



Ministério da Educação
Universidade Federal da Integração Latino-Americana
Instituto de Tecnologia, Infraestrutura e Território
Centro Interdisciplinar de Tecnologia e Infraestrutura

AVALIAÇÃO DA CAPTURA DE CO₂ DEVIDO À CARBONATAÇÃO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO PRODUZIDAS COM RCD

ISABELA DE OLIVEIRA ANTONIO

Foz do Iguaçu, PR

Dezembro de 2018



Ministério da Educação
Universidade Federal da Integração Latino-Americana
Instituto de Tecnologia, Infraestrutura e Território
Centro Interdisciplinar de Tecnologia e Infraestrutura

AVALIAÇÃO DA CAPTURA DE CO₂ DEVIDO À CARBONATAÇÃO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO PRODUZIDAS COM RCD

ISABELA DE OLIVEIRA ANTONIO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca Examinadora do Curso de Engenharia Civil de Infraestrutura da UNILA, como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Edna Possan

Co-orientador: Prof^a. Dr^a. Katia R. Garcia Punhagui

Foz do Iguaçu, PR
Dezembro de 2018

RESUMO

A Indústria da Construção Civil (IC) é uma das maiores contribuintes para a emissão de CO₂, geração de resíduos do planeta, além de consumir elevados volumes de matéria-prima e energia elétrica, o que gera diversos impactos negativos ao meio ambiente. No entanto, a reutilização dos resíduos como agregados reciclados e a estocagem do CO₂ na matriz cimentante de concretos e argamassas podem reduzir estes problemas. Neste sentido, o presente trabalho visa avaliar a captura de CO₂ devido à carbonatação de argamassas de revestimento, produzidas com diferentes teores de resíduo de construção e demolição (RCD). Para isso, foram dosadas argamassas de revestimento, com substituição em massa de 0%, 50% e 100% do agregado natural (NA), pelo agregado miúdo reciclado de RCD. As argamassas produzidas foram submetidas a diferentes testes de desempenho, tanto no estado fresco quando no estado endurecido. O estudo do sequestro do CO₂ foi conduzido por meio da determinação da profundidade de carbonatação das argamassas em diferentes idades (28, 56, 84, 95, 167, 195, 202 dias), para três ambientes de exposição da edificação (interno em laboratório, externo protegido e externo desprotegido da chuva). Os resultados experimentais indicam que quanto maior o teor de RCD empregado na produção das argamassas maior é a captura de CO₂, sendo até 2,3 vezes maior para a argamassas com 100% de RCD e teor mínimo de clínquer. As argamassas de revestimento têm velocidade de carbonatação elevada podendo carbonatar 20 mm em menos de 200 dias, capturando durante este período até 94 kgCO₂/m³. Sendo assim, por meio da reação de química da carbonatação inerente aos produtos à base de cimento, o ambiente construído pode capturar CO₂ desde a fase de construção até o pós-demolição, contribuindo para a mitigação das emissões associadas a este gás, sendo um processo chave para edificações mais sustentáveis.

Palavras-chave: materiais cimentícios; argamassas; sequestro de CO₂; aproveitamento de resíduos;

ABSTRACT

The industry of civil construction (IC) is one of the main contributors to CO₂ emission, planetary waste generation, great volumes of raw material and electric energy consumption, creating many negative impacts to environment. Although, the reuse of waste as recycled aggregates and CO₂ stocking in the cement matrix of concretes and mortars can reduce these problems. In this way, the present work wants to assess the CO₂ capture due to carbonation of coating mortars, produced with different levels of construction and demolition waste (C&D). For this, we dosed coating mortars, with substitution in mass of 0%, 50% and 100% of natural aggregate (NA), by thin recycled aggregate of C&D. The mortars produced were put through to different tests of performance, in fresh state and in hardened state. The study of CO₂ sequestration was conducted by means of determination of carbonation depth of the mortars in different ages (28, 56, 84, 96, 167, 195, 202 days), for three environments of building exposition (internal into the laboratory, external protected and external unprotected from rains). The experimental results indicate that the bigger the level of C&D used in the production of mortar higher is the CO₂ capture, being 2,3 times bigger to mortars with 100% of C&D and minimum level of clinker. The coating mortar has high carbonating velocity being able to carbonate 20 mm in less than 200 days, capturing, during this period, as much as 94kgCO₂/m³. Therefore, by means of inherent chemical reaction of carbonation on cement basis, the built environment can capture CO₂ since the beginning of construction until post-demolition stage, contributing to mitigation of emissions associated to this gas, being the key process to more sustainable edifications.

