor de 35% dos gases estufas, e gerador de 1/3 dos resíduos do mundo (Palumbo et al., 2020).

Atualmente o concreto é o produto artificial mais produzido e consumido no mundo de acordo com (Ashby, 2012; Peng et al., 2020), onde sua etapa de produção é conhecida por utilizar em torno de 30% de recursos naturais, além de provocar a emissão de 8% dos gases do efeito estufa (Gholampour et al., 2022; Verma et al., 2022). O concreto tem sua massa formada em torno de 75% por agregados graúdos e miúdos de acordo com (Contreras-Llanes et al., 2021; Zhang et al., 2020), e o restante constituído de cimento e água, sendo que entre os agregados, o agregado graúdo é responsável por mais de 50% da massa de concreto (Cerchione et al., 2023; Góra & Piasta, 2020).

Por meio do desenvolvimento social e econômico, principalmente em países em desenvolvimento, é estimada o aumento da produção de concreto no mundo de acordo com (Imbabi et al., 2012; Schneider et al., 2011), sendo que em 2020 essa estimativa já estava em 30 bilhões de tonelada, ocasionando a extração de 19,4 bilhões de toneladas de agregados (Miller et al., 2018; Monteiro et al., 2017). O aumento da produção de concreto consequentemente também ocasiona efeitos negativos, tais como, alterações climáticas e degradação ambiental dos locais de onde são extraídos os recursos minerais (Danish et al., 2019; Wesseling & Vooren, 2017).

Outro efeito negativo observado conforme o aumento da produção de concreto, é o aumento da geração de resíduos de construção e demolições (RCD), onde estima-se que 95% dos RCD são enviados para aterros sanitários ou depositados de forma irregulares, sendo que 90% poderiam passar por processo de reciclagem ou reaproveitamento (Ferreira et al., 2019; Zhao, 2021).

Diante do cenário mencionado, na qual a sociedade buscar minimizar a extração de minerais, a poluição ambiental, a degradação de ambientes e a geração de RCD, surgiu o conceito de concreto reciclado, que utiliza agregados reciclados em substituição parcial ou total dos agregados naturais, fazendo com que a produção de concreto esteja alinhada com as diretrizes e os conceitos de sustentabilidade (Peng et al., 2018; Petticrew & Roberts, 2006).

Devido o agregado graúdo natural ser responsável por maior parte da massa de concreto, e o agregado graúdo reciclado ser considerado o material mais promissor para substituição dos agregados naturais de acordo com Song et al. (2019), este estudo tem como finalidade analisar as propriedades mecânicas de concretos utilizando diferentes taxas de substituição de agregados graúdos naturais por reciclados, comparando os resultados obtidos entre si com o auxílio do método estatístico ANOVA e verificando assim, a possibilidade do concreto reciclado deste estudo ser utilizado em estruturas de engenharia, além de estar em conformidade com as metas de desenvolvimento sustentável no setor da construção civil.

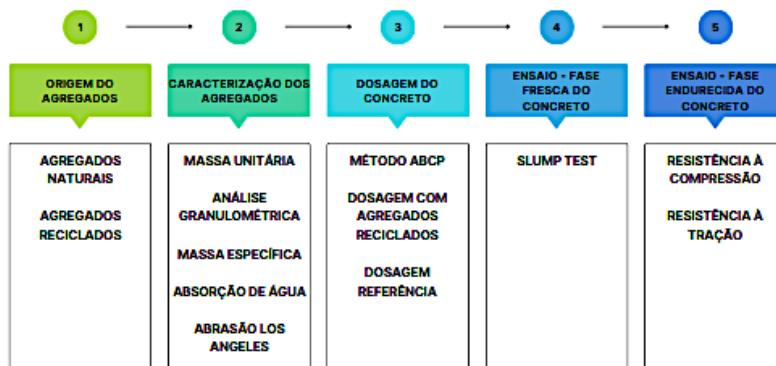
Para atingir este objetivo foi realizado um programa experimental onde ocorreu a caracterização dos agregados reciclados, tais como, análise granulométrica, massa específica, massa unitária, absorção de água, ensaio de abrasão Los Angeles e a quantidade de argamassa aderida em comparação aos agregados naturais. As dosagens de concreto foram realizadas por meio do método ABCP, contendo as taxas de substituição de 0%, 30%, 50% e 100% dos agregados graúdos naturais por reciclado. Diferente de outros estudos, neste trabalho utilizou-se brita com granulometria 0 e 1, onde os ensaios de resistência à compressão aconteceram nos períodos de 7, 14 e 28 dias e os de tração indireta no período de 28 dias.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Com objetivo de analisar as principais propriedades mecânicas dos concretos contendo agregados reciclados, neste capítulo descreve-se os materiais utilizados e as etapas realizadas no estudo, através de uma metodologia baseada de forma quantitativa, aplicada, descritiva e experimental denominada de Programa Experimental, que foi realizado no laboratório de engenharia civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Macaé, RJ (Figura 1).

Figura 1. Etapas do programa experimental

PROGRAMA EXPERIMENTAL



Fonte: Autores.

MATERIAL

Na etapa de produção, as dosagens dos concretos foram realizadas com cimento Portland CIPPII-32RS, de acordo com (Associação brasileira de normas técnicas [ABNT] NBR 16697, 2018). O agregado miúdo natural utilizado na pesquisa é uma areia do tipo média de acordo com a ABNT NBR 16697 (2018), composta de rochas e minerais, principalmente o quartzo (dióxido de silício, SiO₂). Os agregados graúdos naturais são originados de rochas como o granito, onde os grãos variam de 4,75 mm a 9,5 mm (brita 0) e de 9,5 mm a 19 mm (brita 1). Os agregados graúdos reciclados foram obtidos através de resíduos exclusivamente de concreto, originados de 500 unidades de corpo de prova de concreto com fck desconhecido, em forma de cilindros com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm, já ensaiados em empresas especializadas em fabricação de concreto. Os espécimes passaram por processo de britagem e peneiramento para se obterem grãos com granulometria padrão de brita 0 e 1.

O Processo de britagem foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (LECIV/UENF), através da fragmentação inicial dos corpos de prova em uma prensa elétrica, e em seguida foi utilizada uma marreta com a finalidade de reduzir os fragmentos de forma que eles fossem compatíveis com a dimensão do coletor do britador (Figura 2). O britador utilizado foi do tipo mandíbula, o mesmo utilizado por Skocek et al. (2024), que possui mecanismo de funcionamento à compressão, utilizando regulagens para obtenção da granulometria padrão da brita 0 e 1.



