ESTIMATIVA DE BALANÇO DE EMISSÕES DE CO_2 EM UM PROJETO DE RESIDÊNCIA UNIFAMILIAR A PARTIR DO USO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO COM AGREGADOS RECICLADOS

ESTIMATION OF CO_2 EMISSIONS BALANCE IN A SINGLE-FAMILY HOME PROJECT BASED ON THE USE OF COATING MORTARS WITH RECYCLED AGGREGATES

Lucas Antony Rother[1]; Martina Campos Teichmann[2]; Pietra Moraes Borges[3]; Jairo José de Oliveira Andrade[4].

[1]Graduando | l.rother@edu.pucrs.br | PUCRS | Porto Alegre, Brasil; [2]Graduando | m.teichmann@edu.pucrs.br | PUCRS | Porto Alegre, Brasil; [3]Mestre | pietra.borges@acad.pucrs.br | PUCRS | Porto Alegre, Brasil; [4]Doutor | jairo.andrade@pucrs.br | PUCRS | Porto Alegre, Brasil

Resumo:
O processo de produção de materiais de origem calcária como cimento e cal tem participação importante na liberação de CO_2 na atmosfera. Além disso, a exploração de recursos naturais necessários para construção civil gera inúmeros prejuízos a comunidades e ecossistemas locais. A partir disso, estudos buscam maneiras de mitigar estes problemas, através do uso de materiais recicláveis e a exploração de processos de captura de carbono nas matrizes cimentícias. Nesse sentido, o estudo visa simular a aplicação prática de argamassas de revestimento estudadas por Borges *et al.* (2025) em um projeto de uma residência unifamiliar. Para isso, a partir dos parâmetros físico-químicos e ambientais apresentados no trabalho, foi estimado o balanço de emissões de CO_2 totais da construção após levantamento de quantitativos de materiais e escolha de espessuras de revestimento. Os resultados apontaram reduções na ordem de 75% no balanço de emissões quando 50% de agregado natural é substituído por agregado reciclado. Com isso, o estudo visa demostrar o impacto positivo do uso de materiais alternativos em contribuição com a sustentabilidade na construção civil.

Palavras-chave:
Argamassas; RCD; Captura de CO_2; Circularidade na construção.

Abstract:
The production process of limestone materials such as cement and lime plays a significant role in the release of CO2 into the atmosphere. In addition, the exploitation of natural resources required for civil construction causes countless losses to local communities and ecosystems. Based on this, studies seek ways to mitigate these problems through the use of recyclable materials and the exploration of carbon capture processes in cement matrices. In this sense, the study simulate the practical application of coating mortars studied by Borges *et al.* (2025) in a home project. To this end, based on the physical-chemical and environmental parameters presented, the balance of total CO_2 emissions from the construction was estimated after surveying the quantities of materials and choosing coating thicknesses. Results showed reductions of around 75% in the balance of emissions when 50% of natural is replaced by recycled aggregate. With this, the study aims to demonstrate the positive impact of the use of alternative materials in contributing to sustainability in civil construction.

Keywords:
Mortars; CDW; CO_2 Capture; Circularity in construction.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas causadas pelo aquecimento da temperatura global estão em voga nas discussões científicas ao redor do mundo tendo em vista suas consequências no cotidiano, como secas e inundações, e as perspectivas apontam que suas ocorrências se tornem mais frequentes a cada ano. O aquecimento global observado é causado pelo homem, em decorrência da liberação de gases de efeito estufa, destacadamente o dióxido de carbono CO_2 (IPCC, 2023). A demanda global agregada por recursos materiais tem crescido de forma constante, superando o crescimento populacional (IRP 2020).

Indústria da construção é responsável por aproximadamente 7% das emissões globais de CO_2 todos os anos (GCC, 2018). Em países em desenvolvimento como o Brasil, vide a crescente demanda por infraestrutura, a necessidade de produção de cimento Portland é muito acentuada (Zhai, 2023). Além disso, a exploração de agregados, principalmente areia, para o uso em concretos e argamassas gera inúmeros dados a fluxos hídricos e bacias hidrográficas, de onde esse recurso é majoritariamente extraído (Filho, 2017).

Sob esse viés, a décadas pesquisadores como Batista *et al.* (2022), Ferreira (2022) e Dutra de Lima (2022) estudam o uso de resíduos de construção e demolição (RCD) como substituição aos agregados convencionais, em concretos e argamassas. Outro viés de estudo é a estimação do balanço de captura de carbono em materiais com origem cimentícia, através do processo de carbonatação tendo em vista as emissões geradas durante a produção do material (Felix e Possan, 2014).

