



CAPTURA DE CARBONO EM ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM AGREGADO RECICLADO DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.6.23.VII-006>

Pietra Moraes Borges (*), Eduardo Rigo, Edna Possan, Jairo José de Oliveira Andrade

* Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais. E-mail: Pietra.borges@acad.pucrs.br.

RESUMO

Ao longo dos últimos anos tem sido cada vez mais importante a agenda ambiental para empresas e governos. A construção civil, entretanto, tem grande impacto tanto nas atividades econômicas quanto no impacto ambiental da indústria brasileira. Os materiais a base de cimento têm grande parcela de responsabilidade nos impactos visto que são os mais utilizados e que carregam consigo grande emissões de CO₂. A partir disso, a presente pesquisa propõe-se a investigar o impacto do uso de agregados reciclados de resíduo de construção e demolição (RCD) em sua parcela fina. Com isso, tem-se como objetivo diminuir o impacto gerado para a produção de argamassas de revestimento. Para tal, foram moldados corpos de prova com 25, 50, 75 e 100% de substituição de material natural por reciclado. Para avaliar a captura de carbono foi realizado procedimento de termogravimetria. A partir dos resultados obtidos, foi possível concluir que todas as argamassas têm potencial para aplicação como revestimento e obtiveram captura de CO₂ maior do que as produzidas com agregados naturais.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduo de Construção, Captura de CO₂, Propriedades Mecânicas, Argamassas de Revestimento.

ABSTRACT

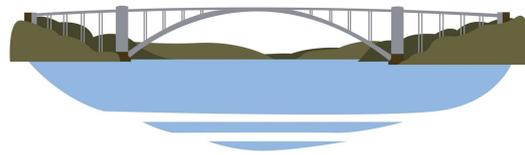
Over the past few years, the environmental agenda has become increasingly important for companies and governments. Civil construction, however, has a great impact both on economic activities and on the environmental impact of Brazilian industry. Cement-based materials are largely responsible for the impacts, as they are the most used and carry large CO₂ emissions. From this, the present research proposes to investigate the impact of recycled aggregate of construction and demolition waste (CDW) in its fine portion. With this, the objective is to reduce the impact generated for the production of coating mortars. For this, specimens were molded with 25, 50, 75 and 100% replacement of natural aggregate by recycled material. To evaluate the mechanical properties, compressive strength and flexural strength tests were carried out. To evaluate carbon capture, a thermogravimetry procedure was performed. From the results obtained, it was possible to conclude that all mortars have the potential for application as a coating and obtained higher CO₂ capture than those produced with natural aggregate.

KEY WORDS: Construction Waste, CO₂ uptake, Mechanical Properties, Coating Mortar.

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 (CO₂), metano, óxido nitroso, clorofluorcarbonetos (CFC), vapor de água e ozônio. O CO₂ 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% da concentração de CO₂ na atmosfera, passando de 280ppm para 419,2ppm em 2022 (2). Esse aumento exponencial fomenta o processo de mudança climática de pode gerar consequências como: mudança nos padrões de precipitação, maior frequência e períodos mais longos de seca, aumento do 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 fauna e flora, entre outros (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 decarbonatação da rocha calcária e o uso de combustíveis fósseis (4). No Brasil, são emitidos em média 832 kg de CO₂ 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 podem-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).

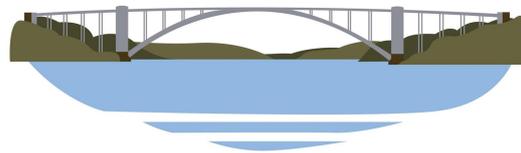
OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivo geral investigar o uso da fração fina do agregado reciclado de resíduo de construção e demolição na produção de argamassas de revestimento. Tem-se como objetivos específicos:

- Investigar o melhor percentual de substituição de material natural por material reciclado.
- Análise do impacto do uso de material reciclado nas propriedades físicas e mecânicas das argamassas de revestimento.
- Contabilizar a captura de CO_2 nas argamassas analisadas.

MATERIAIS

Para produção das argamassas foi utilizado cimento do tipo CPV-ARI com massa específica de $3,14\text{g/cm}^3$. A cal utilizada foi do tipo CHIII com massa específica de $2,43\text{g/cm}^3$ e massa unitária de $0,63\text{g/cm}^3$. A areia natural foi do tipo quartzosa oriunda do lago Guaíba em Porto Alegre - RS. O agregado reciclado foi doado de uma obra no município



de Porto Alegre e foi previamente separado (com o objetivo de retirar qualquer material contaminante) e britado para se tornar um material de granulometria fina.

O resíduo era composto de 40,6% argamassa, 28% cerâmica, 19,6% basalto e 11,8% de outros materiais como papel, madeira, plástico e metal. Esses últimos 11,8% foram retirados da amostra por não serem considerados agregados reciclados de acordo com a classificação da resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (22). As propriedades físicas dos dois tipos de agregados miúdos utilizados encontram-se na tabela 1 e a composição granulométrica antes do processo de separação consta na figura 1.