CC BY
DEED
Attribution 4.0
International

Figura 2. Processo de britagem dos corpos de provas

Fonte: Autores.

O processo de peneiramento ocorreu no laboratório de engenharia civil da UFRJ-Macaé, de acordo com a ABNT NBR 16697 (2018), onde foram utilizadas as peneiras granulométricas quadradas com dimensões, em centímetros, de 50 x 50 x 10, acopladas a um vibrador elétrico. As peneiras utilizadas tinham aberturas de 9,5 mm e 4,75 mm para caracterizar a brita 0 e 19,0 mm e 9,5 mm para brita 1 (Figura 3).

Figura 3. Peneiramento da brita 0 e 1 reciclada

Fonte: Autores.

A Figura 4a ilustra-se o agregado graúdo reciclado antes do processo de britagem, enquanto nas Figuras 4b e 4c ilustra-se os agregados após o peneiramento, no qual se obteve brita 1 e brita 0, respectivamente.

Figura 4. Agregado reciclado: (a) Agregado antes da britagem, (b) brita 1 reciclada, (c) brita 0 reciclada

Fonte: Autores.

CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

O processo de caracterização física dos agregados permitiu realizar a comparação das propriedades dos agregados reciclados e naturais, além de ser necessário para realização das dosagens do concreto. O processo iniciou através de amostras obtidas pelo método de quarteamento de acordo com a ABNT NBR 16915 (2021), e que posteriormente foram submetidas aos ensaios de composição granulométrica de acordo com a ABNT NBR 17054 (2022), massa específica real do agregado - (Departamento nacional de estradas de rodagem [DNER-ME] 194/98, 1998) e graúdo - ABNT NBR 16917 (2021), absorção de água - ABNT NBR

16917 (2021), massa unitária - ABNT NBR 16972 (2021) e abrasão Los Angeles - ABNT NBR 16974 (2022). A Figura 5 ilustra-se a etapa de caracterização física dos agregados graúdos naturais e reciclados.

Figura 5. Caracterização dos agregados: (a) Massa específica agregado miúdo, (b) Absorção de água, (c) Massa específica do agregado graúdo, (d) Massa unitária agregado graúdo, (e) Ensaio Los Angeles



Fonte: Autores.

A quantificação da argamassa residual foi realizada conforme o estudo de Bazuco (1999), onde as amostras foram submetidas a uma solução de ácido clorídrico contendo uma concentração entorno de 10% m/v. Foi utilizada uma amostra de 200 gramas para cada tipo de brita reciclada, de forma que as mesmas ficaram submersa na solução de ácido clorídrico por 24 horas, conforme ilustrado na Figura 6. Neste ensaio, somente a argamassa residual aderida foi atingida, preservando o agregado natural presente. Através do cálculo de diferença de massa, foi encontrado o teor de argamassa residual aderida ao agregado reciclado.

Figura 6. Ensaio de ataque ácido no agregado graúdo reciclado - Brita 0 e 1



Fonte: Autores.

DOSAGENS DOS CONCRETOS

Foram programadas oito dosagens distintas, onde as variáveis de estudo foram a granulometria das britas e a taxa de substituição de agregado graúdo natural por reciclado (Tabela 1).

Tabela 1. Característica das amostras

Características da Amostra		
Dosagem	Tipo de Brita	% Agreg. Reciclado
1	0	30%
2	0	50%
3	0	100%
4	0	0 %
5	1	30%
6	1	50%
7	1	100%
8	1	0 %

Fonte: Autores.

A quantidade de corpos de prova do experimento foi calculada de forma que fossem realizados ensaios de compressão em 03 corpos de prova de cada série, nas idades de 7, 14 e 28 dias. Já para o ensaio de resistência à tração indireta aos 28 dias, foram necessários 03 corpos de prova para cada dosagem. A quantidade total de amostras do experimento foi de 96 espécimes (Tabela 2).

Tabela 2. Quantidade total de corpos de provas

Idade	Quantidade de corpos de provas			Total
	Resistência à Compressão 07 dias	14 dias	28 dias	
Dosagem 1	3	3	3	3
Dosagem 2	3	3	3	3
Dosagem 3	3	3	3	3
Dosagem 4	3	3	3	3
Dosagem 5	3	3	3	3
Dosagem 6	3	3	3	3
Dosagem 7	3	3	3	3
Dosagem 8	3	3	3	3
Quantidade Total				96

Fonte: Autores.

O projeto das dosagens foi realizado através dos procedimentos adotados pela ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), onde os parâmetros físicos requeridos por ela para elaboração de cálculos foram obtidos através do processo de caracterização dos agregados. A resistência à compressão requerida aos 28 dias para todas as dosagens foi de 25 MPa. A quantidade em kg/m³ dos agregados, do cimento e da água empregados em cada dosagem são mostradas na Tabela 3.

Tabela 3. Quantidade de material utilizado nas dosagens

Material	Quantidade de material utilizado nas dosagens							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Água (kg/m ³)	230	230	230	230	205	205	205	205
Cimento (kg/m ³)	469,4	469,4	469,4	469,4	418,4	418,4	418,4	418,4
Brita 0 Natural (kg/m ³)	614,25	438,75	0	877,5	0	0	0	0
Brita 0 Reciclada (kg/m ³)	215,87	359,78	719,55	0	0	0	0	0
Brita 1 Natural (kg/m ³)	0	0	0	0	775,32	553,8	0	1107,6
Brita 1 Reciclada (kg/m ³)	0	0	0	0	296,07	493,45	986,9	0
Areia Natural (kg/m ³)	766,11	770,49	781,44	759,54	671,41	671,05	670,15	671,96
Relação Água/Cimento (A/C) de cálculo	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49

Fonte: Autores.



PREPARO E CURA DO CONCRETO

As dosagens dos concretos foram realizadas conforme as etapas descritas abaixo, que também foi realizada por Leite (2001):

- Processo de lavagem da betoneira;
- Pré saturação dos agregados reciclados com a água, de acordo com a (National Standard of the People's Republic of China [GB/T] 14685, 2022), que utilização 100% de sua capacidade de absorção de água durante o período de 24 horas como parâmetro;
- Inatividade durante ao período de 10 minutos, com a finalidade dos agregados reciclados absorverem a água;
- Colocar os agregados graúdos naturais e a metade da quantidade de água determinada no processo de projeto das dosagens, e aguardando a homogeneização pelo período de 1 minuto;
- Adição do cimento e da outra metade quantidade de água;
- Acrescentar areia e aguardar a homogeneização durante um período de 2 minutos;

O adensamento dos concretos foi realizado de forma manual de acordo com a ABNT NBR 5738 (2016). Na Figura 7 ilustra-se os espécimes produzidos com brita 0 e 30% de agregados reciclados após o procedimento de moldagem e adensamento.