Key word: cement materials; mortar, CO₂ sequestration; waste use.

Sumário

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	1
2. OBJETIVOS	4
2.1 Objetivo Geral.....	4
2.2 Objetivo Específico.....	4
3. CARBONATAÇÃO E CAPTURA DE CO₂.....	5
3.1 Fatores que Influenciam a Captura de CO ₂	8
3.1.1 Condições Ambientais	8
a) Concentração Ambiental de CO ₂	8
b) Umidade Relativa do Ar.....	8
3.1.2 Ambiente de Exposição	9
3.1.3 Características do Material	9
3.1.4 Área e Proteção Superficial	10
a) Área Superficial	10
b) Proteção Superficial	11
3.2 Medição da Profundidade Carbonatada.....	11
4. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD).....	12
4.1 RCD e a Captura de CO ₂	13
4.2 Propriedade das Argamassas com RCD.....	13
4.2.1 Resistência à Compressão	13
4.2.2 Resistência à Tração na Flexão.....	14
4.2.3 Módulo de Elasticidade.....	14
5 METODOLOGIA.....	15
5.1 Projeto Experimental - Etapa (1).....	15
5.2 Caracterização dos Materiais – Etapa (2).....	16
5.2.1 Agregado Natural e Reciclado	16
5.2.2 Cal	17
5.2.3 Cimento Portland	18
5.3 Moldagem das argamassas - Etapa (3).....	20

5.4 Ensaio – Etapa (4)	21
5.4.1 Ensaio Físico	21
5.4.2 Ensaio Mecânico.....	22
5.4.3 Carbonatação.....	23
5.5 Balanço das Emissões de CO₂ – Etapa (5)	24
5.5.1 Estimativa das Emissões de CO ₂	25
5.5.2 Estimativa da Captura de CO ₂	26
6. RESULTADOS	28
6.1 Propriedades Físicas	28
6.2 Propriedades Mecânicas	30
6.3 Carbonatação	32
6.4 Balanço das Emissões	35
6.4.1 Emissões	35
6.4.2 Captura	36
7. CONCLUSÃO	40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42
APÊNDICE A	46
APÊNDICE B	47
APÊNDICE C	48

Índice de Figuras

Figura 1. Representação da frente de carbonatação em revestimentos argamassados aplicados em uma edificação.	6
Figura 2. Resumo do processo de emissão e captura de CO ₂	6
Figura 3. Influência da umidade interna do concreto na profundidade de carbonatação.....	9
Figura 4. Fluxograma das etapas do trabalho.....	15
Figura 5. Misturas de argamassas quem devem ser analisadas.....	16
Figura 6. Agregados utilizados no preparo das argamassas: a) Natural b) RCD	16
Figura 7. Curva e granulométrica da areia natural e de RCD	17
Figura 8. Configuração do ensaio de massa unitária da cal.....	18
Figura 9. Foto dos equipamentos para realização: a) BET b) Granulometria a laser	19
Figura 10. Resultado da Granulometria a laser	19
Figura 11. Detalhes da moldagem: a) Hélice para mistura b) Argamassa vedada em maturação	20
Figura 12. Corpos de Prova expostos em ambiente: a) Interno b) Externo Protegido c) Externo Desprotegido	21
Figura 13. Ensaio físicos: a) Índice de consistência b) Absorção de água	22
Figura 14. Ensaio mecânicos: a) Resistência à tração na flexão b) Resistência à compressão..	22
Figura 15. Etapas execução alvenaria: a) Assentamento b) Chapisco c) Aplicação da argamassa d) Sarrafeamento e) Desempeno	23
Figura 16. Etapas para execução do arrancamento: a) Corte b) Colagem das pastilhas	23
Figura 17. Procedimento utilizado para fraturar o CP a) medição da fatia b) corte com serra c) quebra na morsa com auxílio da chave de fenda/Philips.	24
Figura 18. Determinação da profundidade de carbonatação das argamassas	24
Figura 19. Relação água cimento (a/c) e índice de consistência das argamassas por porcentagem de substituição	28
Figura 20. Absorção de água por capilaridade em função do tempo	29
Figura 21. Resistência à compressão e à tração na flexão ao longo do tempo	30
Figura 22. Resistência à compressão (fc) e à tração na flexão (ft) em função da porcentagem de substituição	31
Figura 23. Módulo de elasticidade das argamassas	31
Figura 24. Profundidade de carbonatação ao longo do tempo	33
Figura 25. Profundidade de carbonatação nos ambientes de exposição	34
Figura 26. Estimativa das Emissões por m ³	35
Figura 27. Relação entre 1 m ³ de argamassa e sua área aplicável considerando espessura média de 20 mm	36