Tabela 1. Propriedades físicas dos agregados utilizados (23, 24)

Propriedades	Agregado miúdo	
	AN	AR
Dimensão máxima (mm)	4.75	4.75
Módulo de finura	1.62	2.18
Massa específica (kg/dm ³)	2.63	2.38
Massa unitária (kg/dm ³)	1.61	1.34
Absorção de água (%)	0.4	8.1

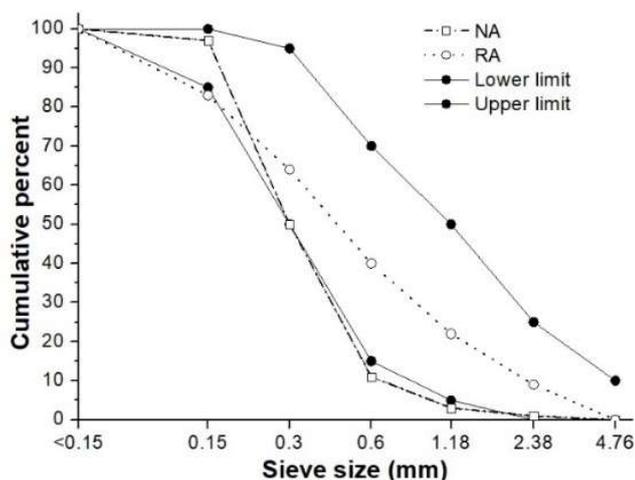


Figura 1: Composição granulométrica dos agregados (25)

Além disso, foi realizada fluorescência de Raios-x para caracterização química dos materiais aplicados na produção das argamassas, como apresentado na tabela 2.

Tabela 2. Fluorescência de Raios-X do cimento, cal e agregado reciclado

Materiais	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃	Na ₂ O	PF
Cimento CPV	17.78	3.92	61.96	4.08	0.78	3.28	0.01	5.42
Cal CHIII	17.35	0.15	42.38	26.51	<LQ	<LQ	<LQ	27.52
AR	58.11	10.01	11.57	2.10	1.67	0.38	0.61	10.78

Onde PF = perda ao fogo e LQ = limite quantificável

A variação das propriedades físicas pode ser explicada, majoritariamente, pela natureza do agregado reciclado e sua variabilidade. Para avaliar a influência da composição granulométrica, 3 faixas granulométricas foram utilizadas. A primeira, denominada G4,8, foi composta de material passante na peneira 4,8mm; a segunda, denominada G2,4, foi composta de material passante na peneira 2,4mm; E, por fim, a última foi denominada G2,4W e foi composta de material passante na peneira 2,4mm lavado em água corrente até que fosse descartado todo material inferior a 0,15mm. A figura 2 apresenta os dados obtidos a partir do procedimento de difração de Raios-X.

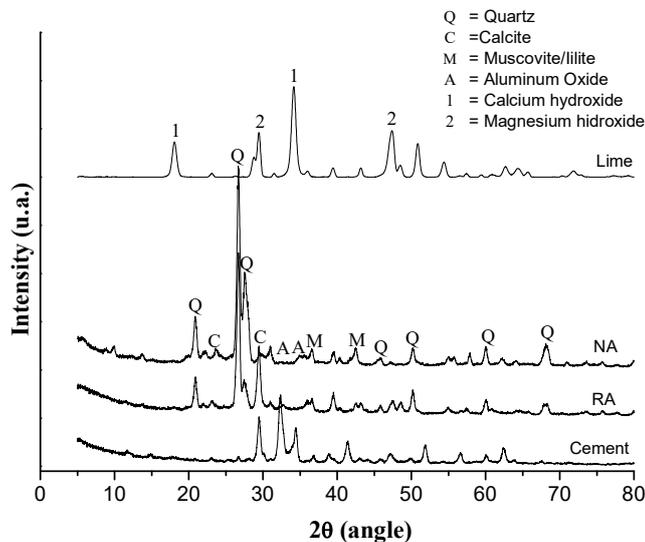
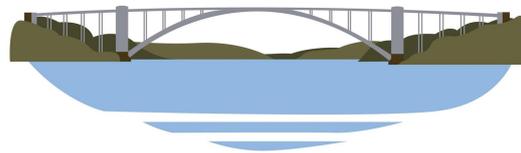


Figura 2: Difração de Raios-X dos materiais utilizados

MÉTODO

As argamassas foram dosadas de forma a manter uma trabalhabilidade de 260 ± 10 mm, com diferentes relações água-cimento (a/c) de acordo com a necessidade de água para atingimento da trabalhabilidade desejada. O AR foi utilizado em 4 percentuais de substituição (25, 50, 75 e 100%) em massa. Além disso, o AR foi incorporado seco. Em razão das diferenças físicas entre material natural e reciclado, foi aplicado método de compensação de massas específicas (equação 1). Método semelhante foi utilizado por Lovato (26).

$$M_{AR} = M_{AN} \times (\gamma_{RA} / \gamma_{NA}) \quad \text{equação (1)}$$

Onde M_{AR} = massa de agregado reciclado (kg), M_{NA} = massa de agregado natural (kg), γ_{RA} = massa específica do agregado reciclado (kg/dm^3) e γ_{NA} = massa específica do agregado natural (kg/dm^3). As misturas obtidas estão apresentadas na tabela 3.

Tabela 3. Proporções utilizadas

Argamassa	Proporção*	Materiais (kg/m^3)			
		Cimento	Cal	AN	AR
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

*cimento:cal:agregado natural:agregado reciclado:a/c

Os dados para obtenção das propriedades físicas, mecânicas, térmicas e de durabilidade advêm de ensaios padronizados ou de procedimentos de laboratório sugeridos por demais autores. Todos os corpos de prova foram mantidos em cura, em ambiente de laboratório, por 24 horas e, depois disso, foram submersos em água por mais 27 dias. Todos os ensaios realizados e suas respectivas normativas estão apresentados na tabela 4.