Figura 7. Corpos de prova após moldagem e adensamento



Fonte: Autores.

Ao término da produção do concreto, os moldes preenchidos com material foram colocados sobre uma superfície horizontal rígida, livre de vibrações e de qualquer outra ação que possa perturbar o concreto. Após 24 horas os corpos de prova foram deformados e armazenados em tanque de água saturada com cal e protegidos de intempéries.

CARACTERIZAÇÃO DA FASE FRESCA DOS CONCRETOS

Para determinar a consistência dos concretos produzidos foi realizado o ensaio de *slump test*, (Figura 8), também denominado de teste de abatimento do concreto, em conformidade com a ABNT NBR 16889 (2020).

Figura 8. Ensaio de abatimento Slump test



Fonte: Autores.



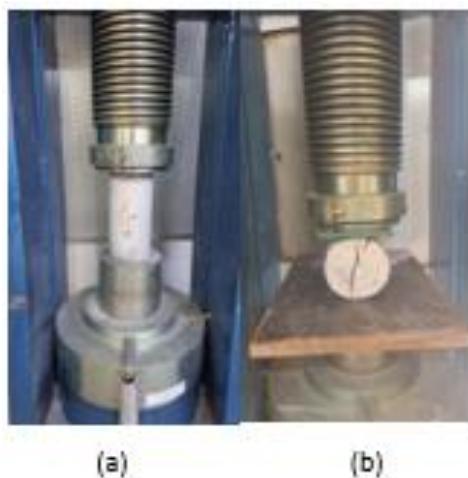
CC BY 4.0
DEED
Attribution 4.0
International

CARACTERIZAÇÃO DA FASE ENDURECIDA DOS CONCRETOS

As dosagens foram submetidas aos seguintes ensaios na fase endurecida: Ensaio mecânico de compressão (fcm) nos períodos de 7, 14 e 28 dias, e o de tração (fct,sp) no período de 28 dias.

O ensaio para verificar a resistência quanto à compressão foi realizado de acordo com a ABNT NBR 5739 (2018), conforme a Figura 9a. Os corpos de prova passaram pela preparação das bases por meio do processo de retificação antes dos ensaios. Já quanto a tração, foi realizado o ensaio de resistência conforme a ABNT NBR 7222 (2018) (Figura 9b).

Figura 9. (a) Ensaio de resistência à compressão, (b) Ensaio de resistência a tração



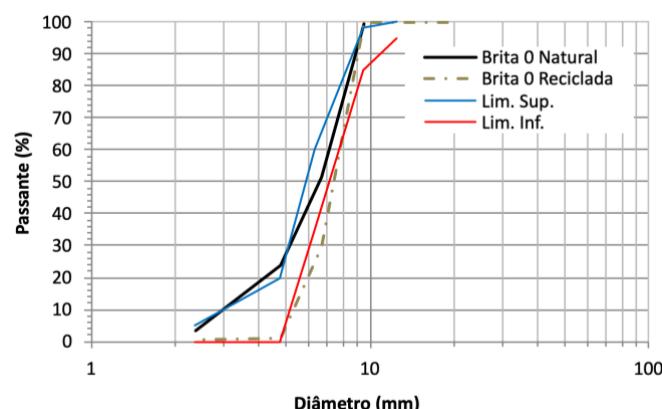
Fonte: Autores.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

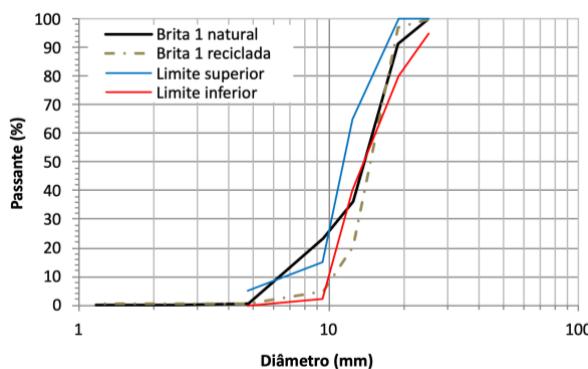
CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS NATURAIS E RECICLADOS

O módulo de finura do agregado miúdo natural foi de 2,43, estando inserido na zona ótima, que varia de 2,20 a 2,90 conforme ABNT NBR 7211 (2022). Já quanto a composição dos agregados graúdos reciclados e naturais, foi evidenciado que tanto a brita 0 quanto a 1 reciclada apresentaram uma composição mais grossa do que as mesmas britas no caráter natural. De acordo com ABNT NBR 7211 (2022), a brita 0 e 1 natural utilizadas possuíam composição adequada para concretos, mas em compensação, as britas 0 e 1 recicladas apresentaram divergência nos valores limites estabelecidos pela norma, mas não influenciando a qualidade do concreto. As curvas granulométricas das brita 0 e 1 estão apresentadas nas respectivas Figuras 10 e 11.

Figura 10. Curva granulométrica do agregado brita 0 natural e reciclada



Fonte: Autores.

Figura 11. Curva granulométrica do agregado brita 1 natural e reciclada

Fonte: Autores.

A massa específica do agregado miúdo natural foi equivalente a 2,65 g/cm³, enquanto as massas específicas e unitárias dos agregados graúdos naturais e reciclados são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Massa específica real e massa unitária dos agregados graúdos naturais e reciclados

Agregado	Massa Específica (g/cm ³)	Massa Unitária (g/cm ³)
Brita 0 Natural	2,63	1,5
Brita 0 Reciclada	2,21	1,23
Brita 1 Natural	2,72	1,56
Brita 1 Reciclada	2,42	1,39

Fonte: Autores.

Através dos resultados obtidos, foi verificado a redução da massa específica real dos agregados reciclados na faixa de 16% para brita 0 e de 11% para a brita 1, em comparação ao agregado natural. Esses valores estão de acordo com os valores encontrados nos estudos de (Etxeberria et al., 2017; Yang et al., 2023; Zhou & Chen, 2017), que variaram de 1.70 a 2.70 g/cm³, onde a redução é ocasionada pela presença de argamassa residual aderida ao agregado reciclado, conforme mencionado no estudo de Li et al. (2005). Enquanto a massa unitária obtidas através dos ensaios apresentou uma redução de cerca de 20% para a brita 0 reciclada e de 10% para a brita 1 reciclada em comparação à natural.