Figura 28. Captura de CO ₂ aos 195 dias para as diferentes misturas	37
Figura 29. Captura máxima para as argamassas com e sem cal para a porcentagem mínima, máxima e média de clínquer.	38
Figura 30. Potencial de absorção com relação ao CO ₂ emitido no processo de produção das argamassas	38
Figura 31. Valores para a absorção de água por capilaridade em g/cm ³	46

Índice de Tabelas

Tabela 1. Captura de CO ₂ devido à carbonatação de concreto e revestimentos argamassados em diferentes investigações	7
Tabela 2. Classificação dos RCD de acordo com a Resolução nº 307/02 e nº 401/2011	12
Tabela 3 Composição média do RCD no Brasil	12
Tabela 4. Características dos agregados	17
Tabela 5. Resultados das análises de FRX agregado reciclado	17
Tabela 6. Caracterização da cal hidratada	18
Tabela 7. Resultados das análises de FRX para a cal	18
Tabela 8. Caracterização do cimento	19
Tabela 9. Resultados das análises de FRX para o cimento	20
Tabela 10. Traço das argamassas para 1m ³	20
Tabela 11. Normas para a realização dos ensaios físicos, mecânicos e de carbonatação...21	
Tabela 12. Emissões do clínquer (descarbonatação e energia térmica), da energia elétrica e produção do cimento	26
Tabela 13. Resultados de absorção de água por capilaridade das argamassas.....29	
Tabela 14. Resultado de resistência ao arrancamento e tipo de ruptura	32
Tabela 15. Emissão do clínquer e do cimento	35
Tabela 16. Valores para resistência a compressão e tração na flexão, em MPa.....47	
Tabela 17. Valores para Módulo de elasticidade.....47	
Tabela 18. Profundidade de carbonatação ao longo do tempo, em mm.....48	
Tabela 19. Emissão para as argamassas com base na porcentagem de.....48	
Tabela 20. Captura de CO ₂ para as argamassas à base de cimento (traço A), em kgCO ₂ /m ³ ...48	
Tabela 21. Captura de CO ₂ para as argamassas mistas de cal (traço B), em kgCO ₂ /m ³49	
Tabela 22. Potencial de absorção com relação ao CO ₂ emitido no processo de produção das argamassas à base de cimento (traço A).....49	
Tabela 23. Potencial de absorção com relação ao CO ₂ emitido no processo de produção das argamassas mistas de cal (traço B).....50	

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

O aumento da concentração de dióxido de carbono (CO₂) na atmosférica nos últimos anos é um fato preocupante do ponto de vista ambiental, uma vez que ele é um dos principais gases do efeito estufa (HUIJGEN e COMANS, 2003; SIPILÄ, TEIR e ZEVENHOVEN, 2008). A indústria da construção civil (IC) é um dos contribuintes para a emissão deste gás, visto que a principal matéria-prima deste setor é o cimento, cuja produção é responsável por 5 a 7 % das emissões globais de CO₂ (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