Desta maneira, o estudo busca simular o uso de um revestimento argamassado, utilizando 0, 25 e 50% de substituição de agregados naturais (AN) por agregados reciclados (AR), previamente estudados por Borges *et al.* (2025). A partir do volume de revestimento necessário em um projeto arquitetônico, estimara-se o balanço de emissões do material convencional em contrapartida ao que possui porcentagens de substituição por AR. Assim, o projeto pretende contribuir para melhoria da circularidade na construção, diminuição da emissão de CO_2 e do consumo de recursos naturais.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. CARBONATAÇÃO

Entende-se como carbonatação, a reação ocorrida em materiais com matriz cimentícia onde em presença de umidade, o CO_2 forma ácido carbônico, que reage com o Ca $(OH)_2$ para formar $CaCO_3$. A reação procede da superfície do concreto para dentro, mas o faz de forma extremamente lenta. A taxa real de carbonatação depende da permeabilidade do concreto, seu teor de umidade e do teor de CO_2 e da umidade relativa do meio ambiente (Neville, 2010). O avanço dessa camada está diretamente relacionado com a facilidade que o CO_2 encontra para difundir-se através da matriz cimentícia do concreto, principalmente em função da umidade interna do concreto, da estrutura e tamanho dos poros do material e da composição química do cimento (Possan *et al.*, 2013). A reação de carbonatação está representada na Figura 1.

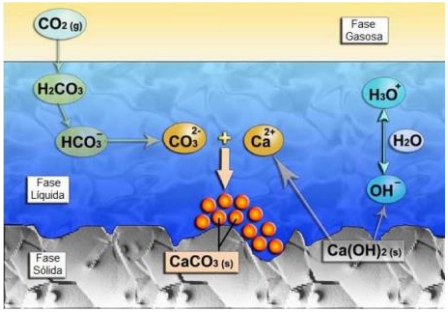


Figura 1: Ilustração do processo de carbonatação.
Fonte: Paulleti (2007).

2.2. BALANÇO DE EMISSÕES DE CO_2

Define-se balanço de emissões como a diferença entre o que foi CO_2 emitido na produção o revestimento e sua captura potencial. Desta maneira, determina-se a captura de CO_2 através de profundidade de carbonatação, gerando resultados em kg de CO_2 por m³, e por análises térmicas onde os resultados são expressos em porcentagens de CO_2 capturado em relação a quantidade de material estudado (Mazurana, 2019). Estima-se que a incorporação de CO_2 aumenta de acordo com o maior teor de incorporação de RCD (Borges *et al.*, 2025).



Figura 2: Carbonatação do concreto versus captura de CO_2.
Fonte: Felix e Possan (2014).

2.3. TRABALHO TÉCNICO DE REFERÊNCIA

Como base para este trabalho, utilizou-se dados do artigo "*Environmental and technical assessment of mortars produced with recycled aggregate from construction and demolition waste"* (2025) onde foram produzidas argamassas e estimados seus parâmetros físico-químicos, de acordo com as normas brasileiras vigentes, e indicadores ambientais de cada mistura. Os principais parâmetros ambientais estimados foram as emissões de produção das argamassas, seu potencial de captura e seu índice de carbonatação. As caracterizações físico-químicas realizadas estão apresentadas na Tabela 1, os resultados utilizados neste estudo na Tabela 2 e os resultados dos parâmetros ambientais na Tabela 3. As argamassas foram produzidas com traço 1:1:6 (cimento, cal, agregado miúdo) e sua consistência foi fixada em 230±10mm com variação na quantidade de água. Além disso, foram fixados 4 teores de substituição do AN por AR de 0, 25, 50, 75 e 100%. Por conseguinte, os autores concluíram que o uso de uma substituição de até 50% de AR tem maior potencial de captura de carbono, além de possuir os melhores indicadores ambientais como balanço de emissões de CO_2, índice de carbono das argamassas, demanda de energia primária e uso de água.

Propriedade	Norma vigente	Dimensões do CP (mm)	Unidades	Idade (dias)
Absorção de água, Porosidade e Massa específica	ABNT NBR 9778: 2009	Prismático (40x40x160)	3	28
Capilaridade	ABNT NBR 9779: 2012	Prismático (40x40x160)	3	28
Resistência de aderência à tração	ABNT NBR 13528-3: 2019	20x500x500	1	28
Resistência a compressão e a tração na flexão	ABNT NBR 13279: 2005	Prismático (40x40x160)	6	28
Carbonatação natural e acelerada	Procedimento próprio	Prismático (40x40x160)	9	1-180

Tabela 1: Ensaios realizados pelos pesquisadores.
Fonte: Traduzido e adaptado de Borges et al. (2025).