As massas iniciais e finais dos agregados graúdos naturais e reciclados anotadas durante o ensaio de absorção de água estão apresentadas na Tabela 5. Verificado que a quantidade de água absorvida pelas das britas 0 e 1 recicladas foram respectivamente 13 e 8 vezes maiores em comparação aos naturais, podendo ser devido a presença de argamassa residual contida no agregado reciclado conforme descrito pelo estudo de Wang et al. (2021).

Tabela 5. Absorção de água dos agregados graúdos naturais e reciclados

Absorção de água			
Agregado	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Absorção (%)
Brita 0 Natural	2000	2008,2	0,41
Brita 0 Reciclada	2000	2105,8	5,29
Brita 1 Natural	3000	3011,4	0,37
Brita 1 Reciclada	3000	3088,5	2,85

Fonte: Autores.

Uma alternativa diante do maior consumo de água na produção de concreto reciclado em comparação ao concreto referência, as pesquisas de Rickert & Grube (n.d.) mencionam um sistema de reaproveitamento de água, que foi instalado em uma usina de concreto situada em Düsseldorf, na Alemanha, que reaproveita água anteriormente utilizada na limpeza de peças e equipamentos que contêm concreto aderido em sua estrutura. Além disso, as pesquisas mencionam que o concreto produzido com a água reaproveitada manteve a resistência mecânica em comparação ao concreto produzido com água “limpa”.

CC BY
DEED
Attribuição 4.0
Internacional

As massas de agregados graúdos naturais e reciclados anotadas antes e após o desgaste superficial causado pelo ensaio de abrasão Los Angeles são apresentadas na Tabela 6. Os valores encontrados para a brita 1, natural e reciclada, estão coerentes com a literatura, onde o agregado reciclado apresenta maior desgaste superficial que o agregado natural. Em contrapartida, os valores obtidos para a brita 0, natural e reciclada, foram próximos entre si, sendo a perda de massa, inclusive, superior para o agregado natural. Isto indica que, a qualidade destes agregados, no que se refere ao desgaste superficial, é semelhante.

Tabela 6. Perda de massa por abrasão Los Angeles dos agregados graúdos naturais e reciclados

Los Angeles			
Agregado	Massa Inicial (g)	Massa final (g)	Perda por Abrasão (%)
Brita 0 Natural	5000	2499	50,02
Brita 0 Reciclada	5000	2868,3	42,63
Brita 1 Natural	5000	3216	35,68
Brita 1 Reciclada	5000	2409	51,82

Fonte: Autores.

As massas de brita 0 e 1 recicladas obtidas após o procedimento de quantificação da argamassa residual aderida ao agregado graúdo reciclado estão apresentadas na Tabela 7, onde ficou verificado que a brita 0 reciclada apresentou maior perda de massa em relação a brita 1 após o ensaio de ataque com ácido clorídrico, revelando que a presença de argamassa residual aderida na brita 1 é menor em comparação a brita 0, proporcionando maior índice de qualidade. Esse resultado encontrado está de acordo com os estudos de (Akbarnezhad et al., 2013; Wang et al., 2023) que mencionam que agregados com granulometrias menores apresentam maior presença de argamassa residual, sendo este um dos motivos do RCD ser amplamente utilizado como agregado graúdo, em vez como agregado fino.

Tabela 7. Quantidade de argamassa Residual aderida aos agregados reciclados

Agregado	Massa antes do ataque (g)	Massa após o ataque (g)	Perda de massa (%)
Brita 0 Reciclada	200	147	26,5
Brita 1 Reciclada	200	156	22

Fonte: Autores.

CARACTERIZAÇÃO DA FASE FRESCA DOS CONCRETOS

A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos dos ensaios de consistência dos concretos no estado fresco. Nota-se que, mesmo realizando a etapa de pré-saturação de 100% conforme a literatura, a utilização de agregados reciclados afeta de forma negativa a trabalhabilidade do concreto, onde os abatimentos não seguem uma tendência clara e obvia, ocasionando uma dificuldade de atingir a trabalhabilidade requerida pelo projeto conforme mencionado por Rostami et al. (2021). Onde o estudo de Pepe (2015) relaciona esse efeito negativo com a alteração da relação água-cimento da mistura durante o processo de hidratação da pasta de cimento, onde ocorre a perda de água da pasta para o agregado reciclado, devido a porosidade dele está relacionada com a argamassa residual aderida ao agregado.

Tabela 8. Resultados dos ensaios de Slump test na fase fresca do concreto

Slump Test		
Dosagem	Agregado	Abatimento (mm)
1	Brita 0	4
2		6
3		4
4		8
5	Brita 1	4
6		3
7		2
8		8

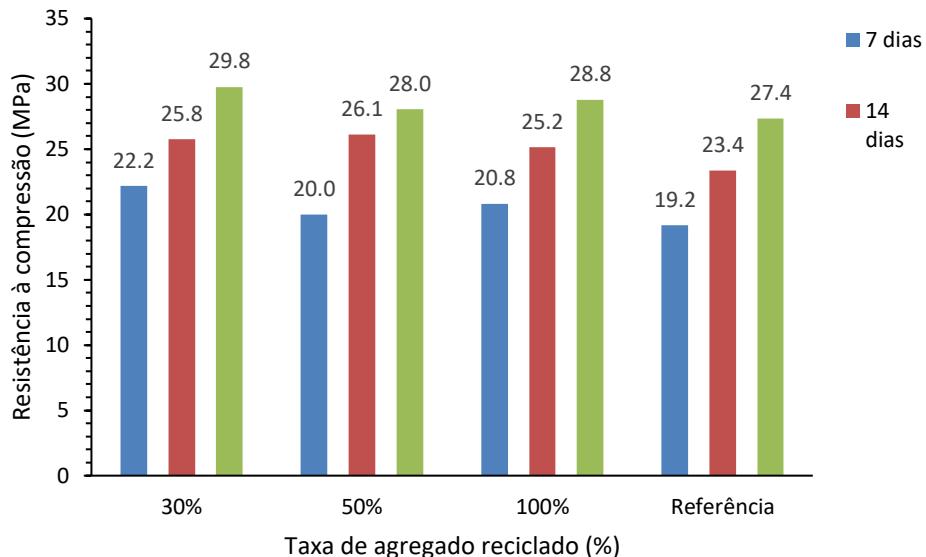
Fonte: Autores.