No Brasil, a porcentagem de emissões de dióxido de carbono no setor cimenteiro é menor que 2 %, segundo informações da 3ª edição das Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa divulgado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações – MCTIC (BRASIL, 2016a). Isto ocorre devido à modernidade e à eficiência do parque industrial, bem como as alterações no processo produtivo brasileiro (CNI, 2012). Dentre as alterações citadas pelo CNI, (2012) estão a reutilização dos gases quentes para pré-aquecimento da matéria-prima e a substituição do processo produtivo de cimento de via úmida por via seca, reduzindo o consumo energético e, conseqüentemente, a emissão de CO₂. Além disso, os cimentos brasileiros podem conter até 70% de adições, o que reduz o teor de clínquer contido no cimento, e conseqüentemente as emissões associadas à sua produção.

Apesar da queda na produção do setor cimenteiro no Brasil, o país manteve-se entre os 10 maiores produtores de cimento ocupando a 8ª colocação no ano de 2016 com a fabricação de aproximadamente 57,4 milhões de toneladas (SINIC, 2017; USGS, 2017). Deste total cerca de 55% é destinado para a produção de argamassas (JOHN, PUNHAGUI e CINCOTTO, 2014), que juntamente com o concreto compõem as principais matérias-primas para obras de infraestrutura e edificações.

Como as argamassas são produzidas pela mistura de cimento, agregado miúdo, água e em alguns casos cal, aditivos e adições, ela também é responsável por parte das emissões de CO₂ da indústria da construção civil. De acordo com Fukui *et al.*, (2013), a quantidade de CO₂ liberada para a fabricação da argamassa é diretamente proporcional à porcentagem de cimento de sua composição.

Recentemente, tendo em vista os problemas ambientais associados às emissões de CO₂, várias formas de captura e estocagem deste vêm sendo estudadas, especialmente os métodos físicos como armazenamento em formações geológicas, oceanos e fundo de mares; e métodos químicos como a carbonatação (HUIJGEN e COMANS, 2003). Esta

última, ocorre pela reação entre o CO₂ da atmosfera e o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) existente nas matrizes cimentantes à presença de água (POOLE e SIMS, 2016), em um processo reverso ao da produção do cimento, capturando o CO₂ da atmosfera.

A maioria dos trabalhos publicados sobre captura de CO₂ utiliza o concreto como material de estudo (PADE e GUIMARAES, 2007; YANG, SEO e TAE, 2014; LAGERBLAD, 2005), uma vez que este fenômeno está associado à corrosão das armaduras. Contudo, nos últimos anos o estudo da carbonatação em argamassas começou a ser desenvolvido em razão das questões ambientais, avaliando especialmente a potencialidade da captura de CO₂ devido a sua carbonatação ao longo do tempo.

A captura de CO₂ em matrizes cimentícias, ocorre ao longo de todo o ciclo de vida (PADE e GUIMARAES, 2007) e varia conforme a relação entre “superfície exposta a ação do CO₂”/“volume de material empregado na produção do elemento” (ANDRADE e SANJUÁN, 2018). No caso das argamassas de revestimento não protegidas na superfície, 97,9% das emissões geradas para sua produção podem ser absorvidas ao longo de sua vida útil¹ e o restante, 2,1%, no período pós-demolição (XI *et al.*, 2016). Isto ocorre, pois, as argamassas são utilizadas para revestimento de paredes, muros, fachadas, entre outros, no qual apresentam elevadas áreas de exposição e são aplicadas em finas camadas, propiciando as condições ideais para a captura de CO₂ em curtos períodos de tempo².

Analogamente, o concreto utilizado para a execução de pavimentos, blocos intertravados e meio fios também apresenta grandes áreas superficiais e pequenas espessuras o que favorece a captura de CO₂. Ou seja, grande parte dos materiais de construção à base de cimento atualmente podem absorver CO₂ durante sua fase de vida útil, contribuindo para a mitigação das emissões associadas à sua produção.