Material	Massa específica (kg/m³)	Taxa de carbonatação (mm/dia)
REF	1.710	0,17
25%	1.710	0,16
50%	1.680	0,18

Tabela 2: Resultados utilizados no desenvolvimento.
Fonte: Borges *et al.* (2025).

Indicador	Referência	AR 25%	AR 50%
Emissões (kg.CO_2/m³)	230,26	229,83	228,36
Emissões (kg.CO_2/t)	134,66	134,40	136,75
Captura potencial de CO_2 (kg.CO_2/t)	-42,60	-92,80	-103,70
Balanço de captura de CO_2 (kg.CO_2/t)	92,06	42,60	33,05

Tabela 3: Parâmetros ambientais das argamassas estudadas.
Fonte: Traduzido e adaptado de Borges *et al.* (2025).

3. MÉTODOS

O projeto arquitetônico trata-se de uma residência unifamiliar de alto padrão com 3 pavimentos, contando com 283,72m² de área privada. Localizada na rua Dr. Francisco da Cunha Correa em Porto Alegre/RS, seu projeto foi desenvolvido para a disciplina de Arquitetura I do curso de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. As plantas baixas do projeto estão presentes na Figura 3.

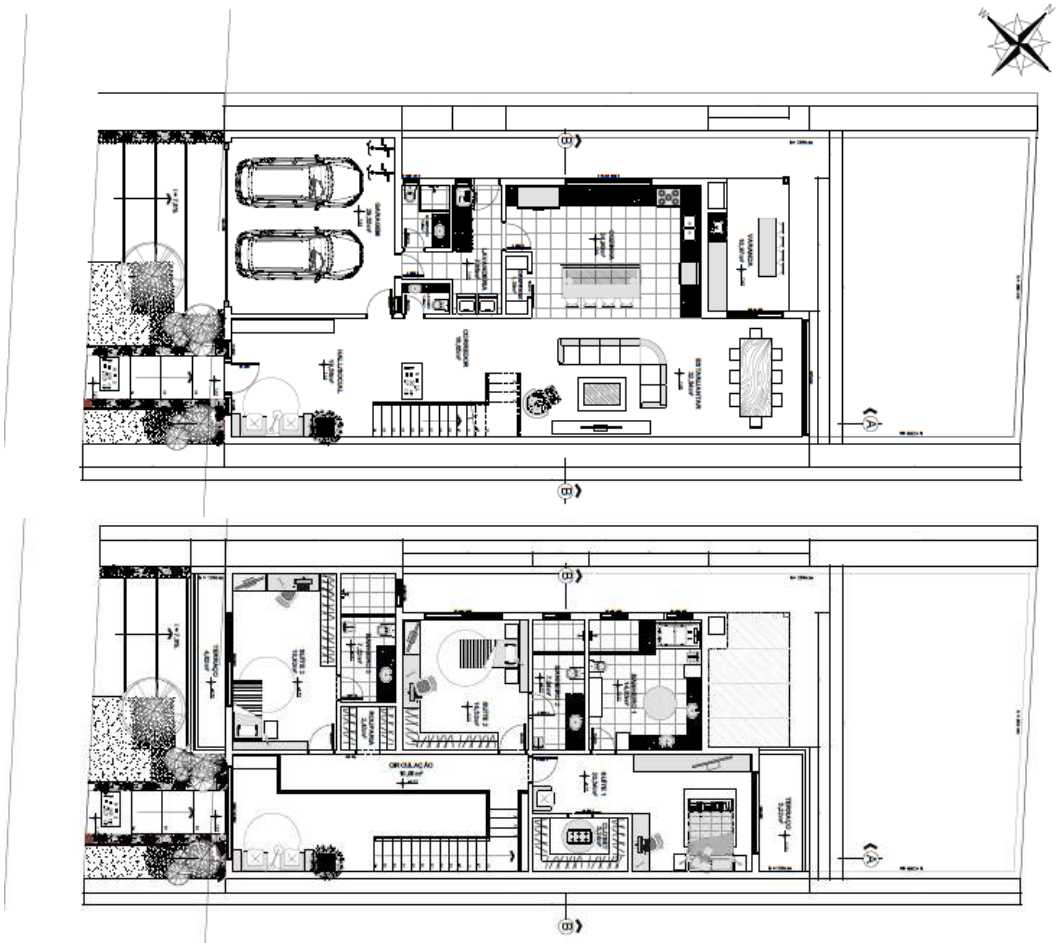


Figura 3: Planta baixa do térreo e do 2º pavimento do projeto arquitetônico estudado.
Fonte: Projeto arquitetônico final- Arquitetura I (2023).

