

ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS
MESTRADO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

PIETRA MORAES BORGES

**ARGAMASSA COM AGREGADO RECICLADO DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E
DEMOLIÇÃO: PROPRIEDADES MECÂNICAS E FIXAÇÃO DE CARBONO**

Porto Alegre

2022

PÓS-GRADUAÇÃO - *STRICTO SENSU*



Pontifícia Universidade Católica
do Rio Grande do Sul



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

**ARGAMASSA COM AGREGADO RECICLADO DE RESÍDUO DE
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO: PROPRIEDADES MECÂNICAS E
FIXAÇÃO DE CARBONO**

PIETRA MORAES BORGES

ENGENHEIRA CIVIL

ORIENTADOR: PROF. DR. JAIRO JOSÉ DE OLIVEIRA ANDRADE

CO-ORIENTADORA: Prof^a. Dr^a. Edna Possan

Dissertação de Mestrado realizada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestra em Engenharia e Tecnologia de Materiais.

**Porto Alegre
Janeiro, 2022**

Ficha Catalográfica

B732a Borges, Pietra Moraes

Argamassa com agregado reciclado de resíduo de construção e demolição : propriedades mecânicas e fixação de carbono / Pietra Moraes Borges.
– 2022.

76 p.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PUCRS.

Orientador: Prof. Dr. Jairo José de Oliveira Andrade.

Co-orientadora: Profa. Dra. Edna Possan.

1. Resíduo de Construção e Demolição. 3. Mineralização. 4. Propriedades Físico-mecânicas. I. Andrade, Jairo José de Oliveira. II. Possan, Edna. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da PUCRS
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Bibliotecária responsável: Clarissa Jesinska Selbach CRB-10/2051



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

ESCOLA POLITÉCNICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

**ARGAMASSA COM AGREGADO RECICLADO DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E
DEMOLIÇÃO: PROPRIEDADES MECÂNICAS E FIXAÇÃO DE CARBONO**

CANDIDATA: PIETRA MORAES BORGES

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

DR. JAIRO JOSÉ OLIVEIRA ANDRADE - ORIENTADOR

**DRA. EDNA POSSAN – COORIENTADORA - UNIVERSIDADE FEDERAL DA INTEGRAÇÃO
LATINO-AMERICANA**

BANCA EXAMINADORA

**DR. ABRAHÃO BERNARDO ROHDEN - FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE REGIONAL DE
BLUMENAU**

Prof. Dr. Alex Neves Junior
Dep. de Engenharia Civil
FAET/UFMT
SIAPE: 2571793

D.Sc. ALEX NEVES JÚNIOR – UFMT

DRA. ELEANI MARIA DA COSTA - PGETEMA - PUCRS

PUCRS

Campus Central

Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 32 - Sala 507 - CEP: 90619-900

Telefone: (51) 3353.4059 - Fax: (51) 3320.3625

E-mail: engenharia.pg.materiais@pucrs.br

www.pucrs.br/politecnica

“Conheça todas as teorias, domine todas as técnicas, mas ao tocar uma alma humana, seja apenas outra alma humana.”

(Carl Jung)

DEDICATÓRIA

Dedico cada linha deste trabalho aos meus pais Andréia e Ibrahim.

AGRADECIMENTOS

Ninguém chega até aqui sozinho.

Aos meus pais Andréia e Ibrahim por todo o apoio incondicional que vocês me deram ao longo de todos esses anos. O caminho da educação é o mais árduo e difícil mas o único que compensa. Obrigada por sempre acreditarem em mim, eu amo vocês.

À minha vó baixinha por me animar e me mimar nas horas mais complicadas desse processo, se Deus de fato existe (como tu sempre me diz) tenho certeza que tu és um presente dele pra mim, te amo muito minha véia.

Às minhas amigas Carol, Mariah, Paloma, Ana e Thabata por terem ouvido os incontáveis áudios onde eu amaldiçoava esse trabalho do início ao fim. Obrigada por rirem e chorarem comigo, sem vocês a caminhada não teria sido tão divertida.

Ao meu namorado Gustavo pela paciência em conviver com esse animal raro e agressivo chamado “mestrando”.

Aos meus orientadores Prof. Jairo Andrade e Prof^a Edna Possan pela paciência. Vocês me oportunizaram muitas ferramentas necessárias para a construção do conhecimento expresso nesse trabalho, muito obrigada.

Ao Prof. Alex Neves Junior por todo o auxílio nas etapas mais complicadas.

À todo o pessoal do Laboratório de Materiais de Construção da PUCRS pela parceria: Jéssica Schiavon, Sérgio Roberto, Tiago Ortolan, Tamara Baggio, Eduardo Borba, Bruna Santos e José Eduardo.

Ao meu colega e amigo Douglas Rodeguiero por toda a paciência e generosidade, os últimos anos não teriam sido tão bons sem a tua presença no laboratório.

Aos meus colegas e amigos Eduardo Rigo, Gabriela Leite e Raquel Pedroso pela generosidade e ajuda de vocês nessa reta final de trabalho, vocês são tudo.

Por fim, agradeço à todas as pessoas que lutaram e seguem lutando pelo direito de todos à educação. À todos que defendem a ciência com unhas e dentes. Eu me levanto sobre o sacrifício de vocês e prometo adicionar um degrau nessa longa escalada para que quem venha depois de mim possa ver mais longe.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	5
AGRADECIMENTOS.....	6
SUMÁRIO	7
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS.....	9
LISTA DE QUADROS	10
LISTA DE SÍMBOLOS.....	11
RESUMO.....	12
ABSTRACT.....	13
1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	17
2.1. Objetivo Geral.....	17
2.2. Objetivos Específicos	17
2.3. Delimitações do trabalho.....	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1. Impacto Ambiental e emissões de CO ₂ na produção de argamassas	18
3.2. Fixação de dióxido de carbono.....	21
3.3. Resíduo de Construção e Demolição	24
3.4. Revisão bibliográfica Sistemática (RBS).....	28
4. MATERIAIS E MÉTODOS: ARTIGO	1
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	28
6. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	29
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	30
ANEXOS	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.2.1 Avanço da frente de carbonatação em estrutura de concreto armado ...	22
Figura 3.2.2 Relação entre potencial de captura e área superficial.....	23
Figura 3.3.1 Barreiras para o uso de agregado reciclado	26
Figura 3.4.1 Número de resultados na busca da palavra-chave “CDW” no banco de dados <i>Science Direct</i>	30
Figura 3.4.2 Número de resultados na busca da palavra-chave “CO ₂ uptake” no banco de dados <i>Science Direct</i>	30
Figura 3.4.3 Distribuição geográfica dos artigos da seleção final.....	31
Figura 3.4.4 Ensaios utilizados nos artigos selecionados	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.4.1 Resultados de todas as etapas e a seleção final da revisão bibliográfica sistemática	29
---	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.3.1 Classes de resíduo de construção e demolição	25
Quadro 3.4.1 Artigos selecionados para análise detalhada	33

LISTA DE SÍMBOLOS

e_c	Profundidade de carbonatação	mm
A	Área da seção transversal do corpo de prova em contato com o CO_2	m^2
M	Fração molar entre CO_2 e CaO	
Q_{cim}	Teor de cimento por m^3 de argamassa	kg
Q_{AR}	Teor de agregado miúdo reciclado por m^3 de argamassa	kg
CaO_{cim}	Teor de óxido de cálcio no cimento	%
CaO_{AR}	Teor de óxido de cálcio no agregado reciclado	%
$\%C_{\text{cim}}$	Teor de clínquer presente no cimento	%
$\%\text{CaO}_{\text{cim}}$	Proporção de CaO carbonatável em relação ao total no cimento	%
$\%\text{CaO}_{\text{AR}}$	Proporção de CaO carbonatável em relação ao total no AR	%
E_{cim}	Emissão total da produção do cimento	kgCO_2/t
$E_{\text{clínquer}}$	Emissão total da produção do clínquer	kgCO_2/t
$\%Cl_{\text{cim}}$	Percentual de clínquer na composição do cimento	%
E_{energia}	Emissões geradas pelo gasto energético no processo	kWh/t
FE_{energia}	Fator que relaciona a energia utilizada e as emissões	kgCO_2/kWh
E_{arg}	Emissões totais para produção de argamassa	kgCO_2/t
E_{AN}	Emissões associadas ao agregado natural	kgCO_2/t
Q_{AN}	Consumo de agregado natural por m^3 de argamassa	kg
E_{AR}	Emissões associadas ao agregado reciclado	kgCO_2/t
Q_{AR}	Consumo de agregado reciclado por m^3 de argamassa	kg

RESUMO

BORGES, Pietra Moraes. **Argamassa com agregado reciclado de resíduo de construção e demolição: propriedades mecânicas e fixação de carbono.** Porto Alegre. 2022. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

Ao longo dos últimos anos, o uso de agregados reciclados (AR) de resíduo de construção e demolição se mostraram uma alternativa promissora para o incremento do conceito de economia circular dentro da indústria da construção. O uso de AR contribui para promover uma destinação mais adequada aos resíduos, minimizando o uso de agregados naturais (AN). A carbonatação também se tornou uma tecnologia atrativa para uso, captura e armazenamento de carbono. O presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência da substituição do agregado natural por agregado reciclado e seu impacto na fixação de carbono. Para isso, foram moldados corpos de prova de argamassa com percentuais de substituição de 0, 25, 50, 75 e 100% do AN por material reciclado e utilizando 3 granulometrias distintas de agregado. Com o objetivo de mensurar o impacto dessas modificações, foram realizados ensaios de resistência à compressão e tração na flexão, absorção, porosidade e massa específica para propriedades físico-mecânicas. Para analisar as propriedades microestruturais foram realizados ensaios de microtomografia de raios X e difração de raios X. Com a intenção de avaliar o potencial de fixação de carbono, foram realizados ensaios de profundidade de carbonatação e de termogravimetria. Os resultados mostraram que as argamassas com 25% de substituição foram as menos emissivas considerando o balanço de emissões. Além disso, a granulometria modificou significativamente os resultados. Ademais, todas as argamassas tiveram desempenho mecânico satisfatório de acordo com as normas brasileiras.

Palavras-Chaves: CDW, Mineralização, Propriedades físico-mecânicas, Análise microestrutural, Captura de CO₂.

ABSTRACT

BORGES, Pietra Moraes. **Mortars with recycled aggregate from construction and demolition waste: mechanical properties and CO_2 uptake.** Porto Alegre. 2021. Master. Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL

Over the past few years, the use of recycled aggregate (RA) from construction and demolition waste (CDW) has proved to be a promising alternative for increasing the concept of circular economy within the construction industry. The use of RA contributes to a more adequate destination of these wastes besides minimizing the use of natural aggregates (NA). Carbonation also has proved to be a promising alternative to carbon capture, use, and storage. This present work aims to evaluate the substitution influence of NA for RA. For that, mortar specimens were molded with replacement levels of 0, 25, 50, 75, and 100% of the NA for RA, and three different granulometries were used to evaluate the particle size influence. To analyze the performance of these modifications, compressive strength and tensile strength in flexion, porosity, absorption, and bulk density were performed to evaluate physical-mechanical properties. To assess the influence in microstructural properties X-ray microtomography test was carried out in addition to XRD analysis. With the purpose to evaluate uptake, carbonation depth and thermogravimetry were made from accelerated carbonation tests. The results showed that mortars with 25% have the least emissive balance and that the replacement level increases the amount of CO_2 captured. Particle size distribution also influences significantly in the results. Further, all samples had satisfactory mechanical behavior according to Brazilian Standards.

Keywords: C&D Waste; Mineralization; Physical-mechanical properties; Microstructural analysis, Carbon dioxide capture.

1. INTRODUÇÃO

Gases de efeito estufa (GEE) são um dos fatores responsáveis pela possibilidade de existência de vida na Terra. Conhece-se o efeito estufa como um processo natural que garante o aquecimento do planeta e o equilíbrio de diversos sistemas bióticos e abióticos. Porém, com a era industrial, as emissões antropogênicas aceleraram significativamente o processo de aquecimento global, tornando-o preocupante [1]. Os GEE de maior evidência são: dióxido de carbono (CO_2), metano, óxido nitroso, clorofluorcarbonetos (CFC), vapor de água e ozônio. O CO_2 torna-se particularmente preocupante quando constatado que é responsável por 76% do processo de aquecimento global tendo uma vida útil na atmosfera de milhares de anos [1]. Registrou-se, desde o período pré-industrial, um aumento de 49% na concentração de CO_2 na atmosfera, passando de 280 ppm para 419,2 ppm em 2022 [2]. Esse aumento exponencial fomenta o processo de mudança climática que pode gerar consequências como: mudança nos padrões de precipitação, maior frequência e períodos mais longos de seca, aumento no nível do mar, derretimento das camadas polares de diversos lugares do mundo, dificuldades na produção de alimentos, mudanças na umidade relativa do ar, extinção de flora e fauna entre outras [3].

A indústria cimenteira mundial, dentro desse contexto, é responsável por aproximadamente 8% das emissões antropogênicas. Os maiores causadores dessas emissões no processo de fabricação do cimento são a descarbonatação da rocha calcária e o uso de combustíveis fósseis [4]. No Brasil, são emitidos em média 832 kg de CO_2 por tonelada de clínquer, material esse que é considerado o principal no desenvolvimento de resistência no cimento Portland [5]. A realidade nacional ainda contou com uma produção de cimento de 42,4 milhões de toneladas em 2019. Aproximadamente 55% do total de cimento produzido é aplicado para produção de argamassas, contabilizando 23,3 milhões de toneladas de cimento para essa funcionalidade [6]. Para países em desenvolvimento econômico, como é o caso

brasileiro, a necessidade do uso de materiais cimentícios advém da imprescindível expansão da infraestrutura urbana e industrial.

Buscando mitigação dos impactos ambientais, em 2009 foi publicado o *Roadmap* para indústria do cimento onde constam métodos e metas para redução do impacto ambiental no setor. As principais medidas citadas são: melhoria na eficiência energética, uso de combustíveis alternativos, substituição do clínquer na composição do cimento por materiais menos emissivos e, por fim, as tecnologias de uso, armazenamento e captura de carbono [7]. No panorama nacional, a mudança dos percentuais de substituição do clínquer por demais materiais, aplicada na NBR 16697 [8] em 2018, foi fundamental para a diminuição das emissões por kg de cimento produzido no Brasil. Dentro das tecnologias de captura e armazenamento de carbono disponíveis pode-se citar a carbonatação natural e a cura carbônica dos materiais cimentícios, procedimentos fundamentais para que sejam alcançadas as metas do *Roadmap* da indústria do cimento.

A carbonatação é definida como a reação físico-química, que acontece naturalmente, capaz de absorver dióxido de carbono da atmosfera transformando-o em carbonatos, tal processo gera um material termodinamicamente estável (CaCO_3). Diversos fatores podem afetar a capacidade de um material, mais especificamente de uma argamassa, de capturar CO_2 . Fatores como: proporção de cimento no traço da argamassa, tipo de cimento, tipo de agregado, superfície de contato com o ambiente, umidade relativa, concentração de CO_2 e a presença ou não de revestimento, são apenas alguns exemplos [9]. O impacto desse método indireto natural na captura e no balanço de emissões não é um consenso dentro da comunidade acadêmica devido a quantidade de variáveis envolvidas no processo e a dificuldade de comparar resultados.

O uso de resíduo de construção e demolição (RCD) na forma de agregado reciclado (AR) a ser usado em substituição ao agregado natural (AN) tem capacidade de aumentar o potencial de captura por se tratar de um material com a presença de compostos carbonatáveis não carbonatados e pela sua elevada área superficial, uma vez feita britagem após a demolição [10]. Atualmente, a construção civil é responsável por aproximadamente 50% do consumo total de matéria prima mundial. Quando o assunto é extração de agregados, são utilizadas mais de 40 bilhões de toneladas por ano [11,12]. O Ministério de Minas e Energia do Brasil [13] afirma que foram

consumidos, em 2017, 294 milhões de toneladas de areia natural, em sua maioria, proveniente de leitos de rios. O processo de dragagem de leitos afeta diretamente o equilíbrio ambiental do ecossistema [14]. Por outro lado, de acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE [15] foram coletados no Brasil, no ano de 2019, 44,5 milhões de toneladas de RCD. Tal valor reflete apenas o coletado pelos municípios em logradouros e vias públicas. Em 2010, a associação registrou o recolhimento de 33,3 milhões de toneladas. Isso demonstra um crescimento de 33,3% em um período de 9 anos. Brito [16] explica que o agregado reciclado pode ser utilizado dentro da própria indústria da construção de diversas maneiras: material de reforço de subleito, base e sub-base de rodovias; bases para concreto magro; material de drenagem e na produção de novos concretos. O descarte irregular do RCD causa passivos ambientais e, além disso, torna-se oneroso economicamente, visto que tem aplicação comercial [17].

Desde a década de 70 a carbonatação é vista por meio de estudos voltados a área de manifestações patológicas por acarretar a despassivação das armaduras tornando-as suscetíveis à corrosão. Porém, diversas pesquisas apontam para o potencial positivo da carbonatação para materiais onde não há a presença de armaduras [18–21].

Nesse sentido, o presente trabalho está dividido em sete capítulos: introdução, objetivos, revisão bibliográfica, materiais e método (onde inclui-se o artigo resultante desta pesquisa), considerações finais, sugestões para trabalhos futuros e referências bibliográficas. O capítulo de revisão bibliográfica foi dividido em 4 subcapítulos que abordam os seguintes temas: Impacto ambiental e emissões de CO₂ na produção de argamassas, Fixação de dióxido de carbono, Resíduos de construção e demolição e Revisão bibliográfica sistemática (RBS).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral quantificar a captura de CO_2 e avaliar as propriedades físicas, mecânicas e microestruturais de argamassas produzidas com agregado reciclado de resíduo de construção e demolição.

2.2. Objetivos Específicos

Como objetivos específicos pode-se destacar os seguintes tópicos:

- a) Analisar a influência da granulometria e do percentual de substituição do AR nas propriedades físico-mecânicas e no avanço da frente de carbonatação das argamassas.
- b) Calcular e comparar a influência da granulometria e do percentual de substituição do AR no potencial de fixação de carbono.
- c) Analisar o impacto do emprego de AR nas propriedades microestruturais das argamassas.
- d) Avaliar a captura de CO_2 devido à carbonatação no balanço de emissões das argamassas produzidas.