CARACTERIZAÇÃO DA FASE ENDURECIDA DOS CONCRETOS

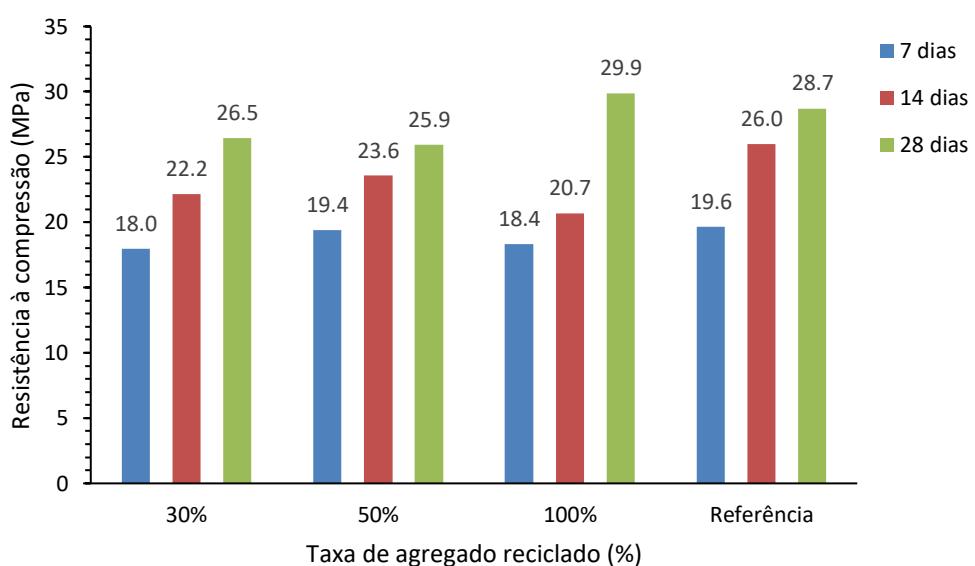
As resistências à compressão dos corpos de prova nos períodos de 7, 14 e 28 dias estão descritas nas Figuras 12 e 13. A resistência à compressão prevista na dosagem foi de 25 MPa, mas a média da resistência de todos os corpos de prova atingiu ou ultrapassou esta resistência na idade de 28 dias. Diferentemente do estudo de Olofinnade & Osoata (2023), o concreto contendo 30%, 50% e 100% de agregado reciclado brita 0 ou 1 não apresentou valores de resistência semelhantes em comparação ao concreto produzido com 100% de agregado natural.

Figura 12. Resultados dos ensaios de resistência à compressão das dosagens 1-4 utilizando brita 0, comparando os períodos de 7, 14 e 28 dias



Fonte: Autores.

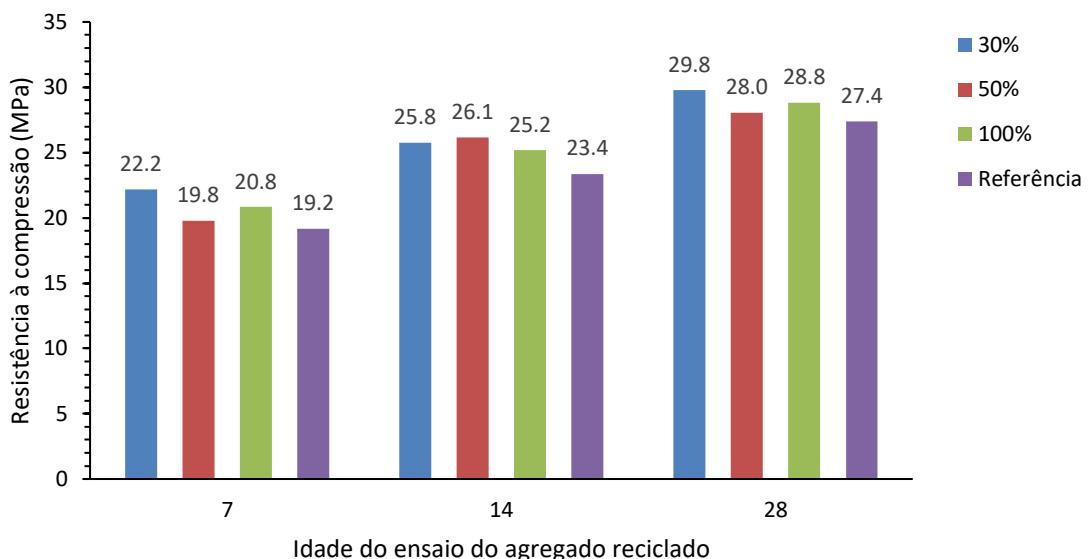
Figura 13. Resultado dos ensaios de resistência à compressão das dosagens 5-8 utilizando brita 1, comparando os períodos de 7, 14 e 28 dias



Fonte: Autores.

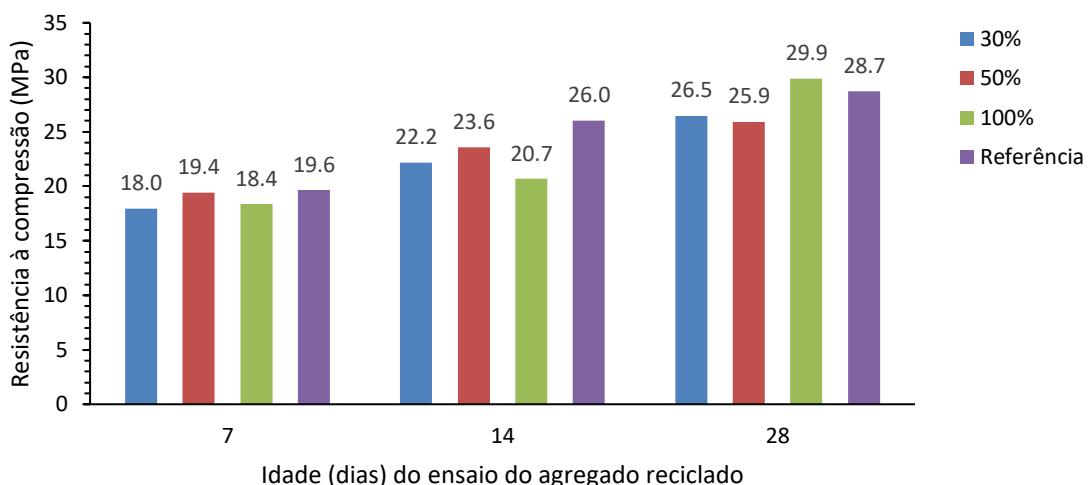
Já as Figuras 14 e 15 apresentam os resultados de resistência à compressão em relação a comparação da taxa de agregado reciclado com a idade do ensaio, onde verifica-se que tanto nas dosagens que utilizaram brita 0 e brita 1, a resistência obtida nas idades de 7, 14 e 28 dias foram semelhantes.