De início, levantou-se os quantitativos de revestimento argamassado necessário a ser executado do projeto estudo. Para isso, separou-se a edificação em ambientes de exposição do revestimento, sendo eles interno, externo protegido e desprotegido. Em seguida, consultou-se a norma ABNT NBR 13749 (ABNT, 2013) a fim de estabelecer espessuras necessárias de revestimento para cada ambiente de exposição conforme Tabela 4.

Revestimento	Espessura (e) mm
Parede interna	5 ≤ e ≤ 20
Parede externa	20 ≤ e ≤ 30
Tetos interno e externo	e ≤ 20

Tabela 4: Espessuras admissíveis de revestimentos Internos e externos.
Fonte: ABNT NBR 13749 (2013).

A partir das especificações, determinou-se as espessuras de parede em 20mm para ambiente internos e 30mm para externos sejam eles protegidos ou não. Em posse das espessuras, calculou-se a área de parede por pavimento em cada ambiente para determinar o volume necessário total de argamassa na obra. Os autores optaram por não considerar o revestimento do teto nos quantitativos, para evitar uma possível super estimação.

Em posse do volume de revestimento necessário, tornou-se possível o cálculo do balanço de emissões para argamassas de referência, 25% e 50% de AR. Para isso, converteu-se o total de argamassa em m³ para massa em toneladas (t), a conversão é mostrada na Equação 1. Em seguida calculou-se as emissões totais de produção e seu potencial de captura total em kg.CO_2/t, apresentados nas Equações 2 e 3. Para a estimativa dos valores de potencial de captura e emissão de produção de CO_2 utilizou-se os dados de referência apresentados na Tabela 2 e multiplicou-se pela quantidade em volume. Após, foi possível estimar o balanço de emissões de cada revestimento conforme Equação 4. Os resultados estão expostos na Tabela 5.

$$M = (\gamma . V)/1000 \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde:
M = massa (t);
γ = massa específico (kg/m³);
V = volume total (m³);

$$\text{Captura total} = \text{Potencial de captura} \times M \quad \text{(Equação 2)}$$

Onde:
Captura total= Captura total (kg.CO_2);
Potencial de captura= Potencial de (kg.CO_2/t);

$$\text{Emissão total} = \text{Emissão produção} \times M \quad \text{(Equação 3)}$$

Onde:
Emissão total= Emissão total (kg.CO_2);
Emissão de produção= Emissão de produção (kg.CO_2/t);

$$\text{Balanço de emissões} = \text{Emissão total} - \text{Captura total} \quad \text{(Equação 4)}$$

Onde:
Balanço de emissões = Balanço de emissões (kg.CO_2);

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 5 contêm os resultados de espessuras adotadas, área total de parede e volume total de revestimento.

Ambiente de exposição	Espessura (mm)	Área total de parede (m²)	Volume total de revestimento (m³)
Interno	20	550,29	11,00
Externo protegido	30	74,44	1,58
Externo desprotegido	30	263,24	7,89

Tabela 5: Quantitativos de revestimento da edificação.

A Tabela 6 contém a determinação da captura total quando a porcentagem carbonatada do revestimento for 100%, emissão total de produção e os resultados do balanço de emissões.

Material	Massa específica (kg/m³)	Massa total (t)	Captura total (kg.CO_2)	Emissão total (kg.CO_2)	Balanço de emissões (kg.CO_2)
REF	1.710	35,05	-1.493,3	+4.720,5	+3.227,2
AR 25%	1.710	35,05	-3.253,1	+4.697,4	+1.444,3
AR 50%	1.680	34,44	-3.571,5	+4.709,7	+1.138,2

Tabela 6: Cálculo do balanço de emissões de CO_2.

Portanto, pode-se concluir que, ao considerarmos que o revestimento estudado atinja um teor de 100% de carbonatação, o balanço de emissões parte de 32% na argamassa de referência, para 76% na que incorpora 50% de AR. Os resultados de balanço de emissões na composição de referência são condizentes com a literatura de Oliveira *et al.* (2024) e Suescum-Morales *et al.* (2021), onde foram estimados 39% e 30% de emissões respectivamente. O comportamento do material com incorporação de AR é explicado por Borges *et al.* (2025) através da contribuição da maior porosidade do agregado, na qual facilita a penetração e difusão do CO_2 na matriz cimentícia, aumentando seu índice de carbonatação assim como observado em Rother *et al.* (2024). Sob esse viés, pode perceber a influência do uso do AR nas emissões de produção do revestimento, visto que, apesar de pequena, há uma diminuição das emissões quando usamos o material alternativo, sendo a menor delas na amostra com 25% AR com 4.697,4 kg de CO_2.