Tabela 4. Ensaios e procedimentos realizados

Propriedades	Normas e procedimentos	Dimensões	Unidades	Idade (dias)
Absorção de água por imersão (A)	NBR 9778	Prismático (40 × 40 × 160 mm)	3	28
Porosidade (P)				
Massa específica (B) (27)				
Absorção de água por capilaridade (28)	NBR 9779	Prismático (40 × 40 × 160 mm)	3	28
Resistência à compressão (f _c) (29)	NBR 13279	Prismático (40 × 40 × 160 mm)	6	28
Resistência à tração (f _t)			3	
Carbonatação Acelerada	Procedimento de laboratório	Prismático (40 × 40 × 160 mm)	3	28 a 38 dias
Microtomografia de Raios-X (μ-CT)	Procedimento Específico	Cubos (a – 10 mm)	-	28
Termogravimetria	Procedimento sugerido por Scleriver (30) e Neves Junior (31)	Pó	-	28

A carbonatação acelerada foi realizada em câmara de carbonatação com concentração de 3% de CO₂, temperatura ambiente (de 15 a 25°C) e umidade de 60±10%. Para medição da área carbonatada foi utilizada aspersão de fenolftaleína a 1%, a fenolftaleína altera sua coloração de acordo com o pH do material. A área carbonatada permanece cinza enquanto a área não-carbonatada torna-se rosa. Os corpos de prova foram avaliados de 24 em 24h até que a carbonatação fosse total.

A análise termogravimétrica foi feita com amostra pulverulentas retiradas das áreas carbonatada, semi-carbonatada e não-carbonatada. A partir da termogravimetria é possível observar a perda de massa em determinadas faixas de temperatura e, assim, determinar a quantidade de carbonatos presente em cada amostra. O pó foi extraído utilizando uma espátula Lecron, após isso, o material foi moído em almofariz até que tivesse tamanho de partícula passante na peneira 0,15mm. Uma vez finalizado esse processo, a amostra foi mantida em Eppendorf lacrado visando interromper completamente o processo de carbonatação. As análises térmicas foram feitas em equipamento Percking Elmer Modelo STA6000 com cadinho de alumina, em atmosfera de nitrogênio a 20mL/min. Aquecimento de 20°C/min, utilizando 50mg de amostra. O material foi submetido a 60min a 35°C para liberação de água livre e depois ao aquecimento de 35 a 950°C como sugerido por Scleriver (30) e Neves Junior (31).

A análise de microtomografia de Raio-X foi realizada em um equipamento da marca Bruker SkyScan modelo 11173, com energia operacional de 50kV, corrente elétrica de 0,3mA e resolução de 10μm. O teste foi realizado com amostras cúbicas de aproximadamente 1cm³, extraídas dos corpos de prova após os 28 dias de cura. Técnica semelhante foi utilizada por Lu *et al.* (32) Para observar a estrutura dos poros em amostras de concreto. Gallucci *et al.* (33) Utilizaram para quantificar o cimento anidro e a tortuosidade da rede de poros em pastas de cimento. Saha concluiu que a microtomografia de Raios-X é um método eficaz para analisar os poros em materiais a base de cimento.

Para realização do balanço de emissões é necessário, inicialmente, obter os valores de emissões individuais dos materiais utilizados. Dessa forma, a equação 2 foi utilizada para calcular as emissões associadas ao cimento.

$$E_{\text{cim}} = E_{\text{cliquer}} \times \%C_{\text{cim}} + E_{\text{energia}} \times FE \quad \text{equação (2)}$$



Onde E_{cim} = emissão para produção do cimento ($kg.CO_2/t$), $E_{clínquer}$ = emissão para produção do clínquer ($kg.CO_2/t$), C_{cim} = presença de clínquer no cimento (%), $E_{energia}$ = energia mobilizada no processo (kWh/t) e FE = fator de energia que correlaciona a quantidade de energia utilizada com a emissão por kWh. Para alimentar a equação, o dado obtido a partir do GNR Project (5) afirma que, no Brasil, emite-se 832 $kg.CO_2$ por tonelada de clínquer. Além disso, de acordo com a NBR 16697 (34), o cimento CPV pode ter de 90 a 100% de clínquer. O consumo de energia varia, de acordo com Azbe e Maerz, entre 32 e 50 kWh/t a depender do tipo de forno utilizado. Além destes dados relativos à produção de cimento, é necessário calcular o total para produção das argamassas como demonstrado pela equação 3.

$$E_{arg} = E_{cim} \times Q_{cim} + E_{cal} \times Q_{cal} + E_{AN} \times Q_{AN} + E_{AR} \times Q_{AR} \quad \text{equação (3)}$$