Além das emissões advindas do processo de produção, os materiais da IC contribuem com outras degradações ambientais como a extração de matéria-prima e a produção de elevados volumes de resíduos. Segundo dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE no ano de 2016 cerca de 38,5% do total de resíduos gerados advém da indústria da construção civil (ABRELPE, 2016).

¹ Os autores consideram que o tempo de vida útil varia de 35 e 70 anos dependendo de cada país.

² Os resultados experimentais deste estudo mostraram que em menos 200 dias, uma argamassa de revestimento com 20 mm de espessura pode ser totalmente carbonatada, atingindo o potencial máximo de captura de CO₂.

Para mitigar este problema têm-se estudado a potencialidade de reutilizar os materiais de construção e demolição (RCD) para a produção de agregados. Desta maneira, os concretos e argamassas produzidos com agregado de RCD contribuem para redução do impacto causado pela IC, uma vez que capturam o CO₂ da atmosfera e reaproveitam os resíduos que seriam depositados em aterros. Segundo pesquisas realizadas por Thomas *et al.*, (2014) quanto maior a porcentagem de substituição de agregado natural por RCD, maior a relação a/c e mais elevada a porosidade, conseqüentemente, maior a quantidade de CO₂ absorvido.

Neste contexto, o presente trabalho busca estimar a quantidade de gás carbônico que pode ser capturado devido à carbonatação de argamassas de revestimento produzidas, em parte ou em sua totalidade, com agregado reciclado de RCD.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

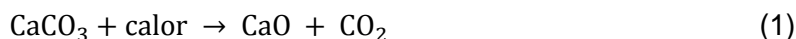
Avaliar a captura de CO₂ devido à carbonatação de argamassas de revestimento produzidas com resíduo de construção e demolição (RCD) com e sem cal, em substituição a areia natural.

2.2 Objetivo Específico

- a) Avaliar a influência da adição de cal na captura de CO₂ devido à carbonatação de argamassas de revestimento;
- b) Estimar o potencial de captura, devido à carbonatação das argamassas, com relação ao CO₂ emitido no processo de produção.
- c) Analisar a influência do ambiente de exposição na captura de CO₂ devido à carbonatação das argamassas de revestimento;
- d) Analisar a influência de diferentes porcentagens de agregado reciclado nas propriedades mecânicas e na captura de CO₂ devido à carbonatação das argamassas de revestimento;

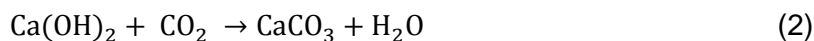
3. CARBONATAÇÃO E CAPTURA DE CO₂

O cimento é composto principalmente de clínquer, matéria-prima obtida a partir da descarbonatação do calcário (CaCO₃), o qual quando calcinado produz óxido de cálcio (CaO), gerando como subproduto o dióxido de carbono (CO₂), conforme indicado na eq. 1 abaixo (BRASIL, 2015; FURCAS, *et al.*, 2014):



Durante o processo de fabricação do cimento, 90% das emissões de dióxido de carbono ocorrem na produção do clínquer, devido à descarbonatação da matéria-prima e queima de combustível fóssil para aquecimento do forno. O restante advém do transporte dos materiais e pelas emissões associadas à utilização da energia elétrica na indústria (BRASIL, 2015).