Observando as taxas de carbonatação diárias na Tabela 2, tendo em vista a menor taxa de carbonatação diária, que é de 0,16mm por dia da argamassa com 25% de AR, recomenda-se um intervalo mínimo de 19 dias entre a aplicação do revestimento externo de espessura com 3 cm e de 13 dias para o revestimento interno com espessura com 2 cm e a aplicação da pintura. Desta maneira a carbonatação tenderá a ser completa, assim garantindo as taxas de balanço de emissões apresentadas acima.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados, os autores acreditam que além de viável, o uso de agregados reciclados é uma boa alternativa visando uma economia circular e uma otimização do balanço de emissões de CO_2. Diante disto, as próximas pesquisas terão com objetivo a otimização deste processo, visando a redução das emissões de produção e o aumento do potencial de captura. Logo, espera-se que o emprego dessas tecnologias chegue o mais breve possível aos canteiros de obras para que assim, haja avanços na direção de uma construção sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13528-3**: Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência `a tração na flexão e à compressão, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13749**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas — Especificação, 2013.

BORGES, P. M.; ROTHER, L. A.; SILVA, S. R.; POSSAN, E.; ANDRADE, J. J. O. Environmental and technical assessment of mortars produced with recycled aggregate from construction and demolition waste. **Construction and Building Materials**, 467, 2025.

DE LIMA, D. D. **Obtenção e caracterização de Argamassas de Revestimento produzidas com Resíduos de Construção e Demolição (RCD) como Agregado Reciclado**, 2022.

BATISTA, B. C. C. Influência da adição de RCD misto na resistência à compressão e na porosidade de argamassa. **Revista Principia-Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB,** 2022.

FELIX, E.; POSSAN, E. Sequestro de CO2 em estruturas de concreto em uma perspectiva de 100 anos. In: **56º Congresso Brasileiro do Concreto**, Natal, 2014.

FERREIRA, R. L. S. **Efeitos da incorporação de areia reciclada de resíduos de construção e demolição (RCD) em argamassas mistas de revestimento**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

FILHO, L. C. Z.; QUADROS, T. F. P. Efeito da dinâmica fluvial e da ação antrópica sobre a erosão de margens fluviais: o caso da mineração de areia no rio Jacuí. **Revista de ciências ambientais** - RCA (ISSN 1981-8858), v. 11, n. 1, 2017.

Global Cement and Concrete Association, **GNR Project,** 2018. Disponível em: https://gccassociation.org/gnr/.

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change. **Global Warming**: Summary for Policymakers, Panmao Zhai, 2023.

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers**. In: Climate Change 2023**: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2023, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001

IRP. Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future. Hertwich, E., Lifset, R., Pauliuk, S., Heeren, N. **A report of the International Resource Panel**. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya.

MAZURANA, L. **Captura de CO2 em argamassas de revestimento através da carbonatação.** Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2019.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Concrete technology.** 2ed. London, England: Pearson Education Limited, 2010.

OLIVEIRA, D. R. B.; PROENÇA, M. P.; RISSON, K. D. B. D.; DAMOLIER, C. A.; POSSAN, E. Avaliação da captura de carbono em argamassas de revestimento durante a fase construtiva: um estudo de caso. **Congresso da construção**. 2024.

POSSAN, E.; HEINEN, M. H.; DONDÉ, A. Potencial de captura de CO_2 por carbonatação do concreto: UHE de Itaipu. **Revista Concreto n.71**, 2013.

ROTHER, L. A.; BORGES, P. M.; SHACKER, T. P.; SANTOS, H. K.; SILVA, S. R.; ANDRADE, J. J. O. Avaliação das propriedades físico-mecânicas de argamassas produzidas com agregado reciclado misto. **Anais do 65º Congresso Brasileiro do Concreto.** 2024.

SUESCUM-MORALES, D.; CANTADOR-FERNÁNDEZ, D.; JIMENEZ, J. R.; FERNENDÉZ, J. M. Potential CO_2 capture in one-coat limestone mortar modified with $Mg_3Al–CO_3$ calcined hydrotalcites using ultrafast testing technique. **Chemical Engineering Journal.** 2021.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece a PUCRS pela bolsa PUCRS-BITI (2024/2025), e a todos os colegas que deram suporte ao desenvolvimento do trabalho.