Figura 14. Resultados dos ensaios de resistência à compressão das dosagens 1-4 utilizando brita 0, comparando as taxas de agregado reciclado



Fonte: Autores.

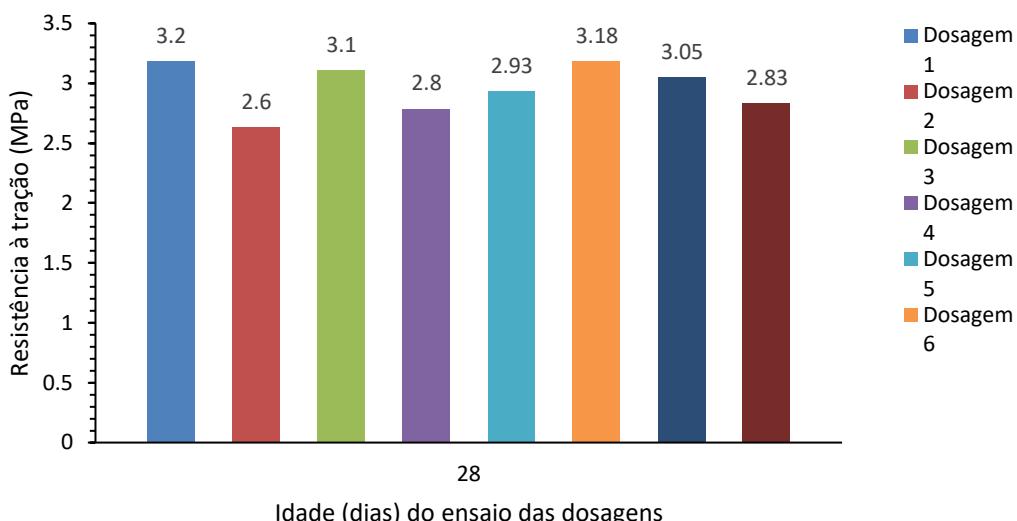
Figura 15. Resultados dos ensaios de resistência à compressão das dosagens 5-8 utilizando brita 1, comparando as taxas de agregado reciclado



Fonte: Autores.

Da mesma forma que o estudo de Olofinnade & Osoata (2023), foi utilizado o método estatístico ANOVA com o objetivo de comparar a resistência média à compressão das dosagens estudadas, onde foi verificado que as tais resistências são estatisticamente iguais entre si para um nível de significância de 5%, sendo o mesmo resultado obtido pelo estudo de Leite (2017). Desta forma, conclui-se que as dosagens que contém 30%. 50% e 100% de substituição de agregados naturais por reciclados, brita 0 e brita 1, atingiram estatisticamente a mesma resistência à compressão em comparação à dosagem referência, na qual se utilizou somente agregados naturais.

Na Figura 16 apresenta-se as resistências à tração indireta dos corpos de prova no período de 28 dias. Onde foi verificado que a tração indireta do concreto é responsável por aproximadamente 8% a 12% da resistência à compressão conforme o estudo de Abdelgader & Ben-Zeitun (2004).

Figura 16. Resultados dos ensaios de resistência à tração das dosagens 1-8 no período de 28 dias

Fonte: Autores.

SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para os futuros trabalhos, tem o melhoramento da qualidade do agregado reciclado através de processos, tais como: adição de nanomateriais, carbonatação, limpeza autógena, tratamento térmico e tratamento com pozolanas. Além de trabalhos que abordem também análise das propriedades de dureza, elasticidade, tenacidade, fadiga, retração, fluência e resistência à flexão /cislhamento do concreto reciclado.

CONCLUSÃO

Nesta pesquisa teve-se como objetivo analisar as propriedades mecânicas de um concreto produzido através da substituição parcial (30%, 50%) e total (100%), de agregados naturais por reciclado. Após a análise dos resultados pode-se concluir que:

- A composição granulométrica dos agregados graúdos (Brita 0 e 1) reciclados se apresentou mais grossa do que do agregado graúdos natural. Onde também foi verificado uma discrepância nos valores limites máximos e mínimos estabelecidos pela norma ABNT NBR 7211 (2022), mas não comprometendo a sua qualidade para o seu uso em concreto;
- Os valores de massa específica (g/cm^3) dos agregados graúdos (brita 0 – natural, brita 0 – reciclada, brita 1 – natural, brita 1 – reciclada) foram os respectivos $2,63 \text{ g}/\text{cm}^3$, $2,21 \text{ g}/\text{cm}^3$, $2,72 \text{ g}/\text{cm}^3$ e $2,42 \text{ g}/\text{cm}^3$. Onde foi verificado que o agregado reciclado apresentou uma massa específica menor em relação a do agregado natural, variando de 1,70 a 2,70 conforme a literatura;
- As taxas de absorção de água dos agregados graúdos (brita 0 – natural, brita 0 – reciclada, brita 1 – natural, brita 1 – reciclada) foram as respectivas 0,41%, 5,29%, 0,37% e 2,85%. Onde foi verificado que o agregado reciclado brita 0 e 1 absorveram respectivamente 13 e 8 vezes mais água que os agregados naturais;
- As taxas de perda de massa dos agregados graúdos (brita 0 – natural, brita 0 – reciclada, brita 1 – natural, brita 1 – reciclada) através do ensaio Los Angeles foram as respectivas 50,02%, 42,63%, 35,68% e 51,82%. Onde a brita 1 reciclada foi menos resistente que a brita 1 natural conforme a literatura, mas a brita 0 reciclada foi mais resistente que a brita 0 natural, devido a um possível baixo índice de qualidade da brita 0 natural;
- As taxas de perda de massa dos agregados graúdos reciclados (brita 0 – reciclada, brita 1 – reciclada) após o ataque clorídrico foram as respectivas 26,25% e 22%, demonstrando que a brita 1 apresentou menor quantidade de argamassa residual, em conformidade com

literatura, que menciona que os agregados com granulometrias menores apresentam mais argamassa residual aderida em sua estrutura;