Onde E_{arg} = emissões para produção da argamassa ($kg.CO_2/m^3$), Q_{cim} = consumo de cimento no traço (kg/m^3), E_{cal} = emissões da produção de cal ($kg.CO_2/m^3$), Q_{cal} = consumo de cal no traço (kg/m^3), E_{AN} = emissões do agregado natural ($kg.CO_2/m^3$), Q_{AN} = consumo de agregado natural no traço (kg/m^3), E_{AR} = emissões do agregado reciclado ($kg.CO_2/m^3$) e Q_{AR} = consumo de agregado reciclado no traço ($kg.CO_2/m^3$). John, Punhagui e Cincotto (35) estimaram entre 419 e 694 $kg.CO_2$ na produção da cal do tipo CHIII no Brasil. Para o agregado natural, o dado obtido a partir do estudo de Santoro (36), estima 4 $kg.CO_2/t$ para a região de Porto Alegre – RS, esse valor pode chegar a 86 $kg.CO_2/t$ para outras regiões do Brasil. Para o agregado reciclado foi utilizada emissão de 1,5 $kg.CO_2/t$ (37). O fator de emissão na produção de energia elétrica, no Brasil, é de 0,08 $kg.CO_2/kWh$ de acordo com dados do Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (38). O mesmo fator de emissão foi utilizado para todas as matérias primas. O total de CO_2 capturado pelas argamassas é calculado a partir da TGA/DTG, utilizando a equação 4. O mesmo método foi utilizado por Rigo (39), Mazurana (40) e Morales (41).

$$CO_{2ab} = \Delta CO_2CC + \Delta CO_2Mg \quad \text{equação (4)}$$

Onde CO_{2ab} = dióxido de carbono absorvido pela argamassa (%), ΔCO_2CC = diferença na presença de carbonato de cálcio entre a argamassa carbonatada e a não-carbonatada (%) e ΔCO_2Mg = diferença na presença de carbonato de magnésio entre a argamassa carbonatada e a não-carbonatada. Estas diferenças são obtidas a partir da análise dos picos nos gráficos da derivada da termogravimetria. O balanço final de emissões (BE) é definido pela equação 5.

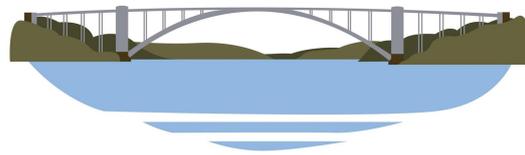
$$BE = E_{arg} - CO_{2ab} \quad \text{equação (5)}$$

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para as propriedades físicas e mecânicas foi realizada análise de variância (ANOVA) com o objetivo de verificar se as alterações observadas são ou não estatisticamente significativas. A tabela 5 traz esses resultados.

Tabela 5. ANOVA dos resultados obtidos

Propriedades	Fonte de variação	DF	Soma dos quadrados	Média	Teste-F	Valor de p	Significância
Resistência à compressão (fc)	Tipo de agregado	2	84.32	42.17	51.24	0.0000	Sim
	% de substituição	4	10.57	2.64	3.21	0.0173	Sim
	Tipo de agregado ‘ % de substituição	8	41.38	5.17	6.29	0.0000	Sim
	Erro	74	60.88	0.82			
Resistência à tração na flexão (ft)	Tipo de agregado	2	1.03	0.52	8.80	0.0010	Sim
	% de substituição	4	1.05	0.26	4.48	0.0061	Sim
	Tipo de agregado ‘ % de substituição	8	0.97	0.12	2.07	0.0720	Não
	Erro	29	1.70	0.06			
Absorção por imersão	Tipo de agregado	2	80.97	40.49	106.34	0.0010	Sim
	% de substituição	4	299.11	74.78	196.41	0.0000	Sim
	Tipo de agregado ‘ % de substituição	8	94.22	11.78	30.93	0.0000	Sim