2.3. Delimitações do trabalho

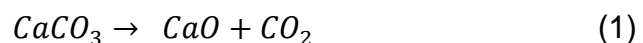
Não serão avaliados nessa dissertação aspectos como: variação da composição química e gravimétrica do agregado reciclado, resistência de aderência, carbonatação natural e ensaios de carbonatação a longo prazo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Impacto Ambiental e emissões de CO_2 na produção de argamassas

Para avaliar o passivo ambiental gerado pela produção das argamassas é necessário realizar uma revisão sobre o impacto individual da produção de cada uma das matérias primas, considerando somente emissões de CO_2 . Para além disso, avaliar o impacto geral considerando a proeminência de cada material no traço de argamassa.

O cimento Portland pode ser definido como um aglomerante hidráulico resultante da mistura de calcário e argila, calcinada em fornos [22]. A exploração das matérias primas acarreta em alguns passivos ambientais como desmoronamento e erosões ocorridas na extração de rocha calcária e assoreamento de leitos de rios e lagos para extração de argila [23]. A produção, em geral, ocorre dividida nas seguintes etapas: britagem das matérias primas, homogeneização, moagem, calcinação, moagem do clínquer, adição de componentes minerais e ensacamento. Mais especificamente, quando o assunto são emissões de CO_2 , a maior parte ocorre na calcinação da rocha calcária e no uso de combustíveis para a alimentação de fornos. A descarbonatação ocorre quando o CO_2 desprende-se do carbonato de cálcio como mostra a Equação 1. Estequiometricamente, 44% do produto dessa reação é composto por dióxido de carbono inerente ao processo.

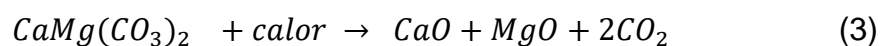
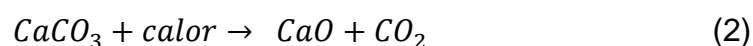


No Brasil, desde 2018, são aceitos cimentos com maiores percentuais de produtos que substituem o clínquer [8]. Com isso, é possível diminuir a pegada de carbono associada ao material. Entretanto, a maior parte dos materiais a serem usados como substituição são subprodutos de outras indústrias. De acordo com os dados publicados pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas, a indústria

do cimento é responsável por aproximadamente 8% das emissões de CO_2 antropogênicas [24]. Esse valor corresponde a 90% das emissões associadas ao setor industrial [25]. Em 2019, foram produzidos no Brasil 28,9 milhões de toneladas de clínquer, usado como matéria prima base para a produção de cimentos [5]. Com isso, foram emitidos em média 24 toneladas de CO_2 .

A cal é um produto de extrema versatilidade e é utilizada em diversas atividades, tanto em sua forma virgem (CaO) quanto em sua forma hidratada ($Ca(OH)_2$). É amplamente aplicada pela construção civil, indústria do cimento, usos agrícolas e de cunho ambiental [26]. A produção mundial de cal está concentrada em países cujos índices de emissões são alarmantes, como China e Estados Unidos. Apenas o país asiático foi responsável, de 2006 a 2016, por 63,8% do aumento de emissões globais de CO_2 [27]. Com o crescimento da infraestrutura urbana, 71,2% da fabricação mundial de cal em 2020 ocorreu em território chinês [28].

O processo produtivo da cal virgem ocorre a partir das seguintes etapas: mineração da rocha calcária, britagem, calcinação e moagem [29]. A etapa que é responsável pela maior parcela de emissões é a calcinação da rocha calcária, onde busca-se realizar o desprendimento entre o CO_2 e os óxidos de cálcio (para cales calcíticas) e magnésio (para cales dolomíticas), como mostram as Equações 2 e 3. Assim como ocorre na produção de cimento, boa parte do produto é composto por dióxido de carbono.



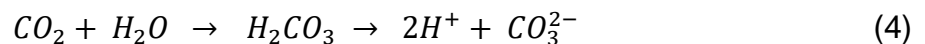
Essa decomposição térmica dos carbonatos ocorre em fornos que necessitam de altas temperaturas (900 a 1200°C). O impacto associado à etapa de calcinação depende também do tipo de forno utilizado, sua tecnologia, eficiência e tipo de combustível. No caso de cales hidratadas, adiciona-se o processo de hidratação em água para converter os óxidos de cálcio e magnésio em hidróxidos, cuja aplicação é ampla na construção civil [29].

Como extremos tecnológicos e de eficiência produtiva e ambiental, tem-se os fornos verticais de alvenaria (menos tecnológicos e menos eficientes) e os fornos de fluxo paralelo e regenerativo (alta tecnologia e eficiência) [29]. O uso de combustíveis alternativos como resíduo de madeira plantada e biomassa são opções para colaborar positivamente com o balanço de emissões do processo produtivo das cales. Em 2014, aproximadamente 43% do combustível utilizado era coque de petróleo, seguido por 40% lenha e 12% gás natural [29]. Na Europa, aproximadamente 90% da energia consumida na fabricação das cales é utilizada no processo de calcinação da rocha calcária [26]. Para relizar o cálculo das emissões relativas às cales fabricadas no Brasil é necessário o uso da NBR 7175 [30], que define requisitos básicos para o uso de cal hidratada. Analisando diversas variáveis, as emissões podem ir de 419 a 694 kg CO_2 /t [29].

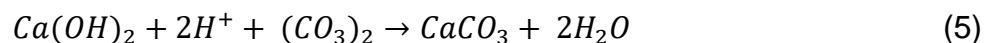
Considerando a região de Porto Alegre – RS, a extração de agregados naturais tem valores de emissões muito abaixo dos valores registrados na produção de cimento e cal. Desconsiderando a distância de transporte, a produção do agregado miúdo natural da região metropolitana da cidade conta com emissões de 4 kg CO_2 /t de agregado miúdo extraído, beneficiado e armazenado [31]. A mesorregião metropolitana de Porto Alegre conta com a mais elevada densidade populacional do estado e, para abastecer essa demanda, possui duas usinas de reciclagem de resíduo de construção e demolição, além de 44% dos processos de extração de agregado natural do estado [32]. Já a produção de agregados reciclados é composta pelos processos de britagem, separação e armazenamento. Nesse caso, chega-se a mediana de 5,19 kg CO_2 /t, desconsiderando as emissões de transporte [33]. Uma das principais vantagens da produção de AR em relação ao AN citada por Grabasck [32] é a diminuição significativa em outros indicadores de impacto ambiental que não as emissões de dióxido de carbono. O uso de materiais reciclados evitaria degradação de ambientes naturais e, conseqüentemente, seria menos oneroso à flora e fauna local.

3.2. Fixação de dióxido de carbono

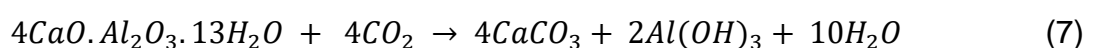
Carbonatação é definida como um processo físico-químico natural que ocorre na matriz de materiais à base de cimento. Para estruturas de concreto armado, o processo historicamente considerado prejudicial à durabilidade [3]. A carbonatação ocorre dentro dos poros capilares que estão preenchidos com uma solução alcalina. A solução consiste em cátions de sódio e potássio em equilíbrio com íons hidróxido, a presença de íons de cálcio é percebida em pequenas quantidades [34]. Logo, o pH alcalino da solução depende da presença de Na^+ e K^+ em equilíbrio com OH^- . O dióxido de carbono ao entrar em contato com a solução presente dentro dos poros capilares se dissolve formando ácido carbônico (H_2CO_3) que, conseqüentemente, contribui para a diminuição do pH. Essa reação é apresentada na equação 4.



Após essa reação, o hidróxido de cálcio dissolvido na solução reage com o ácido carbônico formado, resultando em carbonato de cálcio quimicamente estável precipitado e com baixíssima solubilidade (Eq. 5). A partir desse processo é possível perceber a diminuição considerável da presença de Ca^{+2} .



A ocorrência desse fenômeno acarreta a diminuição do pH do material cimentício (que é aproximadamente 12 em seu estado não-carbonatado). A diminuição do pH em estruturas de concreto, particularmente, é capaz de gerar a despassivação da armadura, cujo resultado é o início do processo de corrosão. A reação simplificada que ocorre entre o dióxido de carbono dissolvido em água e os produtos hidratados tais como hidróxidos de magnésio e cálcio, silicatos de cálcio hidratados e aluminatos de cálcio hidratados, resultando em carbonatos de cálcio e magnésio, estão apresentadas nas equações 6 e 7.



A carbonatação pode ser classificada em duas categorias. A primeira delas é a carbonatação natural (ou passiva) e a segunda é a carbonatação acelerada (ou ativa) [3]. O método ativo ocorre por meio de ambientes com grandes concentrações de CO_2 quando comparada à concentração atmosférica. Além disso, o processo pode ocorrer tanto no material já endurecido quanto nas primeiras idades. O método passivo ocorre em todas os materiais a base de cimento expostos a um ambiente onde haja atmosfera propícia para reações de mineralização. A rapidez e a eficiência do processo dependem de fatores internos (do material) e externos (do ambiente de exposição).

A contínua ação da carbonatação acarreta diversas modificações na microestrutura do material, além da diminuição da alcalinidade ($pH < 9,0$), tornando as estruturas armadas susceptíveis à ação da corrosão. Entretanto, a formação de carbonatos de cálcio densifica a matriz podendo, inclusive, melhorar propriedades físicas e mecânicas a partir do preenchimento de vazios. Esse preenchimento ocorre em virtude da diferença de volume entre o hidróxido de cálcio e o carbonato de cálcio. Desta forma, para peças não armadas a reação pode ser considerada benéfica com determinadas condições experimentais de controle [20]. O mecanismo de difusão é o principal responsável pela penetração do CO_2 e ocorre da parte mais externa para a mais interna dos materiais. Na figura 3.2.1 é possível observar a mudança de pH de acordo com a profundidade carbonatada.

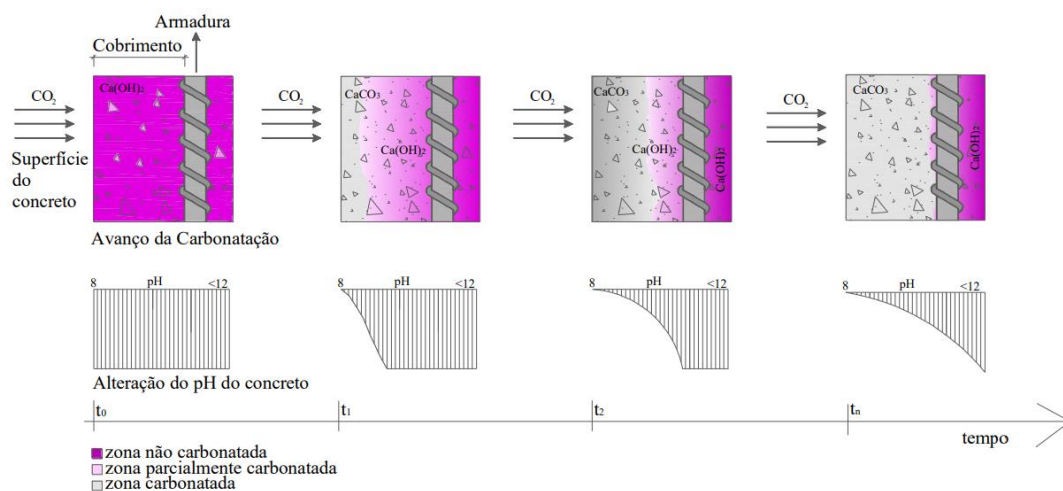


Figura 3.2.1 Avanço da frente de carbonatação em estrutura de concreto armado [35]

Uma das principais variáveis que influenciam no potencial de captura de CO_2 é a área de contato do material com o ambiente e, por esse motivo, se torna interessante o estudo em argamassas de revestimento. Pode-se demonstrar, através da modelagem matemática da captura de CO_2 , que após o período de demolição das estruturas o material tem um incremento exponencial na absorção de CO_2 por m^3 [9]. O potencial pode ser aumentado em até cinco vezes após a demolição da estrutura, devido ao aumento da superfície de contato do material com o ambiente, como mostrado esquematicamente na Figura 3.2.2.

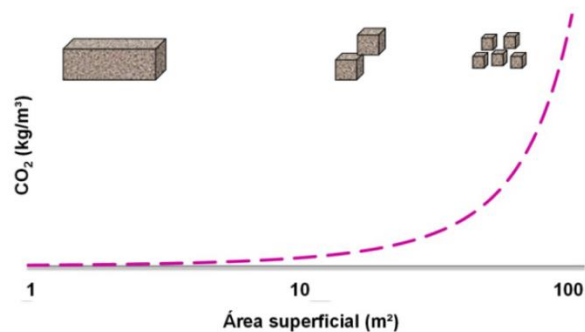


Figura 3.2.2 Relação entre potencial de captura e área superficial [36]

A captura de dióxido de carbono por meio do processo de carbonatação natural dos materiais cimentícios satisfaz critérios que tornam o processo tecnicamente e economicamente viável. Quando fala-se sobre armazenamento por meio da carbonatação do hidróxido de cálcio fala-se sobre uma reação possível em uma quantidade enorme de material produzida todos os anos, além de ser uma reação de baixo custo, baixa mobilização de energia e tecnologias, promovendo a estabilidade química dos compostos envolvidos além de melhorar a microestrutura dos materiais [37]. Além da captura de CO_2 no concreto no estado endurecido, é possível realizar a cura carbônica dos materiais cimentícios promovendo benefícios como: aceleração da resistência, melhora nas características de durabilidade devido a densificação da microestrutura e a estabilização de agregados reciclados pré-carbonatados [38].

Debates sobre o potencial de sequestro das argamassas são bastante difundidos pela literatura, verificando-se que não é possível chegar a um número final, pois existem diversas variáveis que afetam o processo. De acordo com Xuan [39] é

possível reabsorver de 27,05% a 31,23% do que foi emitido na descarbonatação da rocha calcária por meio da carbonatação de materiais cimentícios em condição de câmara de carbonatação. Já Andrade *et al.* [40] afirmam que é possível, a partir da carbonatação natural e a longo prazo, armazenar até 60% do dióxido de carbono produzido para fabricação das argamassas. É necessário, ao fazer análises a respeito do balanço de emissões, considerar a vida secundária do material após o processo de demolição e reciclagem. De acordo com Collins *et al.* [41] caso a vida secundária do material seja ignorada é possível que o valor final do balanço seja superestimado entre 13% a 48%.

3.3. Resíduo de Construção e Demolição

Akhtar e Sarmah [42] afirmam que a extração das matérias-primas pode ter diversas consequências, tais como: ocasionar a escassez de recursos naturais, deteriorar a paisagem, prejudicar ecossistemas e contaminar água, solo e ar devido às emissões da produção e manuseio de materiais de construção. Assim como as demais indústrias, a construção civil lida com diversos subprodutos e resíduos gerados a partir de suas atividades. Dentro da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), publicada em 2010, encontram-se diversas diretrizes com o objetivo de manter uma gestão responsável dos resíduos buscando o desenvolvimento sustentável. Em conjunto com a Política Nacional de Resíduos Sólidos está a resolução nº 307 do CONAMA [43] que trata especificamente sobre resíduos de construção e demolição (RCD). Tal resolução estabelece diretrizes, critérios e procedimento para melhor gestão do RCD buscando benefícios de ordem social, econômica e ambiental. Pode-se definir RCD como sendo os materiais provenientes de todos os tipos de procedimentos executados no setor da construção civil desde concepção dos projetos até as obras de demolição. Além disso, também são considerados RCD resíduos de escavação bem como tintas, vidros, cerâmicas, resinas, telhas, gessos, pavimentos, tubulações e fiações elétricas. Dada a variedade de materiais encontrados dentro do RCD, foram elencadas categorias de resíduos cuja composição de interesse para fins de reaproveitamento nas construção encontra-se na classe A. As categoriais existentes estão apresentadas no Quadro 3.3.1.

Quadro 3.3.1 Classes de resíduo de construção e demolição [43]

Classe de Resíduo	Descrição
A	Reutilizáveis ou recicláveis como agregados oriundo de construções, demolições, reformas ou reparos tais como resíduos de concreto, cerâmicas, argamassa, pavimentação e terraplanagem
B	Resíduos recicláveis ou reutilizáveis para outras destinações como plásticos, papéis, metais, vidros, madeiras e gesso
C	Resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias que tornem viável sua reutilização ou reciclagem
D	Resíduos perigosos tais como tintas, solventes, óleos e materiais oriundos de demolições de área radiológicas, instalações industriais ou materiais com a presença de amianto ou qualquer outro produto nocivo à saúde

Resíduos classe A são aqueles com viabilidade técnica para utilização como agregado reciclado cujos critérios são definidos pela Resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente [43]. É importante ressaltar que o processo de reciclagem é definido como a utilização de um material que foi submetido ao beneficiamento com conseqüente mudança de função. Já o beneficiamento é definido como o ato de submeter o resíduo a alguma operação ou processo que torne seu uso viável. O material classe A é beneficiado com o objetivo de possibilitar a sua reciclagem. Como a legislação brasileira prevê que os geradores de resíduos (tanto pessoa física quanto jurídica) são responsáveis pela sua disposição, é de interesse coletivo que se busquem alternativas que viabilizem o uso desse material e, conseqüentemente, diminuam o uso de agregado natural.

A partir dos estudos de Paz *et al.* [44] foi possível concluir que, no Brasil, cerca de 90% de todo o RCD tem capacidade de reciclagem. Porém, de acordo com Ferreira *et al.* [45] apenas 6,14% do RCD coletado é reciclado. A indústria da construção é um dos principais pilares da economia brasileira e representa 14% do produto interno bruto do país. Por esse motivo, é necessário que tal setor esteja cada vez mais alinhado com os conceitos de reutilização e reciclagem. MacArthur *et al.* [46] definem os pilares da Economia Circular como sendo: uso máximo de produto em ciclos de vida longos, criação de produtos com diferentes funções, restituição de resíduos sólidos à indústria, produtos remanufaturados com valor competitivo de

mercado bem como uma abordagem sistêmica para gestão da cadeia produtiva visando o aproveitamento energético. De acordo com Silva *et al.* [47] existem 7 principais barreiras para o uso comercial em larga escala do agregado reciclado. Tais barreiras estão representadas na Figura 3.3.1.



Figura 3.3.1 Barreiras para o uso de agregado reciclado [47]

As políticas públicas de gestão de resíduos no Brasil são recentes quando comparadas com países como Estados Unidos e Alemanha, cujas legislações a respeito do tema foram publicadas na década de 80. De acordo com o EUROSTAT [48] 88% de todo RCD produzido na União Europeia foi beneficiado com o objetivo de ser aplicado em alguns dos fins passíveis de uso do material, em países como Irlanda, Malta e Holanda essa relação é de 100%.