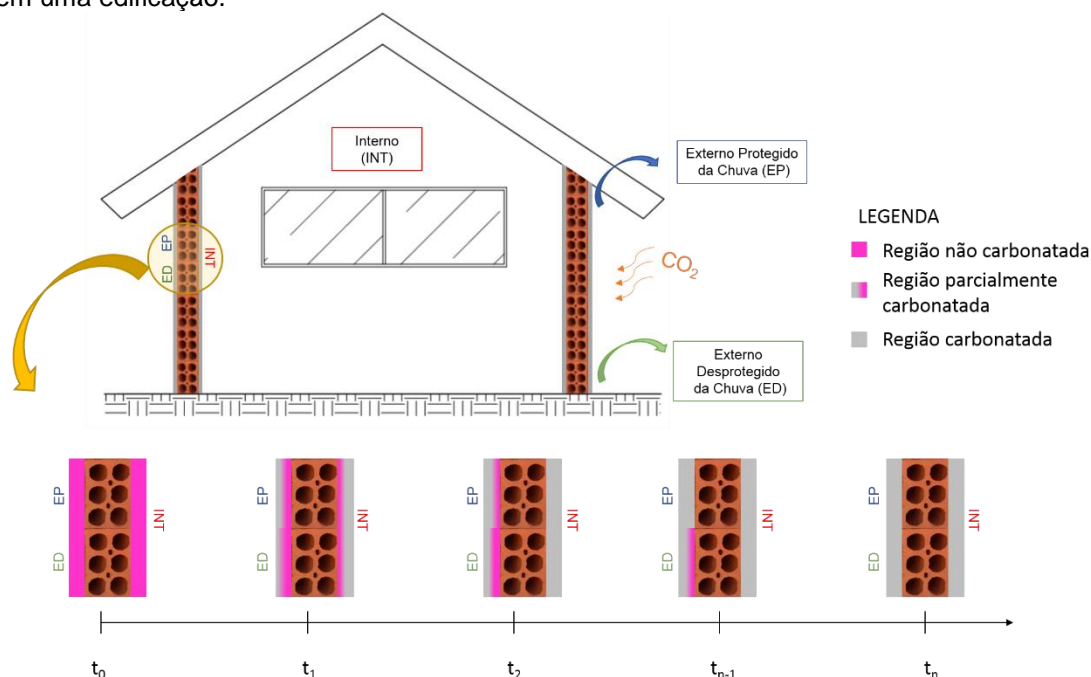
No entanto, atualmente tem se discorrido sobre a potencialidade dos concretos e argamassas capturar CO₂ pelo processo denominado de carbonatação (PADE; GUIMARAES, 2007; XI *et al.*, 2016). Este processo é um fenômeno físico-químico que ocorre entre o CO₂ presente na atmosfera e o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) presente na matriz cimentante resultando em carbonato de cálcio (CaCO₃) e água (H₂O), conforme reação da eq.2 (CHUN, NAIK e KRAUS, 2007).



O CO₂ da atmosfera ingressa pela superfície exposta e avança progressivamente para o interior da estrutura, difundindo-se por meio dos poros. Também consome o hidróxido de cálcio e outros produtos de hidratação, o que reduz o pH do concreto e despassa o aço imerso, deixando a armadura vulnerável à corrosão (PAULETTI, 2009), o que não é desejável em estruturas armadas

Porém, em estruturas não armadas como artefatos de concreto e revestimentos argamassados, não há vergalhões para serem corroídos, sendo a carbonatação um efeito desejável, já que, segundo Van Gerven *et al.* (2007), reduz a porosidade do material e aprisiona o CO₂ através da reação química acima, em um processo reverso ao da fabricação do cimento (LAGERBLAD, 2005, PADE E GUIMARÃES, 2007; XI *et al.* 2018). Atuando, assim, como uma medida compensatória das emissões de materiais cimentícios durante o ciclo de vida das construções revestidas com argamassas, conforme representação esquemática da Figura 1.

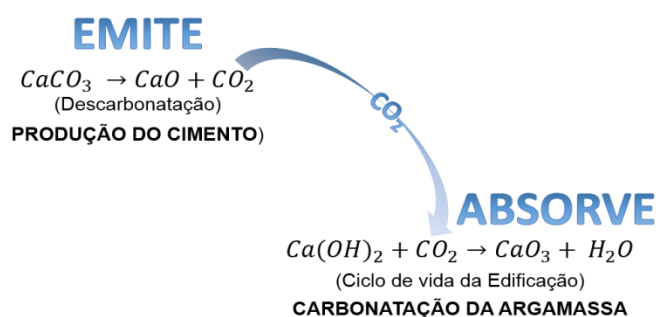
Figura 1. Representação da frente de carbonatação em revestimentos argamassados aplicados em uma edificação.