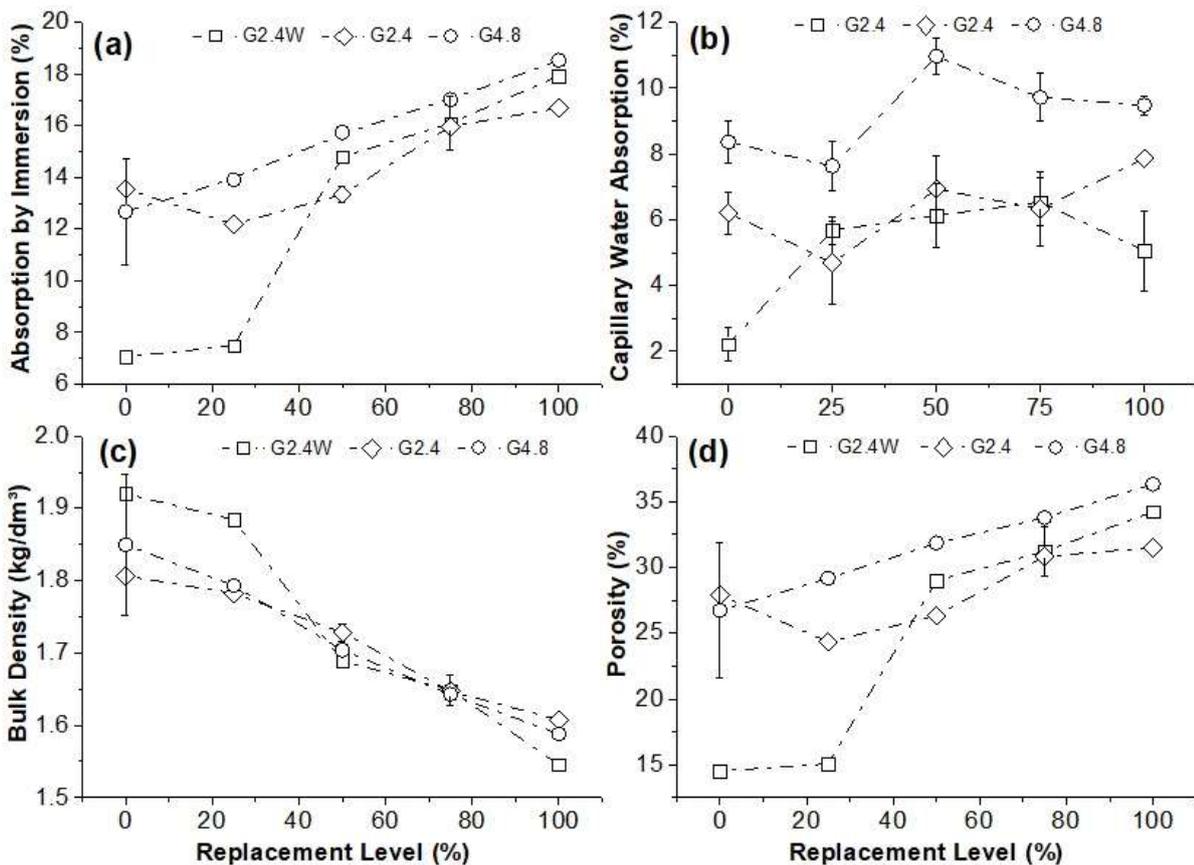


	Erro	30	11.42	0.38			
Absorção por capilaridade	Tipo de agregado	2	155.10	77.55	120.63	0.0000	Sim
	% de substituição	4	34.16	8.54	13.28	0.0000	Sim
	Tipo de agregado + % de substituição	8	33.21	4.15	6.45	0.0000	Sim
	Erro	30	19.29	0.64			
Porosidade	Tipo de agregado	2	437.75	218.87	103.54	0.0000	Sim
	% de substituição	4	827.23	206.81	97.93	0.0000	Sim
	Tipo de agregado + % de substituição	8	396.75	49.59	23.48	0.0000	Sim
	Erro	30	63.36	2.11			
Massa específica	Tipo de agregado	2	0.0098	0.0049	6.8	0.0036	Sim
	% de substituição	4	0.4498	0.1125	157.7	0.0000	Sim
	Tipo de agregado + % de substituição	8	0.0442	0.0055	7.7	0.0000	Sim
	Erro	30	0.0214	0.0007			

A partir do resultado da ANOVA é possível observar que, à exceção da combinação de tipos de agregado com percentual de substituição para tração na flexão, todos demais tiveram significância estatística. Por meio do teste-F também é possível perceber que o ponto de maior influência foi o percentual de substituição aplicado para absorção por imersão. Isso ocorre devido à grande diferença de natureza dos agregados e devido à divergência entre suas características de absorção (0,4% para o agregado natural e 8,1% para o agregado reciclado).

Propriedades Físicas

Os resultados das propriedades físicas estão apresentados na figura 3, onde (a) representa absorção por imersão, (b) absorção de água por capilaridade, (c) massa específica e (d) porosidade.



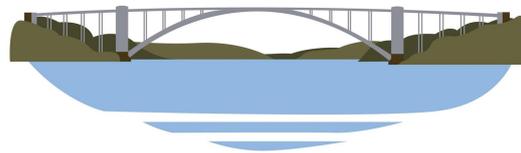


Figura 3: Propriedades Físicas

É possível ver uma variabilidade grande nas propriedades físicas entre traços de argamassa. Mesmo comportamento é encontrado em diversos outros artigos que tratam sobre agregados reciclados aplicados em materiais a base de cimento (3, 42-44). G4,8 teve a maior absorção de água por capilaridade, comparado com as outras granulometrias e G2.4W foi a menor. Absorção por imersão se mostrou menor na G2.4W e maior na G4.8. Isso pode ser explicado pela diferença nas relações água-cimento (a/c), G4.8_25 teve $a/c = 1,30$ enquanto G2.4W_25 teve $a/c = 1,23$, por exemplo. A menor absorção por capilaridade, mas maior absorção por imersão da argamassa G2.4W pode ser explicada a partir dos resultados de microtomografia (figura 5) onde é possível ver que os poros estão presentes, mas estão menos interconectados. Em geral, os resultados foram os esperados, queda da massa específica e aumento de porosidade, absorção por imersão e absorção por capilaridade, quando substituído o material reciclado por natural (45).

Propriedades Mecânicas

Os resultados obtidos nos ensaios mecânicos de resistência à compressão e à tração estão apresentados na figura 4.