O RCD que não é reciclado acaba em aterros sanitários ou em locais irregulares de disposição. A disposição ilegal de resíduos pode gerar diversos prejuízos ambientais tais como: bloqueio total ou parcial de cursos de rios; obstrução do sistema de drenagem urbana; poluição visual; proliferação de vetores de doenças e diversos problemas sociais já que é oneroso aos cofres públicos o recolhimento de um resíduo que é de responsabilidade privada. A utilização consciente dos agregados reciclados é capaz de gerar grandes benefícios econômicos, técnicos e ambientais como apresentado por Vinciguerra *et al.* [49], cujo trabalho avaliou a gestão de resíduos na obra do estádio Maracanã onde o material demolido durante a reforma foi transformado em agregado reciclado utilizado dentro do próprio processo. Nesse caso, 100% do concreto demolido foi reaplicado na obra em forma de agregado reciclado utilizado no sistema de drenagem.

O presente estudo visa auxiliar no que diz respeito ao benefício ambiental envolvido no processo de utilização do AR em argamassas e, além disso, determinar o potencial desse material na captura de CO_2 . Assim, busca-se romper a barreira dos benefícios ambientais incertos e demonstrar a qualidade e o potencial do uso do AR. Como agregado reciclado é constituído de materiais variados se faz necessária a subclassificação dos agregados. Nesse contexto, a NBR 15116 [50] classifica entre agregados reciclados de concretos (ARC) – que tem na sua composição no mínimo 90% de material constituído por concreto e agregados– e agregado reciclado misto (ARM) que é constituído por parcelas de argamassa, concreto e materiais cerâmicos. Ferreira *et al.* [45] explicam que o ARM é o menos utilizado pois apresenta maior variabilidade, maior absorção de água devido à presença de material cerâmico e encontra-se em estado em que é comum haver contaminação dos agregados. Apesar de ser o material menos utilizado, ele é o material mais abundante entre os tipos de RCD, e sua parcela fina é ainda mais abundante, pois todos os processos de beneficiamento e britagem de agregado reciclado geram uma parcela muito grande desse tipo de granulometria [51].

De acordo com Evangelista *et al.* [52] o agregado miúdo oriundo do ARM pode ter absorção de água de 4,3% até 13,3% maior quando comparado ao agregado natural. Além disso, o ARM também tem uma menor massa específica dependendo muito do material de origem. O material reciclado também é mais poroso, angular e irregular do que o natural. Tal porosidade dá ao agregado reciclado maior área superficial. De acordo com Fumoto [53] sua área superficial pode ser até 400% maior quando comparado ao agregado natural.

Le *et al.* [54] salientam que existem diversos métodos de demolição e diferentes maneiras de reciclar o RCD e, além disso, apresentam-se diversas possibilidades quanto à sua composição. Todos os fatores acima citados influenciam nas características do material e no comportamento quando incorporado a concretos ou argamassas. O autor explica que aproximadamente 50% de todo o AR obtido nos processos de britagem de RCD, tem sua granulometria correspondente a agregado miúdo. O aproveitamento do RCD como AR propicia que haja economia tanto pela compra de agregado natural quanto pelo transporte desse material até o local onde seria feita a disposição. Quando se trabalha com AR é importante que se tenha uma atenção especial ao processo de preparação para que as etapas envolvidas não propiciem o aumento do uso de energia e de combustíveis ao ponto de sobrepor os

benefícios ambientais do uso do agregado reciclado. Para fins gerais, o RCD pode ser armazenado, britado e utilizado no mesmo canteiro de obras. No processo de britagem normalmente tem-se como resultado diversas granulometrias diferentes de agregado que podem ser usados para os mais diversos fins dentro da indústria da construção civil. Durante a obra do estádio Maracanã para a copa de 2014 foram demolidos 42mil m³ de concreto e 100% desse concreto foi britado e transformado em materiais para reforço de subleito e para drenagem do entorno do estádio. Nesse caso, a britagem foi feita com o objetivo de obter granulometria de agregado graúdo e também para fazer a separação entre concreto e armaduras por meio de imãs [49].

3.4. Revisão bibliográfica Sistemática (RBS)

A revisão bibliográfica sistemática tem como objetivo ser uma ferramenta de análise de publicações recentes acerca de um tema específico, desse modo, é possível observar e analisar novas abordagens dentro desse período pré-definido. Segundo Sampaio [55], é necessário determinar websites de pesquisa diversificados e significativos para a área da ciência de interesse visando englobar maior conteúdo. Para a realização da RBS quando o assunto é captura de CO₂ em argamassas e uso de agregado reciclado nesses materiais, optou-se pelos seguintes websites de pesquisa:

Engineering Village – Conta com ferramentas de pesquisa, análise e navegação de que os engenheiros precisam para gerar pesquisas de maneira eficiente e avaliar o impacto e a relevância de informações críticas [56].

Science Direct – Conta com mais de 16 milhões de artigos e é uma das maiores ferramentas de busca de artigos para diversas áreas de conhecimento [57].

Scopus – Combina um banco de dados abrangente com citações e resumos com dados enriquecidos e conteúdo acadêmico vinculado [58].

Web of Science – Uma Plataforma que fornece acesso a índices de citações multidisciplinares e regionais [59].

A pesquisa foi realizada utilizando palavras-chave em inglês para que fosse possível obter resultados com origens em diversos países diferentes. A primeira etapa

da pesquisa foi feita utilizando a abreviação “CDW” que significa *Construction and demolition waste* objetivando uma visão geral sobre a produção científica a respeito do tema. Após, a pesquisa foi feita utilizando o termo “CDW and mortar” para avaliar o uso específico de agregado reciclado em argamassas. A terceira etapa utilizou o termo “CO₂ uptake” para observar a produção científica a respeito da captura de carbono e a última, e mais importante etapa, utilizou o termo “CO₂ uptake and mortar and CDW”. Foi definido um período fixo para as buscas de 2011 a 2021. Com o objetivo de gerenciar com maior agilidade os artigos selecionados foram utilizados os Softwares *Mendeley Desktop* e *Endnote*. Além disso, foram aplicados filtros relacionados às áreas do conhecimento, foram utilizadas as áreas “*Environmental Science*”, “*Engineering*” e “*Materials Science*”.

Tabela 3.4.1 Resultados de todas as etapas e a seleção final da revisão bibliográfica sistemática

Base de dados	CDW	CDW and mortar	CO ₂ uptake	CO ₂ uptake and mortar and CDW	Seleção final
<i>Science Direct</i>	4.103	503	13.572	586	20
<i>Engineering village</i>	1.249	27	4.368	15	3
<i>Scopus</i>	2.182	44	8.129	18	0
<i>Web of Science</i>	2.205	63	11.000	32	6
Total	9.739	637	37.069	651	29

Na Tabela 3.4.1 é possível perceber, a partir do número de resultados nas buscas, que os temas relacionados à captura de carbono são mais recorrentes do que os temas voltados ao uso de resíduo de construção e demolição. Isso deve-se a multidisciplinaridade dos estudos a respeito dos métodos de uso e armazenamento de carbono, é possível encontrar trabalhos sobre o tema nas áreas de biológica, química, engenharia civil, engenharia ambiental, engenharia química e agronomia. Foi possível perceber, analisando os anos de publicação dos artigos, uma crescente no interesse internacional a respeito tanto do tema dos resíduos quanto do tema da captura de carbono como mostram as Figuras 3.4.1 e 3.4.2 elaboradas no trimestre de 2021 a partir dos resultados das buscas na base de dados *Science Direct*.

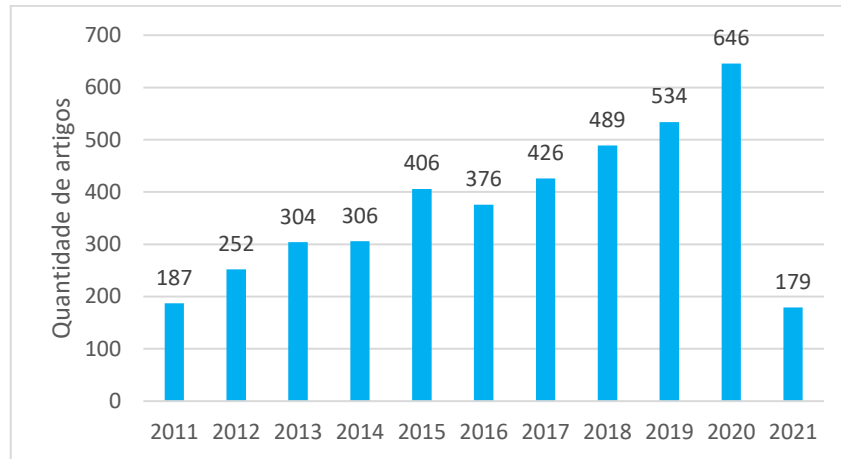


Figura 3.4.1 Número de resultados na busca da palavra-chave “CDW” no banco de dados *Science Direct*

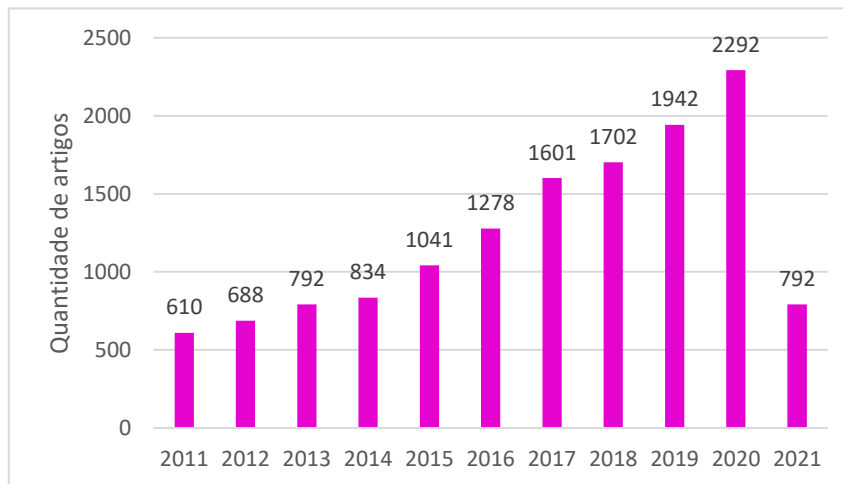


Figura 3.4.2 Número de resultados na busca da palavra-chave “CO₂ uptake” no banco de dados *Science Direct*

Em ambas as situações é possível notar o aumento de interesse na comunidade científica em estudar soluções para melhor gerir e conciliar as tecnologias com as demandas ambientais cada vez mais importantes, tanto econômica quanto tecnicamente. Quando analisada a busca das palavras-chave combinadas nota-se a diminuição drástica do número de resultados devido à dificuldade de encontrar trabalhos que unam a captura de carbono com o uso de agregados reciclados em argamassas, especificamente. Diversos artigos ao longo do processo para seleção final foram excluídos por tratar-se de trabalhos voltados para análises de ciclo de vida sem o foco nos materiais e suas propriedades. Artigos que tratavam da cura carbônica sem realizar a medição da captura de carbono dos corpos de prova também foram

excluídos da seleção final. Na segunda seleção foram excluídos artigos repetidos e foram adicionadas as palavras-chave em uma única busca. A partir disso foram selecionados 29 artigos distribuídos geograficamente como mostra a Figura 3.4.3.

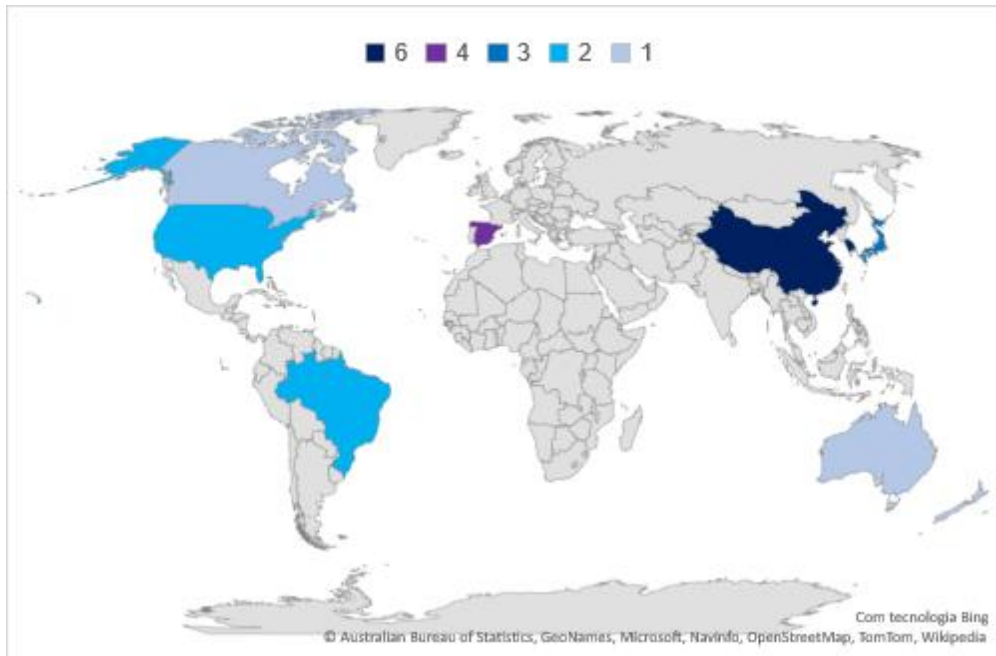


Figura 3.4.3 Distribuição geográfica dos artigos da seleção final

Nota-se uma quantidade expressiva de artigos com autoria em países do leste asiático como Coréia do Sul, China, Japão e Hong Kong além da presença de países da Oceania como Austrália e Nova Zelândia. Na América nota-se a presença de Brasil, Canadá e Estados Unidos. O continente europeu está representado por 4 artigos provenientes da Espanha. Tais dados estão diretamente relacionados com o aumento gradativo do uso de RCD nesses países além do desenvolvimento econômico e de infraestrutura urbana. Na Figura 3.4.4 é possível observar os ensaios, as técnicas de caracterização e as propriedades avaliadas pelos autores dos artigos selecionados.

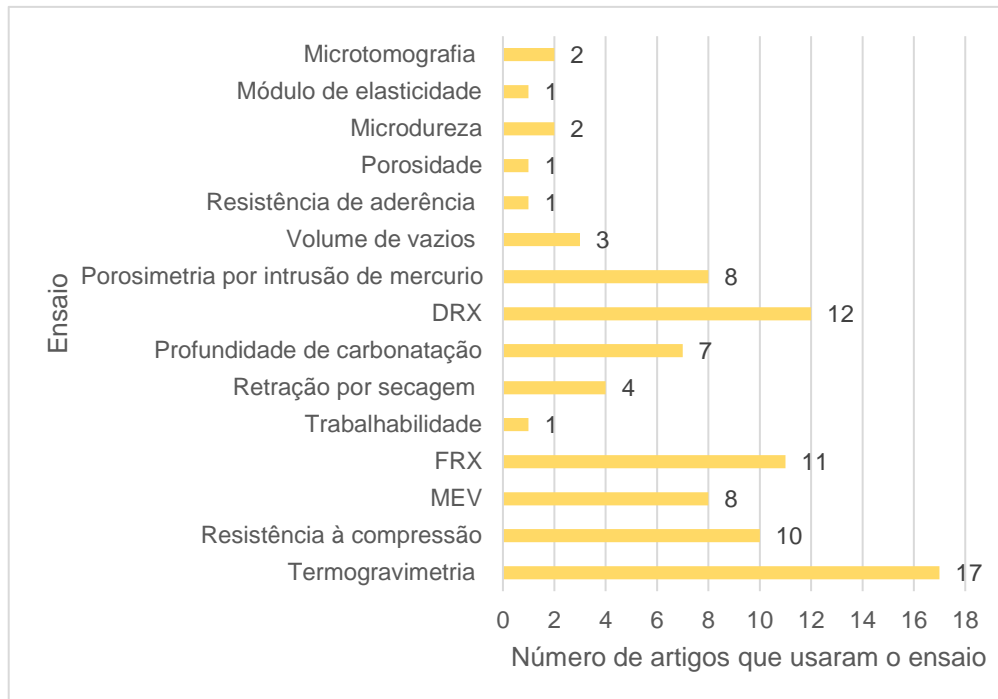


Figura 3.4.4 Ensaios utilizados nos artigos selecionados

Percebe-se que a maior parte dos 29 artigos utilizou a termogravimetria (TGA) para analisar o potencial de captura de CO_2 , por se tratar de um método quantitativo e de maior precisão. Devido ao uso de agregados reciclados ou adições minerais todos os artigos tinham algum tipo de caracterização química desses componentes não convencionais através de DRX e/ou fluorescência de raios X. Além disso, houve uma quantidade expressiva de trabalhos que utilizaram a microscopia eletrônica de varredura (MEV) para observar a microestrutura do material e sua alteração quando adicionado algum material não convencional. A porosimetria por intrusão de mercúrio foi utilizada para observar a distribuição e o tamanho dos poros. Nesse projeto, baseada nas tendências da literatura bem como nos objetivos específicos foram adotados ensaios mecânicos e físicos para caracterização da capacidade técnica das argamassas com RCD bem como o uso de TGA e microtomografia de raios X para observar características de captura de carbono, porosidade e microestrutura. Depois de lidos e analisados todos os artigos da seleção final selecionou-se 5 por terem trabalhos mais completos, com método claro e com uso de materiais ou técnicas mais precisas.

Quadro 3.4.1 Artigos selecionados para análise detalhada

Autores	Artigo	Ano de publicação
Dongxing Xuan, Baojian Zhan, Chi Sun Poon e Wei Zheng	<i>Innovative reuse of concrete slurry waste from ready mixed concrete plants in construction products</i>	2016
Miguel Angel Sanjuan, Esteban Estávez e Cristina Argiz	<i>Carbon dioxide absorption by blast-furnace slag mortars in function of the curing intensity</i>	2019
Sung-Hoon Kang, Yang-Hee Know e Juhyuk Moon	<i>Quantitative analysis of CO₂ uptake and mechanical properties of air lime-based materials</i>	2019
Carlos Moro, Vitor Francioso e Mirian Velay-Lizancos	<i>Modification of CO₂ capture and pore structure of hardened cement paste made with nano-TiO₂ addition: influence of water-to-cement ratio and CO₂ exposure age</i>	2021
Chaofeng Liang, Bihao Pan, Zhiming Ma, Zhihai He e Zhenhua Duan	<i>Utilization of CO₂ curing to enhance the properties of recycled aggregate and prepared concrete: a review</i>	2020

O trabalho de Xuan *et al.* [39] destaca-se pelo uso de dois resíduos diferentes sendo o primeiro o resíduo de concreto usinado (RCU), utilizado como aglomerante, e uso de resíduo fino reciclado (RFR) como agregado miúdo para a produção de blocos de alvenaria estrutural. Nessa pesquisa foi avaliada a viabilidade técnica dos materiais e a captura de carbono da mistura que respeitava a proporção 1:4:0,5 de RCU, RFR e cimento, respectivamente. Os blocos produzidos apresentaram captura de CO₂ de 27,05% a 31,23% dependendo da relação água-cimento utilizada. Os blocos foram submetidos à carbonatação acelerada através de câmara pressurizada. O autor utilizou o método teórico, a partir de estequiometria,

para avaliar a captura de CO_2 dos blocos analisados. Ao final, foi possível atestar a viabilidade técnica do uso desses resíduos para a produção de blocos destinados à alvenaria estrutural.