- Após o ensaio de Slump Test foi verificado que a utilização de agregados graúdos reciclados afeta de forma negativa a trabalhabilidade do concreto, além da dificuldade de atingir a trabalhabilidade requerida pelo projeto, que foi de um abatimento de 80 mm.
- Os valores obtidos após o ensaio de resistência à compressão das dosagens mostram que todas as misturas atingiram ou ultrapassaram o valor de resistência de 25 MPa requerida no período de 28 dias. Onde ficou demonstrado que o concreto com substituição parcial ou total do agregado natural por reciclado não apresentou redução de resistência em comparação ao concreto com 100% de agregado natural. E através do método ANOVA foi verificado que todas as dosagens apresentaram estatisticamente médias iguais de resistência à compressão no período de 28 dias;
- Os valores obtidos após o ensaio de resistência à tração indireta das dosagens demonstram que a tração indireta do concreto é responsável por aproximadamente 8% a 12% da resistência à compressão. E através do método ANOVA foi verificado que todas as dosagens apresentaram estatisticamente médias iguais de resistência à tração indireta no período de 28 dias;
- É possível a produção de dosagens de concreto reciclado contendo 30%, 50% e 100% de agregados graúdos reciclados com resistência mecânica de compressão e tração semelhante ou superior ao concreto referência. Mas são necessários mais estudos que comprove sua aplicação e eficiência, principalmente análise de propriedades mecânicas que não foram abordadas neste estudo, tais como, resistência à flexão e cisalhamento. Além da abordagem das propriedades de elasticidade, fluência, retração, fadiga, dureza e tenacidade;
- A utilização do concreto reciclado pode proporcionar a preservação do meio ambiente, a redução da extração de recursos naturais, a redução da geração de RCD e redução das emissões de gases. Fazendo com o setor de construção civil se aproxime das metas de sustentabilidade descritas nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em particular da ODS nº12 que se refere a produção e consumo sustentável.

REFERÊNCIAS

- Abdelgader, H.S., & Ben-Zeitun, A.E. (2004). Tensile strength of two stage concrete measured by double-punch and split tests. *Structural Concrete*, 5(4), 173-177. <http://dx.doi.org/10.1680/stco.2004.5.4.173>
- Akbarnezhad, A., Ong, K.C.G., Tam, C.T., & Zhang, M.H. (2013). Effects of the parent concrete properties and crushing procedure on the properties of coarse recycled concrete aggregates. *J. Mater. Civ. Eng.*, 25, 1795-1802. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.19435533.0000789](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.19435533.0000789)
- Ashby, M.F. (2012). *Materials and the Environment: Eco-Informed Material Choice*. 2^a ed. Waltham: Elsevier/Butterworth-Heinemann
- Associação brasileira de normas técnicas. (2022). NBR 7211:2022: Agregados para concreto - requisitos. Recuperado de <http://www.abnt.org.br>
- Associação brasileira de normas técnicas. (2021). NBR 16915:2021: Agregados - Amostragem. Recuperado de <http://www.abnt.org.br>
- Associação brasileira de normas técnicas. (2018). NBR 5739:2018: Agregados - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Recuperado de <http://www.abnt.org.br>
- Associação brasileira de normas técnicas. (2021). NBR 17054:2022: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio. Recuperado de <http://www.abnt.org.br>
- Associação brasileira de normas técnicas. (2022). NBR 16974:2022: Agregados - Ensaios de resistência ao impacto e à abrasão Los Angeles. Recuperado de <http://www.abnt.org.br>
- Associação brasileira de normas técnicas. (2018). NBR 16697:2018: Cimento Portland - Requisitos. Recuperado de <http://www.abnt.org.br>
- Associação brasileira de normas técnicas. (2020). NBR 16889:2020: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Recuperado de <http://www.abnt.org.br>
- Associação brasileira de normas técnicas. (2021). NBR 16917/2021: Determinação da densidade e da

- Junior, G. A. F., Leite, J. C. T., Mendez, G. d. P., Haddad, A. N., Silva, J. A. F., da Costa, B. B. F.
- absorção de água. Recuperado de <http://www.abnt.org.br>
- Associação brasileira de normas técnicas. (2021). NBR 16972:2021: Determinação da massa unitária e dos índices de vazios. Recuperado de <http://www.abnt.org.br>
- Associação brasileira de normas técnicas. (2018). NBR 7222:2018: Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Recuperado de <http://www.abnt.org.br>
- Associação brasileira de normas técnicas. (2018). NBR 5738:2016: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Recuperado de <http://www.abnt.org.br>
- Bazuco, R. S. (1999). Utilização de agregados reciclados de concreto para a produção de novos concretos (Dissertação de Mestrado). *Universidade Federal de Santa Catarina*, Florianópolis, RS, Brasil.
- Cerchione, R., Colangelo, F., Farina, I., Ghisellini, P., Passaro, R., & Ulgiati, S. (2023). Life Cycle Assessment of Concrete Production within a Circular Economy Perspective. *Sustainability*, 15, 11469. <https://doi.org/10.3390/su151411469>
- Contreras-Llanes, M., Romero, M., Gazquez, M.J., & Bolívar, J.P. (2021). Recycled aggregates from construction and demolition waste in the manufacture of urban pavements. *Materials*, 14(21), 6605. <https://doi.org/10.3390/ma14216605>
- Danish, A., Salim, M.U., & Ahmed, T. (2019). Trends and developments in green cement "a sustainable approach". *Sustain Struct Mater*, 2(1), 45-60. <https://doi.org/10.26392/SSM.2019.02.01.045>
- Departamento nacional de estradas de rodagem. (1998). DNER-ME 194/98: Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Recuperado de <https://www.gov.br/dnit>
- Etxeberria, M., Vazquez, E., Marí, A., & Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cem. Concr. Res*, 37(5), 735-742. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.002>
- Ferreira, R.L.S., Anjos, M.A.S., Nóbrega, A.K.C., Pereira, J.E.S., & Ledesma, E.F. (2019). The role of powder content of the recycled aggregates of CDW in the behaviour of rendering mortars. *Constr Build Mater*, 208, 601-612. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.058>
- Gholampour, A., Danish, A., Ozbakkaloglu, T., & Yeon, J.H. (2022). Mechanical and durability properties of natural fiber-reinforced geopolymers containing lead smelter slag and waste glass sand. *Constr. Build. Mater.*, 352, 129043. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129043>
- Góra, J., & Piasta, W. (2020). Impact of Mechanical Resistance of Aggregate on Properties of Concrete. *Case Stud. Constr. Mater*, 13, e00438. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00438>
- Imbabi, M., Carrigan C., & McKenna S. (2012). Trends and developments in green cement and concrete technology. *Int J Sustain Built Environ*, 1(2), 194-216. <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2013.05.001>
- Leite, J. C. T. (2017). A influência do teor de agregados reciclados provenientes de concretos simples com diferentes resistências no comportamento ao atrito-cisalhamento (Dissertação de Mestrado). Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.
- Leite, M. B. (2001). Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição (Tese de Doutorado). Escola de Engenharia, *Universidade Federal do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, RS, Brasil.
- Li, J., Zhang, C., & Xiao, J. (2005). On statistical characteristics of the compressive strength of recycled aggregate concrete. *Struct. Concr*, 6, 149-153. <https://doi.org/10.1680/stco.2005.6.4.149>
- Miller, S. A., Horvath A., & Monteiro P. J. M. (2018). Impacts of booming concrete production on water resources worldwide. *Nat Sustain*, 1(1), 69-76. <https://doi.org/10.1038/s41893-017-0009-5>
- Monteiro, P. J. M., Miller, S. A., & Horvath, A. (2017). Towards sustainable concrete. *Nat Mater*, 16(7), 698-699. <http://dx.doi.org/10.1038/nmat4930>
- National Standard of the People's Republic of China. (2022). GB/T 14685-2022: Pebble and Crushed Stone for Construction; General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Recuperado de <https://www.chinesestandard.net/>
- Olofinnade, O., & Osoata, O. (2023). Performance assessment of mechanical properties of green normal strength concrete produced with metakaolin-cement coated recycled concrete aggregate for sustainable construction. *Construction and Building Materials*, 407, 133508. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133508>
- Palumbo, E., Soust-Verdaguer, B., Llatas, C., & Traverso, M. (2020). How to obtain accurate environmental impacts at early design stages in BIM when using environmental product declaration. A method to support decision-making. *Sustainability*, 12(17), 6927. <https://doi.org/10.3390/su12176927>
- Peng, Q., Wang, L., & Lu, Q. (2018). Infuence of recycled coarse aggregate replacement percentage on fatigue performance of recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.*, 169(5), 347-353. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.196>
- Peng, Z., Shi, C., Shi, Z.; Lu, B.; Wan, S.; Zhang, Z., Chang, J., & Zhang, T. (2020). Alkali-aggregate