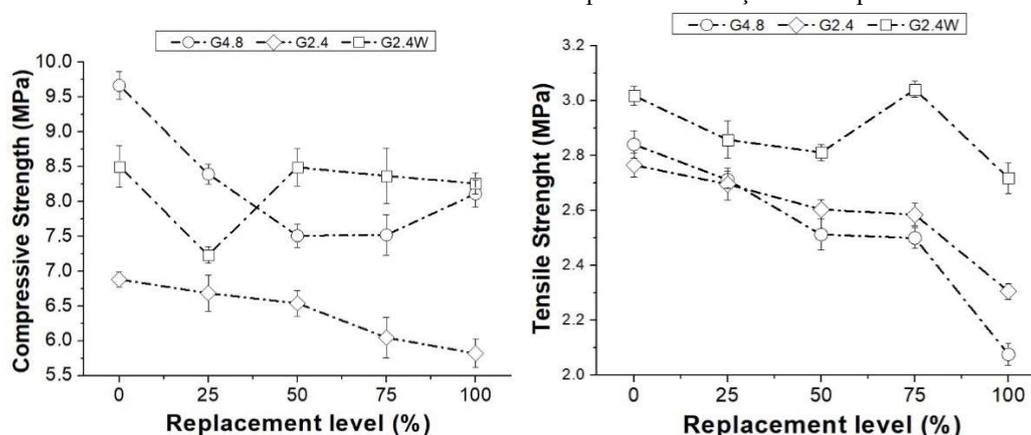


Figura 4: Propriedades mecânicas

É possível perceber que, para resistência à compressão, a tendência de queda linear não ocorre. Esses resultados são explicados pela alta variabilidade do agregado reciclado misto e pelas características do uso desse material em argamassa. Outros autores como Ferreira *et al.* (45) também encontraram resultados semelhantes. Entretanto, para resistência à tração é possível observar a tendência de perda linear com o aumento do percentual de substituição. A argamassa G2.4 foi a que obteve menor f_c e a G4.8 de referência e com 25% foram as que obtiveram maiores valores. Esses resultados estão em concordância com os obtidos nas propriedades físicas (figura 3) e com os resultados de microtomografia (figura 5) que mostraram que a G4.8 obteve menor valor de porosidade. Isso acontece, pois, a granulometria G4.8 compreende maior distribuição, promovendo densificação da matriz por conter desde partículas maiores até o material pulverulento.

Microtomografia de Raios-X

As análises microtomográficas foram realizadas com o objetivo de mapear os poros das estruturas e calcular a porosidade em pequenas regiões as argamassas utilizadas. Mesmo procedimento foi adotado por Lanzon (46).

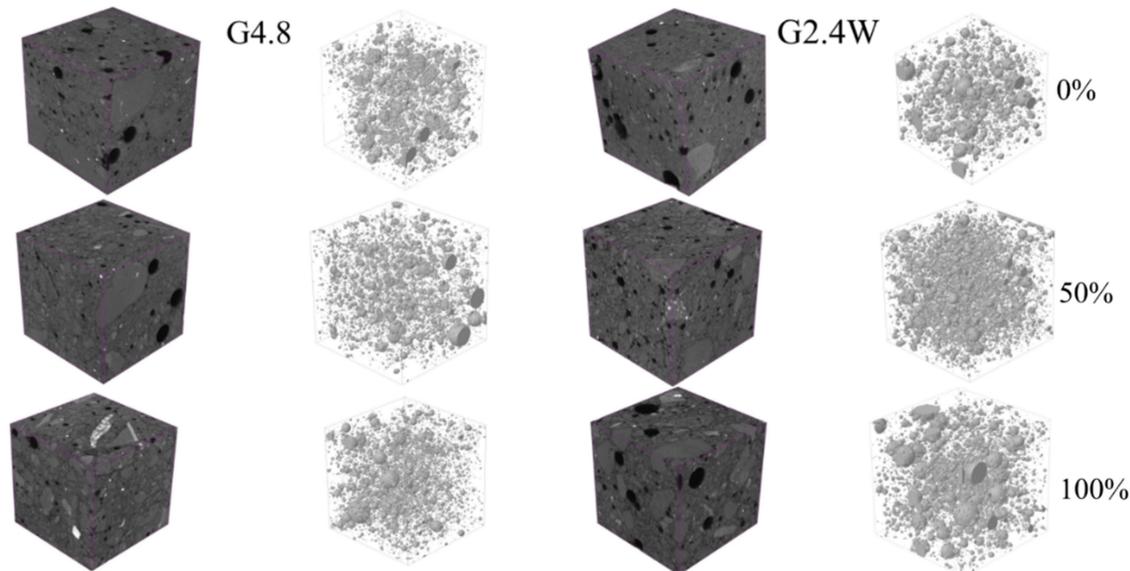
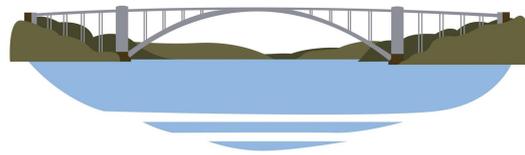


Figura 5: Microtomografia de Raios-X

G4.8_50 apresentou a menor porosidade com 2,74% e é possível observar pequenos poros com formato esférico. A mais porosa foi a G2.4W_100 com 6,32%, apresentando uma mistura de poros esféricos com poros interconectados. Resultados similares foram encontrados por Copetti *et al.* (47), cujo trabalho constatou que a presença de agregado reciclados altera significativamente o tamanho, formato e distribuição dos poros das amostras. As argamassas, por fim, tiveram valores de porosidade de 2,74% para G4.8_50, seguida por G4.8_100 (4,10%), G2,4W_0 (5,06%) e G2.4W_50 (5,31%). Comparando os extremos opostos é possível observe que a argamassa G4.8_50 é 2,3× menor porosa que a que apresentou maiores valores.

Termogravimetria

Para análise termogravimétrica (figura 6) o pico correspondente a temperatura de 35 a 250°C representa a liberação de água livre presente na amostra. De 250 a 400°C, a água associada ao hidróxido de magnésio é liberada. Tal composto apresenta-se em virtude do tipo de cal utilizada no processo de fabricação das argamassas. O pico entre 400 e 450°C representa a liberação de água associada ao hidróxido de cálcio. Os picos de hidróxidos podem ser identificados com bastante proeminência em amostrar não-carbonatadas. Entre 650 e 800°C forma-se o pico representante do CO₂ liberado do carbonato de cálcio. Para algumas curvas, é possível realizar a deconvolução para identificar melhor os hidróxidos de cálcio e magnésio. Mesmo processo foi realizado por Mo *et al.* (48). Calculando a diferença entre as massas volatilizadas é possível medir o CO₂ incorporado ao material durante o processo de carbonatação.