No artigo publicado por Sanjuan *et al.* [60] destaca-se o uso de carbonatação natural durante um período de 2 anos. Nessa pesquisa foi utilizada escória granulada de alto forno (EAF) juntamente com o cimento em argamassas. O artigo concluiu que o uso de EAF tem viabilidade técnica para uso em argamassas e aumenta substancialmente a captura de CO_2 do material. Além disso, foi avaliada a influência do tempo de cura, variando de 0 a 28 dias. Os corpos de prova submetidos a menos de 1 dia de cura úmida com 62,2% EAF, seguido de 2 anos de carbonatação natural tiveram um coeficiente de carbonatação de 5,8mm/ano, substancialmente maior do que o coeficiente de 1mm/ano apresentado pelo corpo de prova de referência que esteve submetido a 28 dias de cura úmida e não tinha a presença de EAF.

No artigo de Kang *et al.* [61] os autores utilizaram cimento com cal e sílica ativa para avaliar a influência da sílica na captura de CO_2 das argamassas. Para isso, foi feito o ensaio de termogravimetria. Foi realizado o ajuste de consistência para determinar o percentual de água necessária para alcançar a trabalhabilidade necessária. Concluiu-se que o uso de sílica ativa melhora as propriedades mecânicas, mas diminui em 7% o potencial de captura de CO_2 especialmente devido à diminuição da porosidade.

Moro *et al.* [62] utilizaram nanopartículas de óxido de titânio em percentuais de 0,5%, 1% e 2% combinadas com 3 relações água-cimento. Os autores concluíram que a adição de óxido de titânio diminuiu a porosidade das pastas, porém aumentou a reatividade do hidróxido de cálcio. Foram feitos ensaios de termogravimetria com as mesmas condições de ensaio apresentadas por Kang *et al.* [61], nesse ensaio observou-se o aumento da captura de carbono até certo ponto onde então a captura passou a diminuir. Concluiu-se que quanto maior a relação água-cimento maior é a porcentagem de óxido de titânio necessária para atingir a captura máxima. Além disso, os autores fizeram ensaios de microtomografia para avaliar a porosidade e a interligação dos poros antes e depois do processo de carbonatação, com isso pode-se ver, por meio de modelos 3D, que o processo de carbonatação e a incorporação

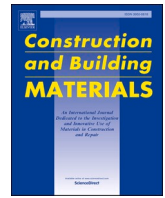
de óxido de titânio são capazes de diminuir a porosidade do material substancialmente.

Liang *et al.* [63] realizou uma pesquisa de revisão a respeito do tema do impacto do uso de cura carbônica em agregados reciclados e concretos feitos com material reciclado. Os artigos pesquisados evidenciaram a possibilidade de melhoria das características físicas, químicas e microestruturais desses materiais quando expostos ao dióxido de carbono. Além disso, os artigos mostram que não só é possível realizar a captura de carbono desses materiais como também é possível melhorar suas características por meio desse processo (quando não há a presença de armaduras). De acordo com os autores, o uso em argamassas de revestimento seria a aplicação mais produtiva pois alia um material com grande porosidade (quando comparado com o concreto) e grande superfície de contato com o meio ambiente.

A partir da revisão bibliográfica sistemática foi possível observar as tendências encontradas na comunidade científica e o crescente interesse pelo tema. Com isso, foram determinados os materiais a serem utilizados e o método de produção e análise de resultados.

4. MATERIAIS E MÉTODOS: ARTIGO

Os materiais utilizados no projeto, o método adotado, os resultados obtidos e suas devidas discussões estão apresentadas em forma de artigo que foi publicado na revista *Construction and Building Materials*.



Mortars with recycled aggregate of construction and demolition waste: Mechanical properties and carbon uptake

Pietra Moraes Borges^{a,*}, Jéssica Zamboni Schiavon^a, Sérgio Roberto da Silva^a, Eduardo Rigo^b, Alex Neves Junior^c, Edna Possan^d, Jairo José de Oliveira Andrade^a

^a Graduate Program of Materials Engineering and Technology, Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul (PGETEMA/PUCRS), Brazil

^b Graduate Program of Civil Engineer, Federal University of Paraná (UFPR), Brazil

^c Engineering Department, Federal University of Mato Grosso (UFMT), Brazil

^d Graduate Program of Civil Engineering, Federal University of Latin American Integration (UNILA), Brazil

ARTICLE INFO

Keywords:

C&D Waste

Mineralization

Physical-mechanical properties

Microstructural analysis

Carbon dioxide capture

ABSTRACT

Over the past few years, the use of recycled aggregate (RA) from construction and demolition waste (CDW) has proved to be a promising alternative for increasing the concept of a circular economy within the construction industry. RA contributes to an adequate destination for these wastes besides minimizing the use of natural aggregates (NA). Carbonation also has proved to be a promising alternative to carbon capture, use, and storage. This work aims to evaluate the substitution influence of NA for RA in replacement levels of 0, 25, 50, 75, and 100% with three different particle size distributions to evaluate the particle size influence. Compressive and tensile strength in bending, porosity, absorption, and bulk density were performed to evaluate physical-mechanical properties. The accelerated carbonation test and thermogravimetric analysis were carried out to evaluate the carbon uptake. X-ray microtomography test was carried out in addition to XRD analysis to assess the influence on microstructural properties. The particle size distribution interferes with the results, where washing the aggregate does not significantly improve the investigated properties. The mortar with the optimized properties contained particles between 2.4 mm and 0.15 mm (G2.4). The less emissive mortar was G2.4_100, which reabsorbs 63% of all the carbon dioxide released in production. The mortars with 100% replacement have a less emissive balance, and the replacement level increases the amount of CO₂ captured. Cement-based mortars produced with RA can be an alternative for carbon capture due to mineralization from carbonation, promoting the circular economy using RA from CDW.

1. Introduction

The latest Climate change report [1] explains that an unbalance can be seen in every region and across all the climate systems. Some changes are irreversible for hundreds to thousands of years. Reducing carbon emissions and increasing carbon dioxide capture are essential means to avoid a steep increase in the effect of climate change [2]. Greenhouse gases are one of the main ones responsible for the possibility of life on Earth. The greenhouse effect is a natural process to ensure the planet's warming and balance several biotic and abiotic systems. Although, with the industrial era, anthropogenic emissions significantly increase the global warming process, making it worrisome. The most important greenhouse gases are carbon dioxide (CO₂), methane, nitrous oxide,

chlorofluorocarbons, steam, and ozone. CO₂ becomes exceptionally important when found that it is responsible for 76% of the global warming process, with a lifetime in the atmosphere of hundreds of years. Since the industrial era, a 49% increase in atmospheric CO₂ concentration has been recorded, going from 280 ppm to 419.2 ppm in 2022 [3]. The exponential increase fuels the climate change process, which can have consequences such as changes in precipitation patterns, more frequency and more extended periods of drought, melting of polar layers from around the world, difficulties in food production, changes in the air relative humidity, extinction of flora and fauna, among other problems [4]. The world cement industry is responsible for approximately 8% of anthropogenic emissions. The most significant causes of these emissions in cement production are limestone carbonation and using fossil fuels in

* Corresponding author.

E-mail addresses: pietra.borges@acad.pucrs.br (P.M. Borges), jessica.schiavon@acad.pucrs.br (J.Z. Schiavon), sergio.roberto@acad.pucrs.br (S.R. da Silva), eduardorigo.e@gmail.com (E. Rigo), alexnevesjr@gmail.com (A. Neves Junior), epossan@gmail.com (E. Possan), jairo.andrade@pucrs.br (J.J.O. Andrade).

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131600>

Received 11 May 2022; Received in revised form 8 April 2023; Accepted 28 April 2023

Available online 8 May 2023

0950-0618/© 2023 Elsevier Ltd. All rights reserved.

the oven [5]. In Brazil, are issued on average 832 kg.CO₂/t of clinker, and 609 kg.CO₂/t of cement production [6]. The national reality still had a cement production of 42.4 million tons in 2019. Approximately 55% of all cement produced in Brazil (23.3 million tons) is applied in mortar manufacture [7]. For countries in economic development, like Brazil, cementitious materials are necessary for essential urban and industrial infrastructure expansion. Seeking to mitigate environmental impact, in 2009 it was published the Cement Industry Roadmap where there are methods and goals for reducing environmental impact. The main goals are an improvement for less emissive materials and energy efficiency, use of alternative fuels, reduction of clinker content in cement, and technologies of carbon capture, use, and storage [8].

Civil construction is responsible for approximately 50% of the world's raw materials consumption. When the subject is aggregate, 40 billion tons are applied annually worldwide [9,10]. Brazilian Ministry of Mines and Energy [11] claims that were consumed, in 2017, 294 million tons of natural sand, mostly from riverbeds. The dredging process can directly affect the environmental balance of an ecosystem [12]. On the other side of the problem, according to the Brazilian Association of Public Cleaning Companies and Special Residues [13] were collected in Brazil in 2019, 44.5 million tons of CDW just in public areas, just in the Rio Grande do Sul, Brazilian state, the production of waste is 4.4Mt/year. Brito [14] explains that recycled aggregate can be applied in the construction industry in different ways, as a subgrade reinforcement, base and sub-base of highways, as a base for thin concrete, dredging material, and in the production of new cementitious materials such as concrete and mortar. The irregular discharge of CDW can cause environmental damage and become financially burdensome since it has commercial use [15]. The use of recycled aggregates (RA) from construction and demolition waste (CDW) as a method of replacing the natural aggregates (NA) can increase the carbon capture potential by the presence of carbonatable materials and the raised surface area after demolition and crushing [16].

Changes in particle size distribution and the contribution of modifications in mechanical properties have been studied massively. However, the carbon capture associated with these modifications is still being studied [16-20]. The powder, abundant in recycled aggregate production, is responsible for filling the pores and, consequently, promotes improvements in durability, bulk density, and mechanical properties like compressive and tensile strength. Ferreira [17] studied the role of powder content in mortar properties with RA of CDW. Higher powder content could densify the matrix and increase water absorption due to greater RA water absorption and higher surface area. The same physical explanation is applied in cementitious materials with silica fume, which fill the pores, improving microstructural and mechanical properties [18]. Different distributions could improve the amount of CO₂ by promoting changes in pore quantity, interconnectivity and distribution, and more alkaline reserve in higher surface area for the modifications in particle size of RA.

Carbonation is a chemical-physical reaction that happens naturally or intentionally, as in carbonic cure, where the hydration products of cement-based materials react with CO₂ to form thermodynamically stable carbonates [21-28]. Several factors can affect the material's capacity, specifically mortars, to absorb carbon dioxide. Factors like cement proportion in the mortar, cement type, aggregate type, surface in contact with the atmosphere, relative humidity, CO₂ concentration, and the presence or type of coating material [25]. Since the 1970 s, carbonation has been studied as a pathology problem that can cause rebar depassivation, making it susceptible to corrosion. However, in the early 21st century, several researchers claim carbonation potential in cement-based materials without reinforcement [22,23,29,30]. Furcas [31] states that cement mortars could capture up to 26.4 g CO₂/kg. Andrade [16] measured carbon uptake of 70 g to 50 g CO₂/m² of mortar in exterior and interior areas. Mazurana [21] concluded that mortars with 100% RA captured 165.34kgCO₂/m³ and 53.4 kgCO₂/m³ for materials with 100% NA. Also, the author analyzes the difference between

mortars with or without limestone. Materials with limestone tend to capture approximately 42.3kgCO₂/m³ more. This increase relates to the amount of carbonatable materials in the limestone's chemical composition. In physical-mechanical tests, all the authors cited had achieved satisfactory performance with their mortars according to national standards.

Regarding the use of fine particles from CDW, it is necessary to increase the knowledge about the waste before they can be widely used in cementitious materials [32]. The literature reports that the mechanical properties of mortars with RA decrease due to old mortar adhering to the aggregate surface. However, few papers have found solutions to improve the materials' properties, such as an attempt to remove old mortar adhered to its surface [33]. This work contributes to analyzing the effect of using different particle size distributions of RA in coating mortars' carbon capture. Based on mechanical, physical, chemical, and thermal analysis, this study aims to evaluate the use of RA from CDW in three different particle size distributions on the physical-mechanical properties and to calculate the amount of carbon captured through the carbonation process. The paper aims to address the following research questions: (1) Is RA technically suitable to be used in mortars, and how much can be incorporated? (2) Which mixture results in the best carbon dioxide uptake? (3) What does the emission balance of these mortars look like? (4) Which particle size distribution achieves the best result? The novelty of this work is the evaluation of the particle size influence in carbon capture, enabling the production of less emissive mortars with simple technology.

2. Experimental procedure

2.1. Materials

Mortar samples were prepared using Brazilian Portland cement CPV-ARI, similar to ASTM C 150 III, with a specific surface of 3.14 g/cm³. The limestone used was the Brazilian CHIII type with a specific surface of 2.43 g/cm³ and bulk density of 0.63 g/cm³. The NA used has quartz sand. The RA was prepared from CDW processing, collected from a building site in Porto Alegre, Brazil, and classified using a mechanical crusher. The gravimetric composition of the CDW consisted of 40.6% mortar, 28% ceramics, 19.6% basaltic coarse aggregate, and 11.8% of different materials such as paper, wood, and plastic, which were excluded to keep just the class A material according to Brazilian Law from National Environmental Council [34], the material applicable as recycled aggregate. The semi-quantitative chemical analysis of the X-ray fluorescence of cement, limestone, and RA is presented in Table 1.

The natural and recycled fine aggregates were evaluated according to the bulk density [35], fineness modulus and maximum size [36], apparent specific gravity, and water absorption for fine aggregate [37] (Table 2). One sample of recycled aggregate was applied in this search; therefore, the RA variability is not a research object.

The variation in the physical properties of RA can be explained primarily due to its origin, considering the variability of all materials used in many construction methods and their properties. The particle size distribution of RA and NA before the sieve is presented in Fig. 1, and a photograph of the recycled aggregate is shown in Fig. 2.

Three different particle size distributions of RA were used to evaluate the influence of varying particle sizes. The first particle size represents all sieve sizes from 4.8 mm (called G4.8); the second one consists of particles contained between 2.4 mm and 0.15 mm (G2.4) sieves, and the third had the particles between sieves 2.4 mm and 0.15 mm, this RA type was washed aiming to remove the fine particles of the sample (G2.4 W). Ferreira [17] used identical particle size distributions in coating mortars. X-ray diffraction (XRD) of all materials used in this investigation was performed using a Shimadzu model XRD 7000. The variable used to construct the graph was the 2θ angle (horizontal axis), with the scanning angle ranging from 10° to 100° at a speed of 2°/min. The results showed the presence of quartz, calcite, albite, and magnetite as crystalline

Table 1
X-Ray fluorescence for Portland cement, limestone, and RA.

Materials	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃	Na ₂ O	LOF
Portland cement	17.78	3.92	61.96	4.08	0.78	3.28	0.01	5.42
Limestone	17.35	0.15	42.38	26.51	<QL	<QL	<QL	27.52
RA	58.11	10.01	11.57	2.10	1.67	0.38	0.61	10.78

Where QL = Quantifiable limit and LOF = Lost on fire.

Table 2
Natural and recycled aggregates properties.

Properties	Fine aggregate	
	NA	RA
Maximum size aggregate (mm)	4.75	4.75
Fineness modulus	1.62	2.18
Specific gravity (kg/dm ³)	2.63	2.38
Bulk density (kg/dm ³)	1.61	1.34
Water absorption (%)	0.4	8.1

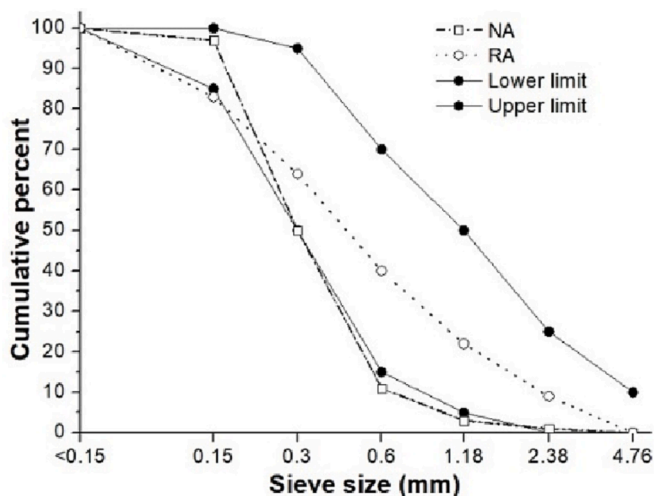


Fig. 1. Aggregates particle size distribution.

phases in the entire RA sample (Fig. 3).

2.2. Mix proportioning

The mortar mixtures were proportioned for workability between 260 ± 10 mm with different w/c ratios varying according to the water

necessary to achieve the proposed workability (Table 3). RA used five replacement levels of NA (0, 25, 50, 75, and 100%) in mass. RA was incorporated dried, leading to the difference in w/c ratio to achieve the same consistency. Due to the difference in the specific mass between the NA and RA, the volume compensation method suggested by Lovato [24] was used based on Equation (1).

$$M_{RA} = M_{NA} \times \frac{\gamma_{RA}}{\gamma_{NA}} \tag{1}$$

where M_{RA} = recycled aggregate mass, in kg; M_{NA} = natural aggregate mass, in kg; γ_{RA} = recycled aggregate bulk density, in kg/dm³; γ_{NA} = natural aggregate bulk density, in kg/dm³. The mixtures obtained are presented in Table 3.