reaction in recycled aggregate concrete. *J. Clean. Prod.*, 255, 120238.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120238>

Pepe, M. (2015). A Conceptual Model for Designing Recycled Aggregate Concrete for Structural Applications, Springer Theses. Recuperado de <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-26473-8>

Petticrew, M., & Roberts, H. (2006). *Systematic Reviews in the Social Sciences: A Practical Guide*. Malden: Blackwell Publishing.

Rickert, J., & Grube, H. (n.d.) Analysis of recycled water componentes. Düsseldorf: VDZ. Recuperado de https://mitglieder.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Betontechnische_Berichte/049-060_Restwasserinhalt.pdf.

Rickert, J., & Grube, H. (n.d.). Influence of Recycled Water from Fresh Concrete Recycling Systems on the Properties of Fresh and Hardened Concrete. Düsseldorf: VDZ. Recuperado de https://mitglieder.vdzonline.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Betontechnische_Berichte/059-070_Einfluss_Restwasser.pdf

Schneider, M., Romer, M., Tschudin, M., & Bolio, H. (2011). Sustainable cement production—present and future. *Cem Concr Res*, 41(7), 642-650. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.019>

Skocek, J., Ouzia, A., Serrano, E. V., & Pato, N. (2024). Recycled Sand and Aggregates for Structural Concrete: Toward the Industrial Production of High-Quality Recycled Materials with Low Water Absorption. *Sustainability*, 16(2), 814. <https://doi.org/10.3390/su16020814>

Smitha, J. S., & Thomas, A. (2021). Integrated Model and Index for Circular Economy in the Built Environment in the Indian Context. *Construction Economics and Building*, 21(3), 198-220. <https://doi.org/10.5130/AJCEB.v21i3.7684>

Song, R., Wang, B., Yao, Q., Li, Q., Jia, X., & Zhang, J. (2019). The Impact of Obesity on Thyroid Autoimmunity and Dysfunction: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Front Immunol*, 10, 2349. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2019.02349>

Verma, A., Babu, V. S., & Arunachalam, S. (2022). Influence of modified two-stage mixing approaches on recycled aggregate treated with a hybrid method of treatment. *Aust. J. Struct. Eng*, 23(3), 230-253. <http://dx.doi.org/10.1080/13287982.2022.2048479>

Wang, B., Yan, L., Fu, Q., Kasal, B. (2021). A comprehensive review on recycled aggregate and recycled aggregate concrete. *Resour. Conserv. Recycl*, 171, 105565. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105565>

Wang, D., Lu, C., Zhu, Z., Zhang, Z., Liu, S., Ji, Y., Xing, Z. (2023) Mechanical performance of recycled aggregate concrete in green civil engineering: Review. *Case Stud. Constr. Mater*, 19, e02384. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02384>

Wesseling, J. H., & Vooren, A. V. D. (2017). Lock-in of mature innovation systems: the transformation toward clean concrete in the Netherlands. *J Clean Prod*, 155(2), 114-124. <http://doi.org/10.13140/RG.2.1.2074.4569>

Yang, H., Fang, J., Jiang, J., Li, M., & Mei, J. (2023). Compressive stress-strain curve of recycled concrete under repeated loading. *Constr. Build. Mater*, 387, 131598. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131598>

Zhang, Y., Gao, L., & Bian, W. (2020). Mechanical performance of concrete made with recycled aggregates from concrete pavements. *Adv. Mat. Sci. Eng*, 2020, 1-8. <https://doi.org/10.1155/2020/5035763>

Zhao, X. (2021). Stakeholder-associated factors influencing construction and demolition waste management: a systematic review. *Buildings*, 11(4), 149. <https://doi.org/10.3390/buildings11040149>

Zhou, C., & Chen, Z. (2017). Mechanical properties of recycled concrete made with different types of coarse aggregate. *Constr. Build. Mater*, 134, 497-506. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.163>

Rostami, J., Khandel, O., Sedighardekani, R., Sahneh, A.R., & Ghahari, S. (2021). Enhanced workability, durability, and thermal properties of cement-based composites with aerogel and paraffin coated recycled aggregates. *J. Clean. Prod*, 297, 126518. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126518>

Olofinnade, O., & Osoata, O. (2023). Performance assessment of mechanical properties of green normal strength concrete produced with metakaolin-cement coated recycled concrete aggregate for sustainable construction. *Constr. Build. Mater*, 407, 133508. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133508>



CC BY 4.0
Attribution 4.0
International