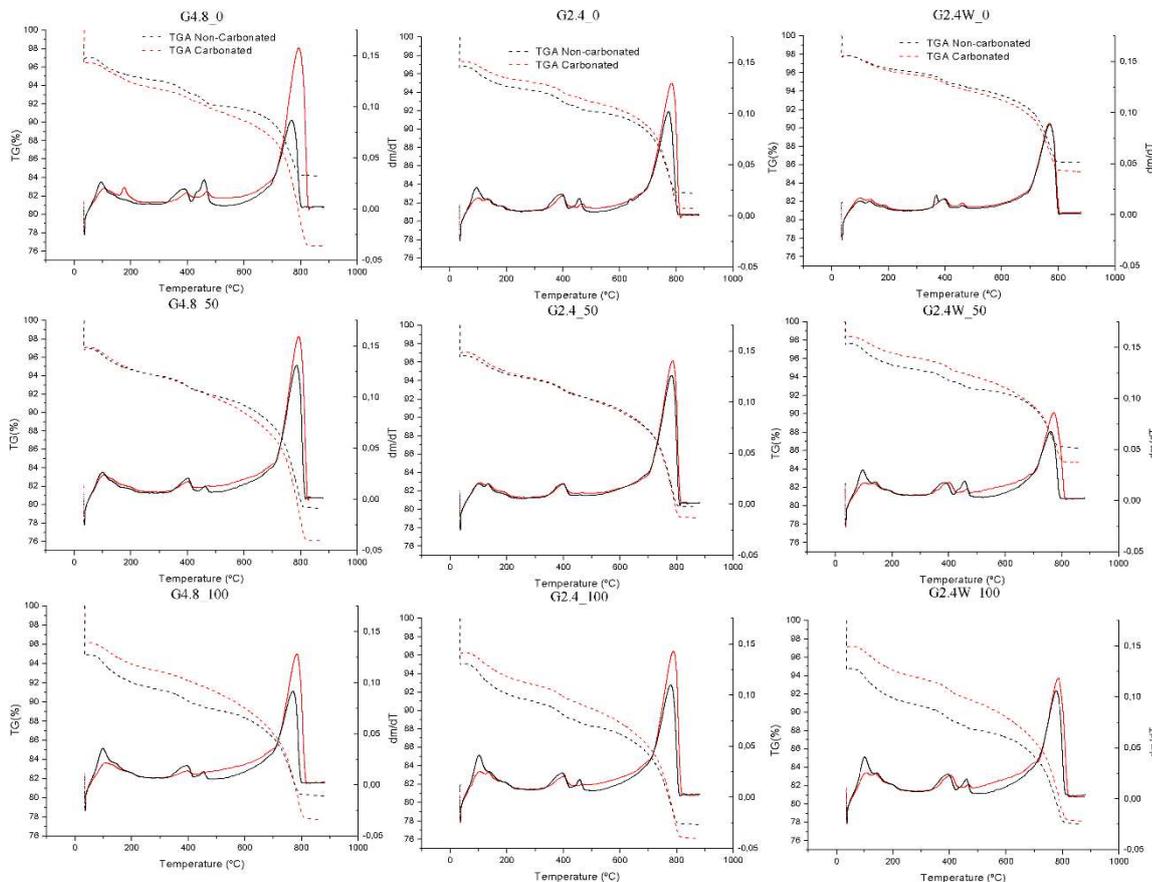
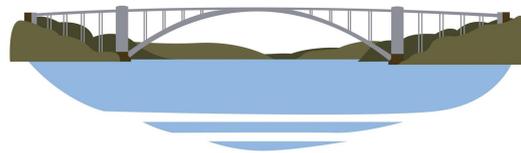


Figura 6: Termogravimetria

É possível observar uma grande variabilidade nos resultados devido a variabilidade no agregado reciclado misto e os diferentes graus de carbonatação em que o agregado se encontrava mesmo antes do processo de mistura. G2.4_100 foi a argamassa que se mostrou com maior captura de carbono (comparando amostra carbonatada e não-carbonatada). A reserva alcalina do agregado reciclado pode explicar esse comportamento, mesmo ele já estando quase totalmente carbonatado quando incorporado à argamassa. Entretanto, G2.4W_0 apresentou pouquíssima diferença nas curvas sem processo de deconvolução, isso ocorre devido a sobreposição de curvas. Ao realizar o processo, é possível identificar todos os picos mencionados. Para argamassas de referência, G4.8 foi a que apresentou melhor captura de dióxido de carbono. A tabela 6 trás os resultados de balanço de emissões considerando dados da literatura sobre emissões e os dados de captura de carbono obtidos no projeto.