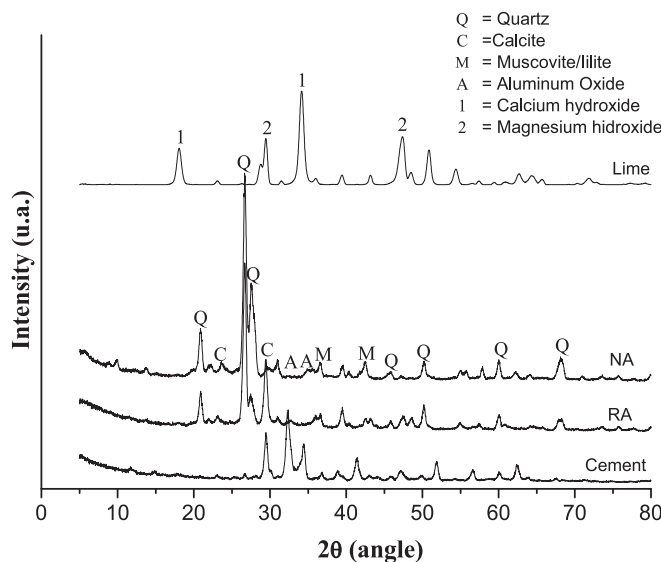


Fig. 3. XRD analysis for materials used in the experimental program.



Fig. 2. Recycled aggregate along the crushing process.

Table 3
Mix proportioning of mortars.

Mix design	Proportioning*	Materials (kg/m ³)			
		Cement	Limestone	NA	RA
G4.8_0	1:1:6:0:1.24	199.10	154.19	1004.79	0
G4.8_25	1:1:4.5:1.5:1.30			752.99	227.54
G4.8_50	1:1:3:3:1.35			501.49	453.59
G4.8_75	1:1:1.5:4.5:1.41			251.49	681.13
G4.8_100	1:1:0:6:1.51			0	908.68
G2.4_0	1:1:6:0:1.26	199.10	154.19	1004.79	0
G2.4_25	1:1:4.5:1.5:1.30			752.99	227.54
G2.4_50	1:1:3:3:1.34			501.49	453.59
G2.4_75	1:1:1.5:4.5:1.44			251.49	681.13
G2.4_100	1:1:0:6:1.51			0	908.68
G2.4W_0	1:1:6:0:1.11	199.10	154.19	1004.79	0
G2.4W_25	1:1:4.5:1.5:1.23			752.99	227.54
G2.4W_50	1:1:3:3:1.35			501.49	453.59
G2.4W_75	1:1:1.5:4.5:1.35			251.49	681.13
G2.4W_100	1:1:0:6:1.39			0	908.68

* Cement: limestone: NA: RA: water/cement.

2.3. Properties evaluated

The mechanical, physical, and thermal analyses followed current Brazilian standards and specific procedures adopted by other researchers (Table 4). After molding, all samples were cured in a laboratory environment (humidity and temperature of the lab) for 24 h and immersed in water until the tests were performed.

An open circuit chamber with 3% CO₂ concentration was used for accelerated carbonation testing, with humidity of 60 ± 10% at room temperature (15–25 °C). Before the test, the prismatic samples were submerged in water for 28 days, followed by 24 h of exposure to air in a laboratory environment for drying. The samples for carbonation measurements were obtained by cracking the prismatic samples into a 1 cm slice. A phenolphthalein solution (1%) dissolved in a mixture of 70% ethyl alcohol and 30% distilled water was sprinkled on one face to determine the carbonation depth by the color alteration provided by the pH indicator. The measurements were performed using the software ImageJ. The first measurement was performed with 24 h of CO₂ exposure, and the process was repeated daily until the sample was completely carbonated.

The X-ray microtomography test was performed using a Bruker SkyScan 1173 model, with operating energy of 50 kV, an electric current of 0.3 mA, and a resolution of 10 µm. The test was conducted on cubic samples (1 cm³) extracted from the specimens after 28 days of curing. The same technique was used by Lu et al. [43] to observe pore structure in concrete. Gallucci et al. [44] used this procedure to quantify the

Table 4
Mechanical, physical, and thermal test methods.

Properties	Brazilian Standard	Dimensions	Unit.	Age (days)
Water absorption by immersion (A)	NBR 9778 [38]	Prismatic (40 × 40 × 160 mm)	3	28
Porosity (P)				
Bulk density (B)				
Capillary water absorption	NBR 9779 [39]	Prismatic (40 × 40 × 160 mm)	3	28
Compressive strength (f _c)	NBR 13279 [40]	Prismatic (40 × 40 × 160 mm)	6	28
Tensile strength (f _t)			3	
Accelerated carbonation	Procedure adopted by [41]	Prismatic (40 × 40 × 160 mm)	3	28 to 38 days
X-Ray microtomography (µ-CT)	Specific procedure	Cubes (a – 10 mm)	–	28
Thermogravimetry	Procedure suggested by [22,42]	Powder	–	28

anhydrous cement content and the tortuosity of the pore network in cement paste. Saha [45] studied the X-ray microtomography images in concrete and concluded that it is an effective method to analyze the voids in a concrete sample. The same procedure can be applied in mortar to study the porosity and connectivity [46].

For thermogravimetry analysis (TGA), small pieces of mortar were extracted in three different areas: carbonated, non-carbonated, and semi-carbonated, using a Lecron spatula. After that, the pieces were crushed in an agate mortar and sieved to achieve a particle size of 0,150 mm. Once done with this process, the samples were kept in an Eppendorf sealed to avoid the continuity of carbonation. TGA and derivative thermogravimetry (DTG) were carried out in simultaneous thermal analyzer equipment (STA) Perkin Elmer model STA 6.000, with alumina crucible, under nitrogen atmosphere with 20 mL.min⁻¹, heating flow of 20 °C.min⁻¹, using about 50 mg of each sample. The material remained in the equipment for 60 min at 35 °C to release the free water; after that, it was heated from 35 °C to 950 °C just as suggested by Scrivener [42] and Neves Junior [22]. The results were analyzed using OriginPro 8.5. To evaluate the results mathematically, the DTG curve is analyzed together with TGA according to the temperature range of each peak. Around 250 °C, measuring the water loss caused by dehydration of several components is possible. For samples non-carbonated at around 350 °C occurs, mass loss due to the decomposition of magnesium hydroxide, and for carbonated samples, the same temperature indicates the decomposition of magnesium carbonate [47]. The third possible peak occurs between 400 e 450 °C and shows the decomposition of calcium hydroxide. The fourth and last one indicates the decarbonation of calcium carbonate between 650 and 800 °C. The amount of each compound can be calculated using stoichiometric analysis. Experimental planning was carried out using a two-way analysis of variance (ANOVA) considering a significance level of 95% to observe the effect of different fine NA replacement contents for RA in the physical–mechanical properties of mortars. The summarized scheme of the materials applied and methods chosen are presented in Fig. 4.

2.4. Emissions balance

To analyze the emissions balance between what is released and what is captured, it is necessary to have the individual values of the carbon footprint in producing all raw materials used in mortars. [21,27]Equation (2), used by Mazurana [21] and Rigo [27] was adopted to calculate the cement-related portion.

$$E_{cem} = E_{clinker} \times \%C_{cem} + E_{energy} \times FE \quad (2)$$

Where E_{cem} = Cement production emissions (kg.CO₂/t); E_{clinker} = Clinker production emissions (kg.CO₂/t); %C_{cem} = Clinker content in cement (%); E_{energy} = Electricity used in the process (kWh/t); FE = Emissions energy factor that correlates electricity with carbon emissions.

To feed the equation [48], the data provided by Brazil's information on GNR Project [48] claims 832 kg.CO₂/t of clinker. According to Brazilian Standard NBR 16697 [49] the Brazilian cement CPV could have between 100 and 90% of clinker. [50]The data provided by John, Punhagui, and Cincotto [50] was used to estimate the emissions of limestone production. The authors estimated that [51]the decarbonation of limestone in the fabrication of CHIII Brazilian limestone [51] released between 419 and 694 kg.CO₂/t. It will be used the minimum data (419), the maximum (694), and the mean (556.5). In addition, the energy consumption varies from 32kWh/t to 50kWh/t for two different furnaces, as presented by Azbe and Maerz [52]. For fine natural aggregate, the data were provided by Santoro [53] who estimated 4 kg.CO₂/t of NA applied in the Porto Alegre – RS – BRAZ reality, but this value can get to 86 kg.CO₂/t for other regions. For RA, it was estimated that the amount of 5.19 kg.CO₂/t (gate to gate) disregards the transport for the worst-case scenario [54]. For the best-case scenario, Quattrone [55] reported that the conventional CDW recycling process emitted 1.5 kg.

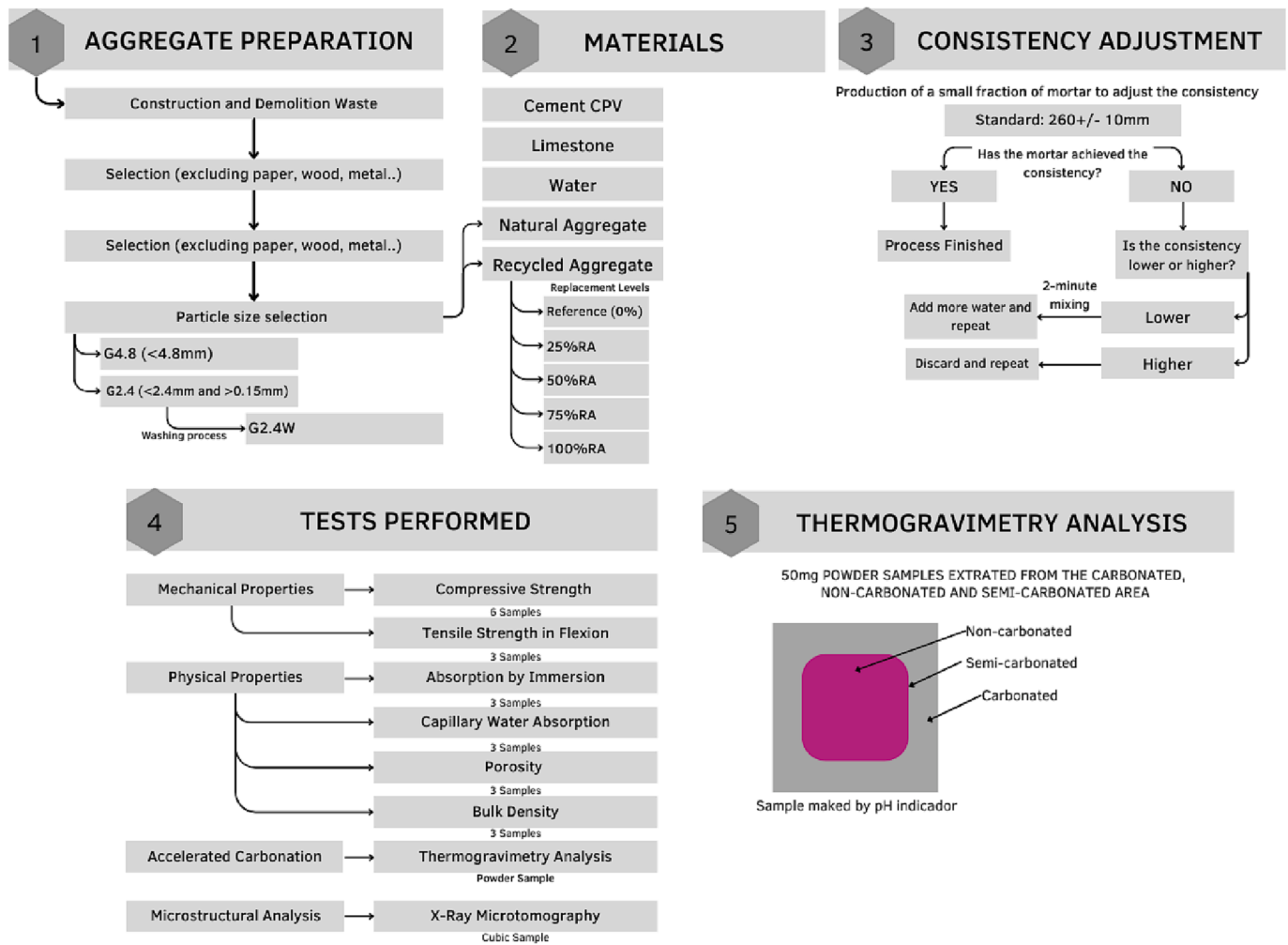


Fig. 4. Experimental procedures summarized scheme.

CO₂/t. The emissions factor for electric energy used was 0.08 kg.CO₂/kWh obtained from the Ministry of science, technology, innovation, and communication [56], the same value was used for all raw materials. The total CO₂ amount per m³ of mortar can be calculated using Equation (3).

$$E_{mor} = E_{cem} \times Q_{cem} + E_{lim} \times Q_{lim} + E_{NA} \times Q_{NA} + E_{RA} \times Q_{RA} \quad (3)$$

Where, E_{mor} = Emissions associated with mortar (kg.CO₂/m³), E_{lim} = Emissions of limestone production (kg.CO₂/m³), Q_{cem} = Cement consumption per m³ (kg), Q_{lim} = Limestone consumption per m³ (kg), E_{NA} = Emissions associated with natural aggregate extraction (kg.CO₂/m³), Q_{NA} = Consumption of natural aggregate per m³ (kg), E_{RA} = Emission related to the production of recycled aggregate (kg.CO₂/m³) and Q_{RA} = Consumption of RA per m³ (kg). To calculate de carbon uptake from the TGA/DTG method, Equation (4) was used. The same method was applied by Morales, Mazurana, and Rigo [21,27,57].

$$CO_{2ab} = \Delta CO_{2CC} + \Delta CO_{2Mg} \quad (4)$$

Where CO_{2ab} = CO₂ absorbed by the sample (%), ΔCO_{2CC} = difference between the calcium carbonate in the carbonated and the non-carbonated sample (%), and ΔCO_{2Mg} = CO₂ associated with the transformation of magnesium hydroxide and the magnesium carbonate. The ranges are analyzed from the peaks in the TGA/DTG. Carrying out the emissions balance (EB) (Equation (5)), it is possible to analyze if using recycled aggregate in different situations can or cannot be environmentally beneficial, describing only the CO₂ emissions.

$$EB = E_{mor} - CO_{2ab} \quad (5)$$

3. Results and discussion

With the results obtained in the experimental program, an ANOVA was conducted to verify the statistical significance of the response for the physical–mechanical properties (Table 5).

All the properties analyzed and their interactions presented statistical significance at 95%, except for the interaction between the substitution level and aggregate type for tensile strength. Thus, all the results discussed in the following sections present the effective influence of the investigated variables in the properties studied.

3.1. Physical properties

The results for the physical properties of the mortars evaluated are presented in Fig. 5.

It is possible to see variability in all physical properties found in some papers that used recycled aggregate [4,16,41,58]. G4.8 has the higher capillary water absorption (Fig. 5b) compared to the other two particle size distributions, and G2.4 W has the lowest. Absorption by immersion (Fig. 5a) showed a lower value in G2.4 W and higher in G4.8 mortars. This can be explained by the difference in the water/cement ratio between the different particle size distributions, G4.8_25 had w/c = 1.30, and G2.4 W had w/c = 1.23, for example. The difference between particle sizes was huge in NA mortars or with 25% RA. The lower capillary absorption but higher absorption by immersion of G2.4 W mortars can be explained by the formation of the pores present in microtomography

Table 5
ANOVA for properties investigated.

Properties	Source of variation	DF	Sum of squares	Mean square	F-test	p value	Significance
Compressive strength (fc)	Sand type	2	84.32	42.17	51.24	0.0000	Yes
	Replacement level	4	10.57	2.64	3.21	0.0173	Yes
	Sand type × Replacement level	8	41.38	5.17	6.29	0.0000	Yes
	Error	74	60.88	0.82			
Tensile strength (ft)	Sand type	2	1.03	0.52	8.80	0.0010	Yes
	Replacement level	4	1.05	0.26	4.48	0.0061	Yes
	Sand type × Replacement level	8	0.97	0.12	2.07	0.0720	No
	Error	29	1.70	0.06			
Absorption by immersion	Sand type	2	80.97	40.49	106.34	0.0010	Yes
	Replacement level	4	299.11	74.78	196.41	0.0000	Yes
	Sand type × Replacement level	8	94.22	11.78	30.93	0.0000	Yes
	Error	30	11.42	0.38			
Absorption by capillarity	Sand type	2	155.10	77.55	120.63	0.0000	Yes
	Replacement level	4	34.16	8.54	13.28	0.0000	Yes
	Sand type × Replacement level	8	33.21	4.15	6.45	0.0000	Yes
	Error	30	19.29	0.64			
Porosity	Sand type	2	437.75	218.87	103.54	0.0000	Yes
	Replacement level	4	827.23	206.81	97.93	0.0000	Yes
	Sand type × Replacement level	8	396.75	49.59	23.48	0.0000	Yes
	Error	30	63.36	2.11			
Bulk density	Sand type	2	0.0098	0.0049	6.8	0.0036	Yes
	Replacement level	4	0.4498	0.1125	157.7	0.0000	Yes
	Sand type × Replacement level	8	0.0442	0.0055	7.7	0.0000	Yes
	Error	30	0.0214	0.0007			

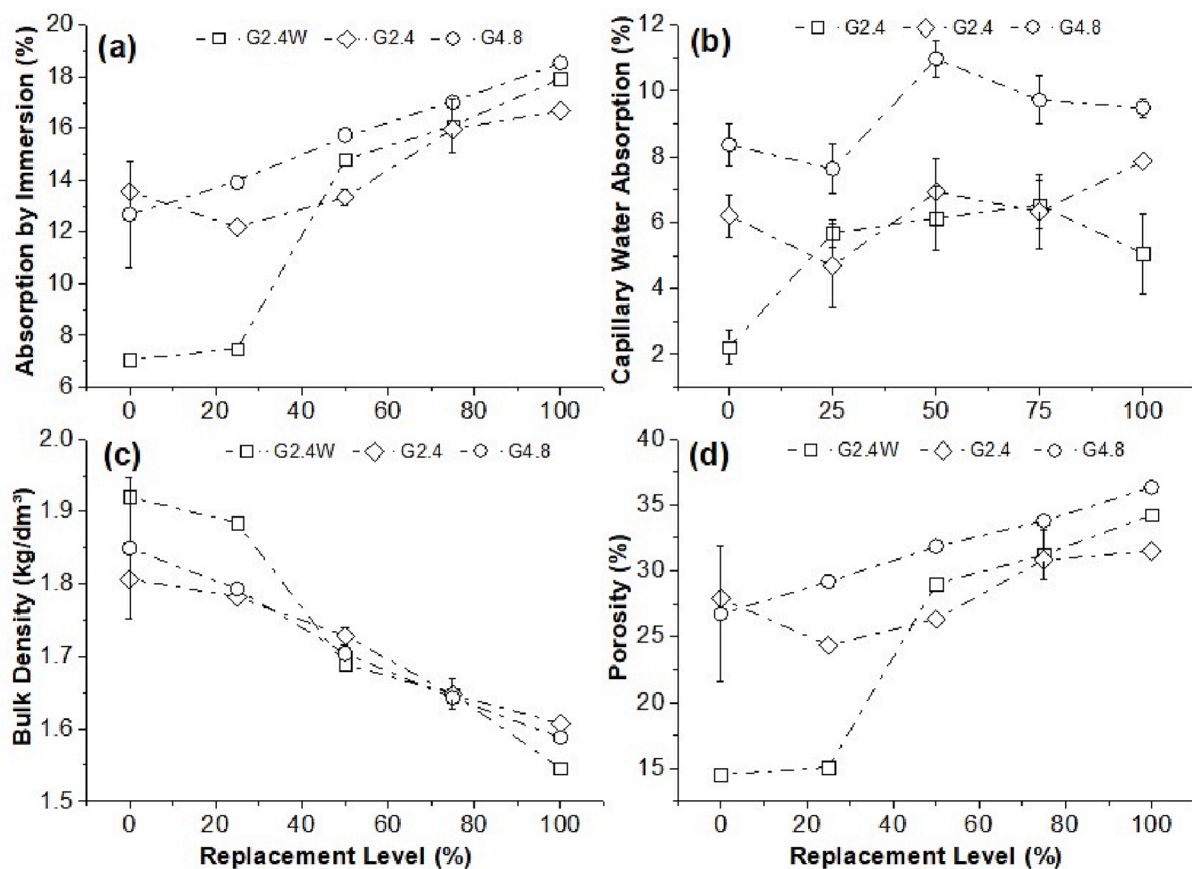


Fig. 5. Results for water absorption by immersion (a), capillary water absorption (b), bulk density (c), and porosity (d) at 28 days.

results (Fig. 7). The mortar can have a higher porosity but simultaneously, have less interconnected pores. The porosity results showed a typical behavior for cementitious materials with RA of CDW. Some variability can be seen, but, in general, the porosity (Fig. 5d) increases with the higher replacement level. The higher porosity of RA can explain it compared to NA and the changes in the water/cement ratio. With the

increased recycled aggregate content, the amount of water needed to achieve the required workability increases significantly. For bulk density (Fig. 5c), the behavior is the same, whose the mortar losses bulk density in the increase of RA because it is lighter than the natural one. Similar results were found by Ferreira [17].