Fonte: Próprio autor.

O sequestro de CO₂ devido à carbonatação de materiais à base de cimento pode ser resumido conforme o esquema da Figura 2. Contudo, observa-se na literatura (Tabela 1) que não há um consenso quanto a esta potencialidade.

Figura 2. Resumo do processo de emissão e captura de CO₂



Fonte: Próprio autor.

Nota-se na tabela 1 que os estudos sobre captura de CO₂ devido à carbonatação são majoritariamente voltados ao concreto. Tal fato pode estar associado à influência da carbonatação no processo de corrosão de armaduras. No entanto, como as argamassas de revestimento não apresentam questões de durabilidade, nos últimos cinco anos têm se estudado a sua potencialidade de captura para a mitigação de questões ambientais. Com isso, os estudos publicados sobre carbonatação e captura de CO₂ em argamassas ainda são escassos.

Tabela 1. Captura de CO₂ devido à carbonatação de concreto e revestimentos argamassados em diferentes investigações

Local	Referência	Material	Cenário (tipo, características da estrutura, tempo, etc.)	CO ₂ Absorvido ³	
				Vida útil	Demolição
Noruega	Jacobsen, Jahren (2002)	Concreto	Idade da estrutura de 20 anos	11%	-
Países Nórdicos	Lagerblad (2005)	Concreto	Estrutura em ambiente externo (vida útil de 50 anos)	47 kg.CaO	-
Países Nórdicos	Pommer, Pade (2006)	Concreto	Captura de dióxido de carbono ao longo do ciclo de vida de 100 anos	1,761 Kg (70 anos)	14,2 Kg (30 anos)
				0,882 Kg (50 anos)	1,48 Kg (50anos)
Mundial	Pade (2007)	Concreto	Estruturas com vida útil de 100 anos	33-57%	-
Dinamarca	Pade, Guimarães (2007)	Concreto	70 anos de vida útil + 30 após a demolição	24%	57%
Suécia	Nilsson (2011)	Concreto	Ambientes internos sem pintura (vida útil de 100 anos)	6,1 kgCO ₂ /m ²	-
Suécia	Nilsson (2011)	Concreto	Ambientes externos desprotegido da chuva (vida útil de 100 anos)	0,5 kgCO ₂ /m ²	-
Brasil	Possan et al (2013)	Concreto	Hidrelétrica de Itaipu (idade da estrutura de 34 anos)	13384 kg	-
Brasil	Damin (2013)	RCD	-	-	1 kg.CO ₂ /t.RCD
Brasil	Felix, Possan (2014)	Concreto	Ambientes externos protegidos da chuva (70 anos de vida útil + 30 após a demolição)	5 % do volume de concreto gerado na produção	33 % do volume de concreto gerado na produção
Coréia do Sul	Yang, Seo, Tae (2014)	Concreto	Carbonatação ao longo do ciclo de vida das estruturas de um prédio (40 VU + 60 PD)	36441-69589 kgCO ₂	65708-144676 kgCO ₂
Itália	Furcas et al (2014)	Argamassa de cimento	Carbonatação acelerada ao longo de 28 dias	0,0264 kgCO ₂ /kg	-
		Argamassa de cal		0,0161 kgCO ₂ /kg	-
Brasil	Possan, Felix, Thomaz (2017)	Concreto	Captura de CO ₂ ao longo do ciclo de vida (100 anos)	35,38-93,62%	
Mundial	Xi et al (2016)	Materiais cimentícios	Carbonatação ao longo do ciclo de vida	97,9% para argamassas	2,1% para argamassas
Brasil	Andrade et al (2018)	Argamassa de cimento	Ambientes interno e externo protegido e desprotegido da chuva. Captura considerando carbonatação total (BRE EM 15804)	0,17 kg.CO ₂ / m ²	-
		Argamassa com RCD		0,25 kg.CO ₂ / m ² (100% de RCD)	-
ESPANHA	Andrade, Sanjuán (2018)	Concreto e Pasta de cimento	Ambientes interno e externo protegido e desprotegido da chuva	Absorve de 10,8 a 11,2% do CO ₂ emitido na calcinação	
Brasil	John, Punhagui, Quattrone (2018)- não publicado	Argamassa	Estimativa da captura de CO ₂ devido a carbonatação de 2014 a 2050 pelas argamassas produzidas desde o ano de 1950	220MtCO ₂ ou 12,6% do total de CO ₂ emitido pela fabricação do cimento	

Fonte: Adaptado de Possan; Felix; Thomaz, (2017).