Tabela 6. Balanço de emissões

Amostra	Captura de CO ₂ (%)	Captura de CO ₂ (kg.CO ₂ /m ³)	Balanço de Emissões (kg.CO ₂)	
			Cenários	
			Melhor	Pior
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

CONCLUSÕES

O objetivo geral desta pesquisa foi avaliar a influência do agregado reciclado misto, em 3 granulometrias distintas, propriedades físicas, mecânicas, microestrutura e captura de carbono. É possível traçar, a partir dos resultados obtidos, algumas conclusões relevantes a respeito do tema:

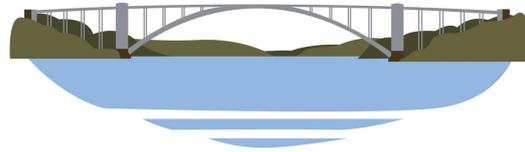
- Todas as argamassas tiveram desempenho satisfatório de acordo com padrões nacionais e internacionais. Todas podem ser aplicadas como revestimento ou assentamento, inclusive para fins estruturais.
- Considerou-se que, para percentuais de substituição de até 50%, é aplicável a substituição de material natural por reciclado.
- A argamassa que obteve melhor balanço de emissões foi a com tamanho de partícula inferior a 2,4mm e com 100% de agregado reciclado, ela reabsorveu 63% do CO₂ emitido no processo de produção.
- Os resultados mostraram que o processo de lavagem do agregado reciclado não é interessante visto que não melhora significativamente as propriedades avaliadas e ainda adiciona um processo extra, levando a maior uso de água e energia.
- Considerando todas as propriedades analisadas e levando em conta que, quanto maior o percentual de substituição maior a captura de CO₂, porém, quanto maior o percentual maior a queda nas propriedades físico-mecânicas, optou-se por escolher a argamassa G2.4_50 como a que obteve melhor desempenho geral.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **What is the greenhouse effect?** Global Warming. Live Science. <https://www.livescience.com/37743-greenhouse-effect.html> (accessed November 15, 2021).
2. NOAA, **Trend in atmospheric carbon dioxide**, (2021)
3. S.K. Kaliyavaradhan, T.C. Ling, **Potential of CO₂ sequestration through construction and demolition (C&D) waste - An overview**, Journal of CO₂ Utilization. 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. GCCA, **GNR Project**, (2018). <https://gccassociation.org/gnr/>.
6. V. John, **Estratégias Para Mitigação Do CO₂ Na Cadeia Produtiva Do Concreto**, (2019).
7. WBCSD - WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, **Roadmap Tecnológico**, (2020).
8. Associação Brasileira de Normas Técnicas (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**, Journal of Building Pathology and Rehabilitation. 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. BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, **Boletim do Setor Mineral**, 2019.
14. A. Bianchini, F. Cento, A. Guzzini, M. Pellegrini, C. Saccani, **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 and Technology, 2013: pp. 379–429.



17. K. Kochem, **Potencialidades De Logística Reversa Do Resíduo De Gesso Da Indústria Da Construção Civil**, Trabalho de Dissertação Apresentado Como Requisito Final Para Obtenção Do Título de Mestre Em Tecnologias Ambientais, Do Programa de Pós-Graduação Em Tecnologias Ambientais – PPGTAMB – Da Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, Câmpus Medianeira. (2016).
18. P. Borges, M. C. Wenzel, J. Z. Schiavon, J.J.O. Andrade **Evaluation of the Healing Conditions in Strength Recovery in Concretes Early Loaded (Self-Healing)**, Civil Engineering Research Journal. (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 Studies in Construction Materials. 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 de Doutorado. Universidade Federal Do Rio de 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. Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), **Resolução nº 307**, (2002).
23. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), **NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. (2006) 8p.
24. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), **NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente**, Rio de Janeiro. (2003).
25. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), **NBR NM 248: Agregados-Determinação da composição granulométrica**, Rio de Janeiro. (2003).
26. 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>.
27. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**, (2009).
28. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, **NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade**, (2012).
29. 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).
30. K. Scrivener, R. Snellings, B. Lothenbach, **A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials**, 2018. <https://doi.org/10.1201/b19074>.
31. A. Neves Junior, **Captura de CO₂ em materiais cimentícios através de carbonatação acelerada**, Tese de Doutorado. Universidade Federal Do Rio de Janeiro. (2014).
32. S. Lu, E.N. Landis, D.T. Keane, **X-ray microtomographic studies of pore structure and permeability in Portland cement concrete**, Materials and Structures/Materiaux et Constructions. 39 (2006) 611–620. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9099-7>.
33. E. Gallucci, K. Scrivener, A. Groso, M. Stambanoni, G. Margaritondo, **3D experimental investigation of the microstructure of cement pastes using synchrotron X-ray microtomography (μCT)**, Cem Concr Res. 37 (2007) 360–368. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.10.012>.
34. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), **NBR 16697 - Cimento Portland – Requisitos**, (2018).
35. V.M. John, K.R.G. Punhagui, M.A. Cincotto, **Low Carbon Economy: Assessment of Impacts of Restrictions and Technological Perspectives - Lime Production - Final Report**, Ebc. (2014) 17.
36. J.F. Santoro, M. Kripka, **Determination of carbon dioxide emissions from the raw materials of the concrete produced in the northern region of Rio Grande do Sul**, Ambiente Construído. 16 (2016) 35–49. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212016000200078>.
37. 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>.
38. Ministério de Ciência Tecnologia e Inovação (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 16, 2021).
39. E. Rigo, E. Possan, L. Mazurana, **CO₂ capture due to carbonation of cementitious materials: general approach**, Encontro Nacional De Tecnologia Do Ambiente Construído. 17 (2018) 3564–3571. <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/1792>.
40. 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>.



41. 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**, Journal of CO₂ Utilization. 46 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2021.101461>.
42. 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>.
43. 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>.
44. 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>.
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. 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>.
47. 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>.
48. 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>