3.2. Mechanical properties

The results of compressive strength (f_c) and tensile strength (f_t) at 28 days are presented in Fig. 6.

It can be observed that tensile strength tended to decrease with the increase in the replacement level. These results are similar to several researchers that used mixed recycled aggregate (MRA) in cementitious materials. However, compressive strength doesn't follow the linear decreased tendency, but other researchers also found this behavior for MRA. Ferreira et al. [17] produced similar mortars and found variability in compressive strength. This can happen due to the extreme variability found in results where the recycled aggregate is the mixed type. RA from only concrete or mortars presents linear results, and mixed materials don't follow the same tendency. Ledesma et al. [60] also found variability for mortars with RA from ceramic materials. Since, according to the authors, there is no reason for these results, it can be considered spurious data. The mortar with the particle size of 2.4 mm was the one with lower f_c , and with 4.8 mm had, for reference and 25 %RA, the higher f_c . These results are in concordance with the results found in μ -CT data (Fig. 7), where G4.8 presented itself with the lower porosity, showing a denser microstructure. This can happen due to the complete particle size distribution, from particles with 4.8 mm to the powder. [17,59] Duan [61] found similar results where the higher tensile strength for mortars was for a 30% replacement level, which increases the strength due to the presence of old no-hydrated mortar from CDW and the higher porosity of RA, contributing to better adhesion.

3.3. X-ray microtomography (μ -CT)

The μ -CT analysis (Fig. 7) was carried out to map the pore structure and calculate the porosity of small regions of mortars as used by Lanzon [46].

G4.8_50 mortar presented the lowest porosity with 2.74%, and it is possible to observe tinny pores with spherical shape and well distributed along with the sample. The most porous sample was G2.4W_100 with 6.32%, with a mixture of big spherical and tinny interconnected pores. Similar results were found by Copetti et al. [62], who used the technique to evaluate the substitution of natural aggregate for tire rubber in concretes, whose authors verified that adding recycled material modified the pore shape and distribution. G4.8_50 had 2.74% porosity, followed by G4.8_100 (4.10%), G2.4W_0 (5.06%), and G2.4W_50 (5.31%). Comparing both extremes, G2.4W_100 is 2.3 \times more porous. The lack of thinner material that fills the pores could be the explanation.

3.4. Emissions balance

To calculate the emissions balance, it is necessary to evaluate the amount of carbon dioxide capture associated with each mortar produced. For that, TGA\DTG analysis is considered. The estimative of emission for raw materials production is also considered in the method. After all, the emissions balance is the difference between how much was emitted and how much could be sequestered. Using Equations (3) and (4), it is possible to simulate a few scenarios of emissions based on 2 data per material. The data considered how much the limestone emitted and what is the RA and NA preparation methods. Table 6 shows the best and worst scenarios for CO₂ emissions. The particle size of the recycled or natural aggregate doesn't change the raw materials consumption per m³ of mortar, so it doesn't affect the emissions. However, the replacement level significantly changes the amount of CO₂ released, especially in the worst emissions scenario.

3.4.1. Carbonation depth

The carbonation depth measurements are the first step to the method chosen for TGA analysis and a way to measure the carbonation rate. Fig. 8 shows the carbonation advance within the mortar for a 100% replacement level sample. The carbonation depth at 168 h of exposure in the carbonation chamber (Fig. 8a) and the front advance (Fig. 8b) can be observed [25,27,63-65].

For G4.8, a faster carbonation rate was observed in mortars with a 50% of replacement level. For G2.4, the fastest was the reference sample; for G2.4 W, the fastest was the one with 100% RA. These results agree with the μ -CT analysis. G2.4W_100 was the most porous sample, so, understandably, it has a greater carbonation speed. Can also be observed different patterns comparing the three particle size distribution. The ANOVA showed that this RA property could significantly modify the carbonation rate. In general, G2.4 was the one with the highest carbonation rate. This could be explained by the high porosity, facilitating CO₂ diffusion. Similar results were found by many authors [25,27,63-65]Oliveira et al. [63]analyzed the carbonation rate for mortars with sludge from water treatment and found similar behavior. The increase in the replacement level increased the carbonation rate due to changes in the physical properties like porosity and absorption. Da Silva et al. [41]also found similar results, in this case, applied for concretes with recycled aggregate from construction and demolition waste as a coarse aggregate. The RA provided more porous concrete with interconnected pores, allowing easy CO₂ diffusion.Fig. 9

3.4.2. Thermogravimetry and XRD

In raw materials TGA/DTG (Fig. 10), it is possible to observe a considerable amount of magnesium and calcium hydroxides in the

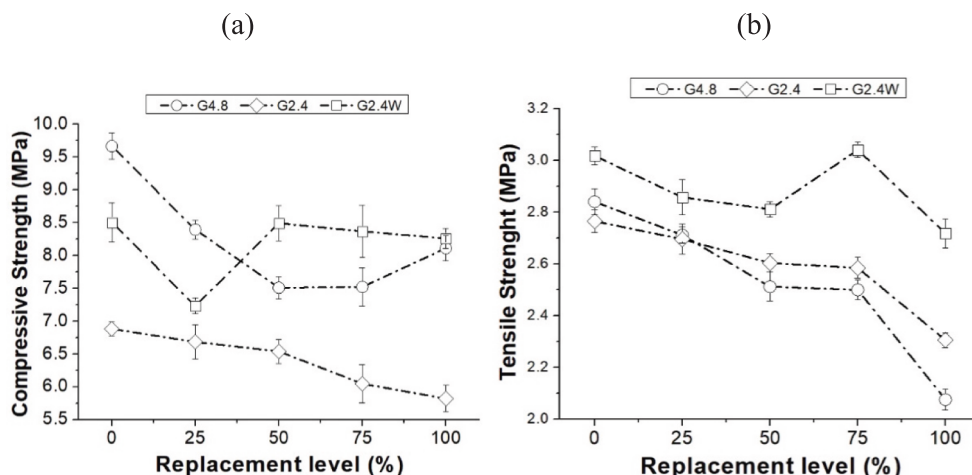


Fig. 6. Compressive strength (a) and tensile strength (b).

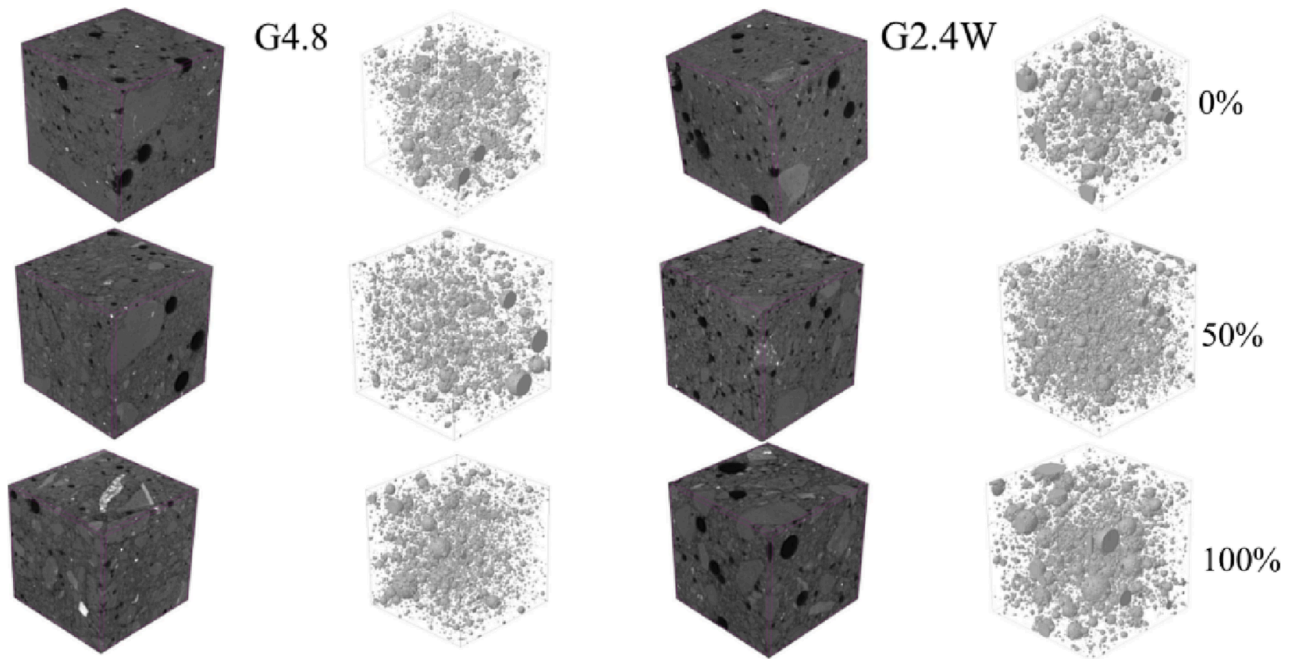


Fig. 7. X-ray microtomography of mortars evaluated.

Table 6
Emissions associated with each RA replacement level (kg.CO₂/m³).

Replacement Level	C	Limestone		NA		RA		Total	
		Case Scenario							
		Best	Worst	Best	Worst	Best	Worst	Best	Worst
0%	159.08	65	100.68	4.01	86.34	0	0	227.70	352.42
50%				2	43.13	0.68	2.94	226.37	311.56
100%				0	0	1.36	5.88	225.04	270.79

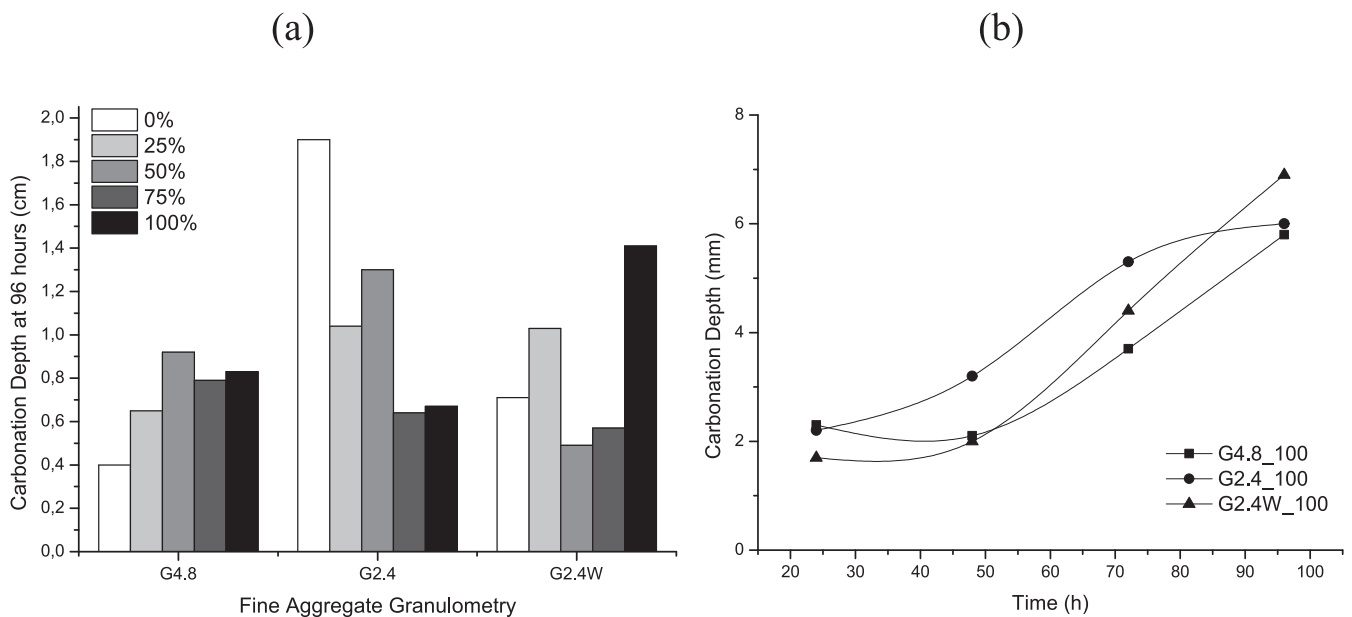


Fig. 8. Carbonation depth of 100% replacement level at 168 h (a) and the carbonation depth advance for all three particle size distributions (b).

limestone (in two peaks between 250 and 500 °C), just as present in the XRF analysis. In the RA, almost no hydroxides were found. On the other way, a prominent peak of calcium carbonate is present, which can

indicate that the RA was already carbonated at some level when incorporated in the mortar, whose similar results were found by Mazurana and Morales [21,57]. Since the recycled aggregate has, in the gravimetry

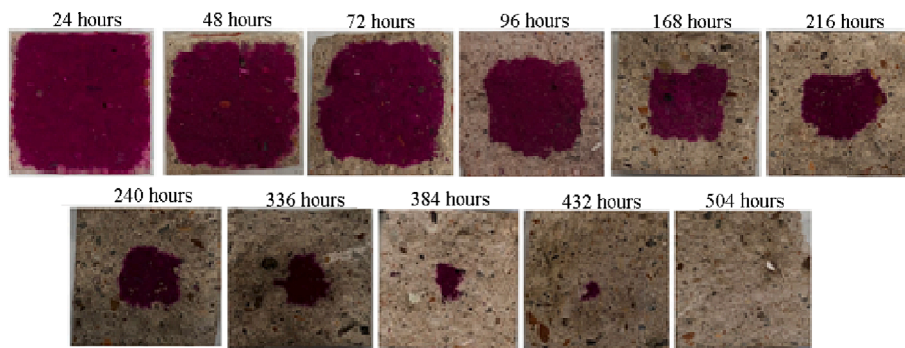


Fig. 9. G4,8_100 carbonation depth presented by phenolphthalein pH indicator.

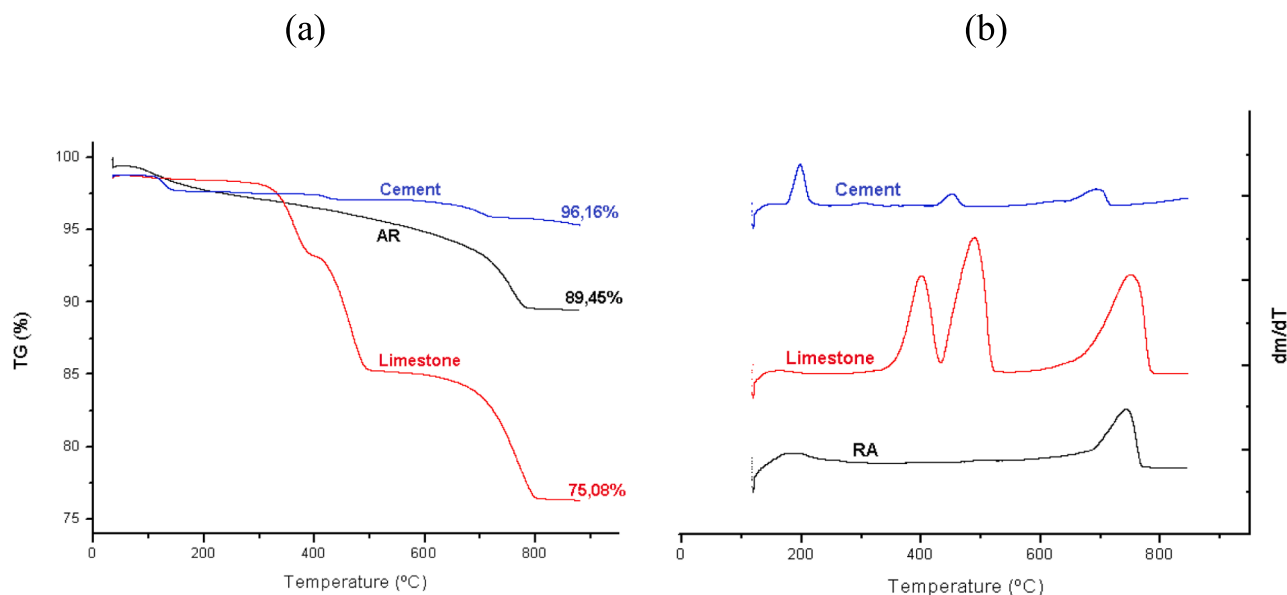


Fig. 10. TGA (a) and DTG (b) analysis of raw materials used.

separation, 40.6% mortar (that carbonates fast), the aggregate is expected to be almost entirely carbonated. This already proves the potential of RA as a carbon capture material since NA is inert. The calcium hydroxide in RA could react with carbon dioxide-originating calcium carbonate (Equation (6), promoting carbon sequestration.



For G2.4_100 (Fig. 11), in three carbonation stages (carbonated, semi-carbonated, and non-carbonated), the carbon hydroxide and magnesium hydroxide are consumed and transformed into carbon carbonate and magnesium carbonated throughout the process, same results were found by Mazurana [21].

Comparing the carbonation area is possible to notice differences between peaks found in carbonated, non-carbonated, and semi-carbonated areas. The carbonated sample shows a peak corresponding to magnesium carbonate from magnesium hydroxide carbonation. Also, some peaks disappear between carbonated and non-carbonated samples, indicating the consumption of calcium hydroxide. Fig. 12 shows the parallel between the three different states in the DTG/TGA analysis.

For the TGA/DTG analysis (Fig. 10), the peak corresponding to the temperature range of 35 to 250 °C is related to free H₂O. For 250 to 400 °C, the H₂O associated with magnesium hydroxide is released. It is present because of the chemical composition of limestone. The peak around 400 to 450 °C represents the amount of H₂O in calcium hydroxide. The first and second can be seen in the non-carbonated sample,

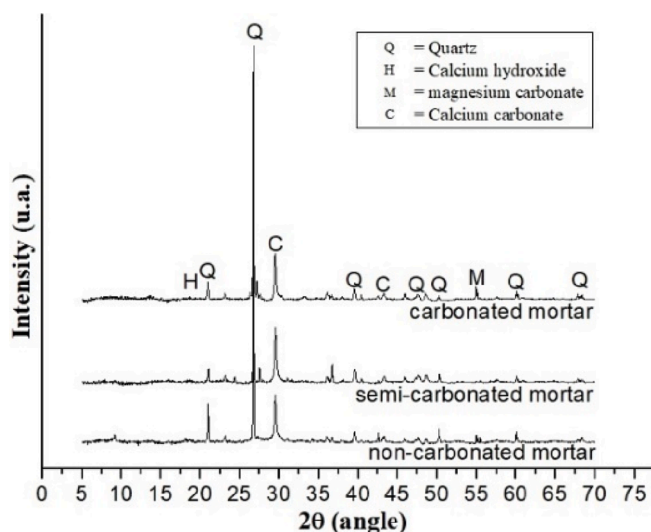


Fig. 11. XRD of G2.4_100 Carbonated, semi-carbonated and non-carbonated.

decreasing with the carbonation process. The peak at 650 to 800 °C is related to the formation of calcium carbonate, measuring the CO₂ released. In carbonated materials, the consumption of hydroxides and

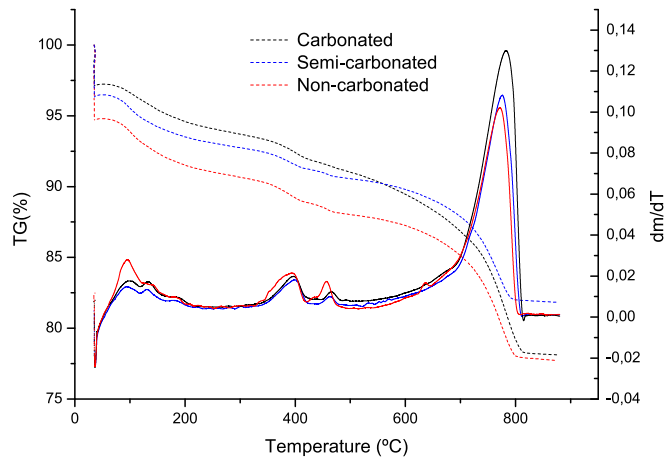


Fig. 12. DTG/TGA analysis of G2.4_0.

the formation of carbonates can be noticed. In some samples, it is possible to measure both magnesium carbonate and hydroxide by doing curve deconvolution in the peak between 250 and 400 °C. According to Mo *et al.* [47] the same temperature range indicates both components. The peak that happens around 350 to 400 °C shows the formation of magnesium carbonate in carbonated samples. Calculating the difference

between the volatilized masses is possible to measure the amount of CO₂ absorbed in the carbonation process. Fig. 13 shows the TGA/DTG analysis of all missing mortars analyzed.

The observable mass losses could be divided into five stages: (I) water loss at 100 °C. Since the samples weren't oven-dried, the water loss varies from sample to sample; (II) water loss associated with magnesium hydroxide at 400 °C, which compounds are susceptible to carbonation and originated in the limestone composition. Since the amount of limestone in the mortars is almost equal, the peaks in DTG analysis are almost equal; (III) water detached from calcium hydroxide at 470 °C originated from limestone, cement, and RA. The high variability of the RA could explain the oscillation between samples used and the different carbonation degrees in RA even before the admixture. (IV) carbon dioxide loss associated with calcium carbonate at 750 °C. The modification in each peak could be explained by the composition of RA and the replacement level. The difference between the mass loss in this fourth peak for carbonated and non-carbonated samples is the data that provides the carbon captured along the carbonation process. In addition, the second peak is also considered to be a carbonatable material. The magnesium hydroxide turns into magnesium carbonate. G2.4_100 was the mortar with the highest difference between carbonated and non-carbonated samples. The alkaline reserve from the recycled aggregate could explain this behavior. The amount of CO₂ capture can be calculated by the difference in CO₂ mass loss in the temperature range corresponding to carbonates. However, G2.4W_0 showed just a little

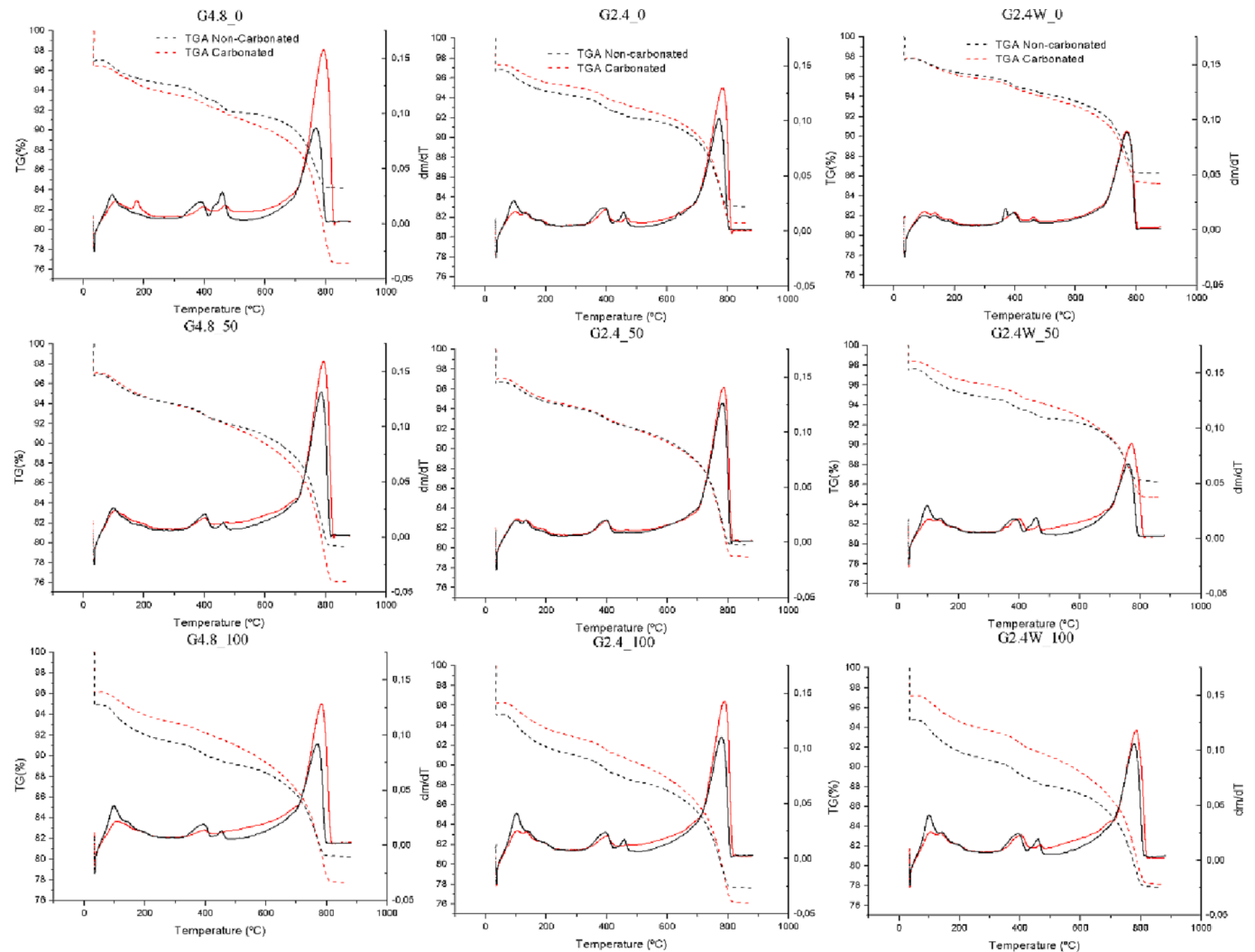


Fig. 13. DTG analysis of mortars.

carbonation provided by magnesium hydroxide. At 350 °C, it is possible to observe two curves overlapping. This behavior happens because magnesium carbonate and hydroxide appear on the chart in the same temperature range. Performing the deconvolution of curves, measuring the amount of each compound is possible. For reference mortars, G4.8 was the one with the highest carbon capture. In Table 7, it is possible to observe the amount of CO₂ captured according to TGA/DTG analysis and the emissions balance. The thermal analysis shows the number of carbonates in the mortars, making it possible to calculate de carbon capture more accurately. TGA better assimilates with the material's behavior. The use of RA usually brings some variability in experimental procedures, and the standardization of recycled aggregate procedures could be a way to overcome some difficulties in analysis.

Making the compensation between how much is emitted and how much can be captured by carbonation, it is possible to notice a huge difference between the most emissive mortar and the lowest. In Brazil's national perspective, the data available for the emissions of raw materials varies according to many factors that could affect the process of decision-making to achieve the lowest emission: raw material nature, geographic factors such as energy matrix, production, and preparation method, process energy efficiency, and others. Considering the data available, the most emissive mortar in both situations is G2.4W_100 with 212.73 kg.CO₂/m³ and 337.45 kg.CO₂/m³ in the best and worst scenarios in the emissions balance. The lowest is G2.4_100, with an emission of 82.48 kg.CO₂/m³ and 212.73 kg.CO₂/m³. It shows a 37% decrease in carbon dioxide released into the atmosphere compared to both mortars. The CO₂ absorption was 7% of the released in production for G2.4W_0 and 63% for G2.4_100. The reasons beyond the results are directly related to the physical–mechanical properties and the shape and distribution of the pores observed in μ -CT (Fig. 7). The pores in G2.4 W weren't well distributed, even appearing in large numbers. The shape and distribution of the pores could influence the diffusion of CO₂, just like the results found by Coppeti [62]. Also, the mortars with 100% RA have more alkaline reserve than the reference mortars.

4. Conclusions

The main goal of this research was to evaluate the influence of mixed recycled aggregate, in three different particle size distributions, in the physical–mechanical properties, microstructural properties and carbon uptake. It is possible to draw some relevant conclusions from a careful analysis of the experimental results obtained in this study:

- All mortars performed satisfactorily for physical–mechanical properties evaluated according to European Standards. This material could be applied in many situations according to the strength level, including structural masonry.
- The RA proved applicable for replacement levels up to 50% because it had a satisfactory physical–mechanical behavior.
- The less emissive mortar, according to the emissions balance, was the one with a particle size lower than 2.4 mm and with a 100 %RA replacement level. It reabsorbs 63% of all carbon dioxide released in production.
- The most emissive was with particle size lower than 2.4 mm that passed through the washing process, which reabsorbed just 7% of all carbon dioxide released.
- The results showed that washing the aggregate is not worth it because it adds a step in the preparation process and does not significantly improve the evaluated properties. For carbon capture, the washing process decreased the amount sequestered comparing mortars with washed and non-washed recycled aggregate. The particle size distribution with the best results was the one with a maximum size of 2.4 mm.
- Considering both physical–mechanical and carbon capture, the mortar that showed the best results was a maximum particle size of 2.4 mm and a 50% replacement level. The combination improved

Table 7

CO₂ uptake and emissions balance according to the TGA/DTG analysis.

Sample	Carbon Uptake (%) (kg.CO ₂ /m ³)		Emissions Balance (kg.CO ₂)	
			Case Scenario	
			Best	Worst
G4.8_0	5.39	97.02	130.68	255.40
G4.8_50	4.63	78.71	147.66	232.85
G4.8_100	5.79	89.16	135.88	184.63
G2.4_0	1.49	43.35	184.35	309.07
G2.4_50	2.40	65.52	160.85	246.04
G2.4_100	5.02	142.56	82.48	128.23
G2.4W_0	0.78	14.97	212.73	337.45
G2.4W_50	4.95	83.65	142.72	227.91
G2.4W_100	4.76	73.78	151.26	197.01

tensile strength and enhanced carbon capture. A replacement level with more than 50% showed a better emission balance but a significant decrease in physical–mechanical properties justified by the nature of RA as a more porous and less resistant aggregate.

CRedit authorship contribution statement

Pietra Moraes Borges: Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Investigation, Writing – original draft, Writing – review & editing. **Jéssica Zamboni Schiavon:** Writing – review & editing. **Sérgio Roberto da Silva:** Writing – review & editing. **Eduardo Rigo:** Formal analysis, Writing – original draft, Writing – review & editing. **Alex Neves Junior:** Writing – review & editing. **Edna Possan:** Methodology, Conceptualization, Formal analysis, Writing – review & editing. **Jairo José de Oliveira Andrade:** Conceptualization, Methodology, Supervision, Formal analysis, Funding acquisition, Project administration, Writing – review & editing.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data availability

The data that has been used is confidential.

Acknowledgment

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 001 to the first author. The authors thank the Federal University of Latin American Integration for supporting the experimental research.

References

- [1] IPCC, Climate Change - Press Release, Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021) 1–6. [10.1017/cbo9781107415324](https://doi.org/10.1017/cbo9781107415324).
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change, Global Warming: Summary for Policymakers, Panmao Zhai, 2023.
- [3] NOAA, Trend in atmospheric carbon dioxide, (2021).
- [4] S.K. Kaliyavaradhan, T.C. Ling, Potential of CO₂ sequestration through construction and demolition (C&D) waste - An overview, *J. CO₂ Util.* 20 (2017) 234–242, <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2017.05.014>.
- [5] F. Pacheco Torgal, S. Miraldo, J.A. Labrincha, J. De Brito, An overview on concrete carbonation in the context of eco-efficient construction: Evaluation, use of SCMs and/or RAC, *Constr. Build. Mater.* 36 (2012) 141–150, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.066>.
- [6] CSI, Diretrizes para o Relatório e Monitoramento das Emissões na Indústria de Cimento, (2019) 40.
- [7] V. John, CO₂ Mitigation Strategies in the Concrete Production Chain, (2019). www.ibracon.org.br/AnoXLVII.
- [8] WBCSD - WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, Roadmap Tecnológico, (2020).

- [63] J.J. de O. Andrade, E. Possan, M. ChiaradiaWenzel, S.R. da Silva, Feasibility of using calcined water treatment sludge in rendering mortars: A technical and sustainable approach, *Sustainability* (Switzerland) 11 (2019), <https://doi.org/10.3390/su11133576>.
- [64] D. Cecim, Avaliação do ciclo de vida (ACV) de concretos compostos com agregado graúdo de construção e demolição em diferentes teores de substituição, Pontifícia Universidade Católica Do Rio Grande Do Sul (PUCRS). (2020).
- [65] S.R. da Silva, F.N. Cimadon, P.M. Borges, J.Z. Schiavon, E. Possan, J.J. de O. Andrade, Relationship Between the Mechanical Properties and Carbonation of Concretes With Construction and Demolition Waste, *Case Studies, Constr. Mater.* 16 (2021) e00860.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No desenvolvimento do presente trabalho, que trata sobre o uso de agregado reciclado de resíduo de construção e demolição em argamassas, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- A argamassa menos emissiva, de acordo com o balanço de emissões realizado, foi a G2,4_100. Tal traço capturou 63% de todo dióxido de carbono emitido no processo de fabricação, considerando o pior cenário de emissão dos agregados e da cal. Tal comportamento é explicado pelo acréscimo na reserva alcalina e da porosidade promovida pela adição de material reciclado.
- A argamassa mais emissiva foi a G2,4W_100 que absorveu apenas 7% de todo CO₂ emitido.
- Para propriedades mecânicas avaliadas, todas as argamassas satisfizeram os requisitos das normas brasileiras sobre o tema.
- De modo geral, o teor de substituição de 50% teve os melhores resultados tanto na captura quanto em propriedades físico-mecânicas. Para teores acima de 50% ocorre a queda das propriedades físico-mecânicas.
- Em relação às granulometrias, os resultados mostram que não é viável a lavagem do agregado, visto que não melhora significativamente as propriedades e adiciona mais um processo à preparação do material. Além disso, sem o processo de lavagem, a produção das argamassas teria um menor consumo de água.

6. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Propõe-se para trabalhos futuros:

- O desenvolvimento de um método de cálculo e avaliação do carbono não-fixado em argamassas e demais materiais cimentícios.
- O estudo de demais propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade para argamassas com agregado reciclado de resíduo de construção e demolição.
- A avaliação do impacto da pré-carbonatação dos agregados reciclados.
- Investigar o impacto do uso de cimentos menos emissivos no processo produtivo das argamassas.
- Verificar a influência do uso de diversos tipos de revestimento na captura de carbono.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] What is the Greenhouse Effect? | Global Warming | Live Science, (n.d.). <https://www.livescience.com/37743-greenhouse-effect.html> (accessed November 16, 2021).
- [2] NOAA, Trend in atmospheric carbon dioxide, (2021). <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>.
- [3] S.K. Kaliyavaradhan, T.C. Ling, Potential of CO₂ sequestration through construction and demolition (C&D) waste - An overview, *J. CO₂ Util.* 20 (2017) 234–242. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2017.05.014>.
- [4] F. Pacheco Torgal, S. Miraldo, J.A. Labrincha, J. De Brito, An overview on concrete carbonation in the context of eco-efficient construction: Evaluation, use of SCMs and/or RAC, *Constr. Build. Mater.* 36 (2012) 141–150. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.066>.
- [5] G.C. and C.A. GCCA, GNR Project, (2018). <https://gccassociation.org/gnr/>.
- [6] V. John, Estratégias Para Mitigação Do CO₂ Na Cadeia Produtiva Do Concreto, (2019). www.ibracon.org.brAnoXLVII.
- [7] WBCSD - WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, Roadmap Tecnológico, (2020). resou.
- [8] A.B.D.N.T. (ABNT)., NBR 16697 - Cimento Portland – Requisitos, (2018).
- [9] E. Possan, E.F. Felix, W.A. Thomaz, CO₂ uptake by carbonation of concrete during life cycle of building structures, *J. Build. Pathol. Rehabil.* 1 (2016) 1–9. <https://doi.org/10.1007/s41024-016-0010-9>.
- [10] J.J. de Oliveira Andrade, E. Possan, J.Z. Squiavon, T.L.P. Ortolan, Evaluation of mechanical properties and carbonation of mortars produced with construction and demolition waste, *Constr. Build. Mater.* 161 (2018) 70–83. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.089>.
- [11] V.W.Y. Tam, M. Soomro, A.C.J. Evangelista, A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017), *Constr. Build. Mater.* 172 (2018) 272–292.

- <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.240>.
- [12] N.F. Medina, R. Garcia, I. Hajirasouliha, K. Pilakoutas, M. Guadagnini, S. Raffoul, Composites with recycled rubber aggregates: Properties and opportunities in construction, *Constr. Build. Mater.* 188 (2018) 884–897. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.069>.
- [13] M. e T.M. BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Boletim do Setor Mineral, 2019.
- [14] A. Bianchini, F. Cento, A. Guzzini, M. Pellegrini, C. Sacconi, Sediment management in coastal infrastructures: Techno-economic and environmental impact assessment of alternative technologies to dredging, *J. Environ. Manage.* 248 (2019) 109332. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109332>.
- [15] ABRELPE, Panorama dos Resíduos no Brasil, (2020).
- [16] J. de Brito, N. Saikia, Chapter 7: Concrete with Recycled Aggregates in International Codes, in: *Green Energy Technol.*, 2013: pp. 379–429.
- [17] K. Kochem, Potencialidades De Logística Reversa Do Resíduo De Gesso Da Indústria Da Construção Civil, *Trab. Diss. Apresentado Como Requisito Final Para Obtenção Do Título Mestre Em Tecnol. Ambient. Do Programa Pós-Graduação Em Tecnol. Ambient. – PPGTAMB – Da Univ. Tecnológica Fed. Do Paraná, Câmpus Median.* (2016).
- [18] S.R. da S. and J.J. de O.A. Pietra Moraes Borges, Matheus Chiaradia Wenzel, Jéssica Zamboni, Evaluation of the Healing Conditions in Strength Recovery in Concretes Early Loaded (Self-Healing), *Civ. Eng. Res. J.* (2019).
- [19] E. Possan, W.A. Thomaz, G.A. Aleandri, E.F. Felix, A.C.P. dos Santos, CO₂ uptake potential due to concrete carbonation: A case study, *Case Stud. Constr. Mater.* 6 (2017) 147–161. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.01.007>.
- [20] A. Neves Junior, Captura de CO₂ em materiais cimentícios através de carbonatação acelerada, *Tese Doutorado. Univ. Fed. Do Rio Janeiro.* (2014).
- [21] C. Pade, M. Guimaraes, The CO₂ uptake of concrete in a 100 year perspective, *Cem. Concr. Res.* 37 (2007) 1348–1356. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.06.009>.
- [22] P. Andrade, T.; Helene, *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais, IBRACON.* (2010).
- [23] ECYCLE, Processo de produção de cimento gera emissões e pode diminuir a biodiversidade, (2021). <http://www.ecycle.com.br/> (accessed October 16, 2021).

- [24] A. Vaughan, A.; Neslen, Global emissions nearly stall after a decade of rapid growth, *Guard*. (2015).
- [25] F. Xi, S.J. Davis, P. Ciais, D. Crawford-Brown, D. Guan, C. Pade, T. Shi, M. Syddall, J. Lv, L. Ji, L. Bing, J. Wang, W. Wei, K.H. Yang, B. Lagerblad, I. Galan, C. Andrade, Y. Zhang, Z. Liu, Substantial global carbon uptake by cement carbonation, *Nat. Geosci.* 9 (2016) 880–883. <https://doi.org/10.1038/ngeo2840>.
- [26] EIPPCB; IPTS, Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide., Eur. Union. (n.d.).
- [27] W. Li, M. Elheddad, N. Doytch, The impact of innovation on environmental quality: Evidence for the non-linear relationship of patents and CO2 emissions in China, *J. Environ. Manage.* 292 (2021) 112781. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112781>.
- [28] U.S. Geological Survey, Lime: Statistics and information, (2020). <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021-lime.pdf>.
- [29] V.M. John, K.R.G. Punhagui, M.A. Cincotto, *Economia De Baixo Carbono: Avaliação De Impactos De Restrições E Perspectivas Tecnológicas - Produção Da Cal - Relatório Final*, Ebc. (2014) 17.
- [30] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7175 Cal hidratada para argamassas - Requisitos, (2003).
- [31] J.F. Santoro, M. Kripka, Determinação das emissões de dióxido de carbono das matérias primas do concreto produzido na região norte do Rio Grande do Sul, *Ambient. Construído.* 16 (2016) 35–49. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212016000200078>.
- [32] J.R. Grabasck, Aspectos e impactos ambientais decorrentes da extração de agregado natural e produção de agregado reciclado: Estudo de caso no RS., Programa Pós-Graduação Em Eng. Civ. - UNISINOS. (2016).
- [33] C.F. Paz, Inventário do ciclo de vida aplicado à produção de agregados a partir de resíduo de construção e demolição, (2020).
- [34] B.M. K. Andersson, B. Allard, M. Bengtsson, Chemical composition of cement pore solutions, 58 (1989) 99–104. <https://www.unhcr.org/publications/manuals/4d9352319/unhcr-protection-training-manual-european-border-entry-officials-2-legal.html?query=excom> 1989.
- [35] E. Possan, Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de

- concreto armado em ambiente urbano., Programa Pós-Graduação Em Eng. Civ. - UFRGS. (2010).
- [36] E.F. FELIX, E. POSSAN, Balance emissions and CO₂ uptake in concrete structures: simulation based on the cement content and type, *Rev. IBRACON Estruturas e Mater.* 11 (2018) 135–162. <https://doi.org/10.1590/s1983-41952018000100008>.
- [37] J.G. Jang, G.M. Kim, H.J. Kim, H.K. Lee, Review on recent advances in CO₂ utilization and sequestration technologies in cement-based materials, *Constr. Build. Mater.* 127 (2016) 762–773. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.017>.
- [38] D. Zhang, V.C. Li, B.R. Ellis, Optimal Pre-hydration Age for CO₂ Sequestration through Portland Cement Carbonation, *ACS Sustain. Chem. Eng.* 6 (2018) 15976–15981. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b03699>.
- [39] D. Xuan, B. Zhan, C.S. Poon, W. Zheng, Innovative reuse of concrete slurry waste from ready-mixed concrete plants in construction products, *J. Hazard. Mater.* 312 (2016) 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.03.036>.
- [40] J.J. de O. Andrade, E. Possan, M. ChiaradiaWenzel, S.R. da Silva, Feasibility of using calcined water treatment sludge in rendering mortars: A technical and sustainable approach, *Sustain.* 11 (2019). <https://doi.org/10.3390/su11133576>.
- [41] F. Collins, 2nd generation concrete construction: carbon footprint accounting, 20 (2013).
- [42] A. Akhtar, A.K. Sarmah, Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective, *J. Clean. Prod.* 186 (2018) 262–281. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.085>.
- [43] C.N. do M.A. CONAMA, Resolução Nº 307, (2002).
- [44] D.H.F. Paz, K.P.V. Lafayette, Forecasting of construction and demolition waste in Brazil, *Waste Manag. Res.* 34 (2016) 708–716. <https://doi.org/10.1177/0734242X16644680>.
- [45] R.L.S. Ferreira, M.A.S. Anjos, A.K.C. Nóbrega, J.E.S. Pereira, E.F. Ledesma, The role of powder content of the recycled aggregates of CDW in the behaviour of rendering mortars, *Constr. Build. Mater.* 208 (2019) 601–612. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.058>.
- [46] Ellen MacArthur Foundation, Towards the circular economy. *Journal of Industrial Ecology*, 1 (2013).

- [47] R. V. Silva, J. de Brito, R.K. Dhir, Availability and processing of recycled aggregates within the construction and demolition supply chain: A review, *J. Clean. Prod.* 143 (2017) 598–614. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.070>.
- [48] Eurostat, Statistics | Eurostat, (2018). https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_wm040/default/table?lang=en (accessed December 20, 2020).
- [49] M. Vinciguerra, E.P. Figueiredo, F. Drummond, C. Zaeyen, Í. Moreno, B. Malafaia, Waste management in the reform and adequacy of the Maracanã Stadium for the FIFA Football World Cup 2014, *Key Eng. Mater.* 634 (2015) 97–112. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.634.97>.
- [50] A.B.D.N.T. ABNT, NBR 15116 - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e reparos de concreto não estrutural - Requisitos, (2004).
- [51] L. Evangelista, J. De Brito, Concrete with fine recycled aggregates: A review, *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 18 (2014) 129–172. <https://doi.org/10.1080/19648189.2013.851038>.
- [52] L. Evangelista, M. Guedes, J. De Brito, A.C. Ferro, M.F. Pereira, Physical, chemical and mineralogical properties of fine recycled aggregates made from concrete waste, *Constr. Build. Mater.* 86 (2015) 178–188. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.112>.
- [53] M.Y. Takayuki FUMOTO, Influence of Quality of Recycled Fine Aggregate on Properties of Mortar, 40 (2002) 81–84.
- [54] H.B. Le, Q.B. Bui, Recycled aggregate concretes – A state-of-the-art from the microstructure to the structural performance, *Constr. Build. Mater.* 257 (2020) 119522. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119522>.
- [55] M.I.C. Sampaio, Qualidade de artigos incluídos em revisão sistemática: Comparação entre latino-americanos e de outras regiões., (2013).
- [56] Engineering Village, Engineering Village, (2020). <https://engineeringvillage.com> (accessed December 1, 2020).
- [57] Science Direct, Science Direct, (2020). <https://www.elsevier.com/solutions/sciencedirect> (accessed December 1, 2020).
- [58] Scopus, Scopus, (2020). <https://www.elsevier.com/solutions/scopus/why-choosescopus> (accessed December 1, 2020).
- [59] Web of Science: Summary of Coverage - Web of Science platform - LibGuides

- at Clarivate Analytics, (n.d.).
<https://clarivate.libguides.com/webofscienceplatform/coverage> (accessed January 13, 2021).
- [60] M.Á. Sanjuán, E. Estévez, C. Argiz, Carbon dioxide absorption by blast-furnace slag mortars in function of the curing intensity, *Energies*. 12 (2019) 1–9. <https://doi.org/10.3390/en12122346>.
- [61] S.H. Kang, Y.H. Kwon, J. Moon, Quantitative analysis of CO₂ uptake and mechanical properties of air lime-based materials, *Energies*. 12 (2019). <https://doi.org/10.3390/en12152903>.
- [62] C. Moro, V. Francioso, M. Velay-Lizancos, Modification of CO₂ capture and pore structure of hardened cement paste made with nano-TiO₂ addition: Influence of water-to-cement ratio and CO₂ exposure age, *Constr. Build. Mater.* 275 (2021) 122131. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122131>.
- [63] C. Liang, B. Pan, Z. Ma, Z. He, Z. Duan, Utilization of CO₂ curing to enhance the properties of recycled aggregate and prepared concrete: A review, *Cem. Concr. Compos.* 105 (2020) 103446. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103446>.
- [64] IPCC, Climate Change - Press Release, Intergov. Panel Clim. Chang. (2021) 1–6. <https://doi.org/10.1017/cbo9781107415324>.
- [65] IPCC, Aquecimento Global de 1,5°C: Sumário para Formuladores de Políticas, Intergov. Panel Clim. Chang. (2018) 28. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/07/SPM-Portuguese-version.pdf>.
- [66] CSI, Diretrizes para o Relatório e Monitoramento das Emissões na Indústria de Cimento, (2019) 40.
- [67] M. e T.M. BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Boletim do Setor Mineral, Bol. Do Set. Miner. 1 (2019).
- [68] J.Z. Schiavon, P.M. Borges, S.R. da Silva, J.J. de O. Andrade, Analysis of mechanical and microstructural properties of high performance concretes containing nanosilica and silica fume, *Rev. Mater.* 26 (2021).
- [69] A. De Rossi, M.J. Ribeiro, J.A. Labrincha, R.M. Novais, D. Hotza, R.F.P.M. Moreira, Effect of the particle size range of construction and demolition waste on the fresh and hardened-state properties of fly ash-based geopolymer mortars with total replacement of sand, *Process Saf. Environ. Prot.* 129 (2019) 130–137. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.06.026>.

- [70] E. Rigo, Avaliação do potencial de captura de CO₂ de concretos com resíduos de construção e demolição devido à carbonatação, Programa Pós-Graduação Em Eng. Civ. 8 (2019) 55.
- [71] L. Mazurana, P.R.S. Bittencourt, F.R. Scremin, A. Neves Junior, E. Possan, Determination of Co₂ capture in rendering mortars produced with recycled construction and demolition waste by thermogravimetry, J. Therm. Anal. Calorim. 147 (2021) 1071–1080. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-10436-0>.
- [72] P.S. Lovato, E. Possan, D.C.C.D. Molin, Â.B. Masuero, J.L.D. Ribeiro, Modeling of mechanical properties and durability of recycled aggregate concretes, Constr. Build. Mater. 26 (2012) 437–447. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.043>.
- [73] C. Furcas, G. Balletto, S. Naitza, A. Mazzella, Evaluation of CO₂ uptake under mild accelerated carbonation conditions in cement-based and lime-based mortars, Adv. Mater. Res. 980 (2014) 57–61. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.980.57>.
- [74] A.B.D.N.T. ABNT, NBR-NM 45-2006 - Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.pdf, Abnt Nbr Nm 45. (2006) 8p.
- [75] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR NM 248: Agregados-Determinação da composição granulométrica, Rio Janeiro. (2003).
- [76] A.-A.B. de N. Técnicas, NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente, Rio Janeiro. (2003) 6.
- [77] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, (2009).
- [78] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade, (2012).
- [79] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão, (2005).
- [80] S.R. da Silva, J.J. de Oliveira Andrade, Investigation of mechanical properties and carbonation of concretes with construction and demolition waste and fly ash, Constr. Build. Mater. 153 (2017) 704–715. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.143>.

- [81] K. Scrivener, R. Snellings, B. Lothenbach, *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials*, 2018. <https://doi.org/10.1201/b19074>.
- [82] S. Lu, E.N. Landis, D.T. Keane, X-ray microtomographic studies of pore structure and permeability in Portland cement concrete, *Mater. Struct. Constr.* 39 (2006) 611–620. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9099-7>.
- [83] E. Gallucci, K. Scrivener, A. Groso, M. Stampanoni, G. Margaritondo, 3D experimental investigation of the microstructure of cement pastes using synchrotron X-ray microtomography (μ CT), *Cem. Concr. Res.* 37 (2007) 360–368. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.10.012>.
- [84] S.K. Saha, S. Pradhan, S. V. Barai, Use of machine learning based technique to X-ray microtomographic images of concrete for phase segmentation at meso-scale, *Constr. Build. Mater.* 249 (2020) 118744. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118744>.
- [85] M. Lanzón, V. Cnudde, T. De Kock, J. Dewanckele, X-ray microtomography (μ -CT) to evaluate microstructure of mortars containing low density additions, *Cem. Concr. Compos.* 34 (2012) 993–1000. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.06.011>.
- [86] L. Mo, D.K. Panesar, Accelerated carbonation - A potential approach to sequester CO₂ in cement paste containing slag and reactive MgO, *Cem. Concr. Compos.* 43 (2013) 69–77. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.07.001>.
- [87] K.R.G. Punhagui, L.S. Oliveira, J.F.T. de Souza, V.M. John, *Estudo de Baixo Carbono para a Indústria de Cimento no Estado de São Paulo de 2014 a 2030*, 2018.
- [88] M. Quattrone, S.C. Angulo, V.M. John, Energy and CO₂ from high performance recycled aggregate production, *Resour. Conserv. Recycl.* 90 (2014) 21–33. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.06.003>.
- [89] MCTI, *Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil*, 2020. <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-anuais-de-emissoes-gee> (accessed November 17, 2021).
- [90] D. Suescum-Morales, K. Kalinowska-Wichrowska, J.M. Fernández, J.R. Jiménez, Accelerated carbonation of fresh cement-based products containing recycled masonry aggregates for CO₂ sequestration, *J. CO₂ Util.* 46 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2021.101461>.

- [91] B. Liu, J. Qin, J. Shi, J. Jiang, X. Wu, Z. He, New perspectives on utilization of CO₂ sequestration technologies in cement-based materials, *Constr. Build. Mater.* 272 (2020) 121660. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121660>.
- [92] S.K. Kaliyavaradhan, T.C. Ling, Potential of CO₂ sequestration through construction and demolition (C&D) waste - An overview, *J. CO₂ Util.* 20 (2017) 234–242. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2017.05.014>.
- [93] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 13281 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos, (2005).
- [94] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 16868-1 Alvenaria Estrutural - Parte 1: Projeto, (2020).
- [95] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 13281 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos, (2001).
- [96] Z.H. Duan, C.S. Poon, Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars, *Mater. Des.* 58 (2014) 19–29. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.044>.
- [97] C.M. Copetti, P.M. Borges, J.Z. Squiavon, S.R. da Silva, J.J. de Oliveira Andrade, Evaluation of tire rubber surface pre-treatment and silica fume on physical-mechanical behavior and microstructural properties of concrete, *J. Clean. Prod.* 256 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120670>.
- [98] D. Cecim, Avaliação do ciclo de vida (ACV) de concretos compostos com agregado graúdo de construção e demolição em diferentes teores de substituição, Pontifícia Univ. Católica Do Rio Gd. Do Sul. (2020).
- [99] S.R. da Silva, F.N. Cimadon, P.M. Borges, J.Z. Schiavon, E. Possan, J.J. de O. Andrade, Relationship Between the Mechanical Properties and Carbonation of Concretes With Construction and Demolition Waste, *Case Stud. Constr. Mater.* 16 (2021) e00860. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00860>.



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
Pró-Reitoria de Graduação
Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 1 - 3º. andar
Porto Alegre - RS - Brasil
Fone: (51) 3320-3500 - Fax: (51) 3339-1564
E-mail: prograd@pucrs.br
Site: www.pucrs.br