³ Como os autores empregaram diferentes metodologias para estimar o CO₂ absorvido, as variáveis utilizadas eram distintas. Alguns autores apresentam o balanço das emissões (CO₂ emitido - CO₂ Capturado) outros apenas o CO₂ capturado. Desta maneira não foi possível padronizar a unidade de medida na elaboração da tabela.

3.1 Fatores que Influenciam a Captura de CO₂

Os principais fatores que influenciam a velocidade de propagação da frente de carbonatação variam de acordo com as condições ambientais (concentração de CO₂, temperatura e umidade relativa do ar); o ambiente de exposição (interno, externo protegido e externo desprotegido da chuva); e as características do material (tipo de cimento, presença ou não de cal, cura e adições). Estes fatores serão abordados a seguir.

3.1.1 Condições Ambientais

a) Concentração Ambiental de CO₂

A captura do CO₂ da atmosfera para a matriz cimentante ocorre mesmo em ambientes cuja concentração deste gás é pequena e aumentam conforme a concentração se eleva. Segundo a literatura a concentração do CO₂ em ambientes naturais, isto é, na atmosfera, varia de 0,03% a 1% (NEVILLE, 2016; PAULETTI, POSSAN e DAL MOLIN, 2007).

Devido à necessidade de reduzir o tempo de duração de ensaios, muitas vezes se opta por ensaios acelerados, os quais adotam uma concentração de CO₂ superior à encontrada em ambientes naturais (PESSÔA, 2002). No entanto, deve-se ter cuidado com os altos teores de CO₂, uma vez que podem distorcer os fenômenos envolvidos (NEVILLE, 2016). Para estudos em argamassas de revestimento, destaca-se que o processo natural de carbonatação é bastante rápido, sendo que em menos de 100 dias já se têm resultados expressivos do ingresso do CO₂ para o interior da matriz cimentícia, sendo dispensável o ensaio acelerado (ver discussão na seção 6.3).

b) Umidade Relativa do Ar

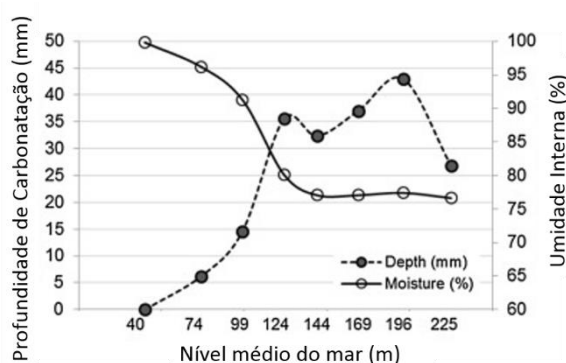
A umidade relativa do ar é um dos fatores que mais influencia na velocidade de carbonatação, e conseqüentemente na captura de dióxido de carbono, uma vez que a penetração do CO₂ depende do teor de umidade nos poros do material Possan; et al (2017). Quando os poros estão saturados a carbonatação praticamente para, visto que a difusão do CO₂ na água é cerca de 10⁴ vezes menor que no ar (KULAKOWSKI, 2002). Por outro lado, quando os poros estão totalmente secos não há dissolução do Ca(OH)₂ e do CO₂ e portanto não há reação de carbonatação (KALIYAVARADHAN e LING, 2017; KULAKOWSKI, 2002).

Porém, quando os poros estão parcialmente saturados, ou seja, a umidade relativa está entre 50% e 70% a carbonatação ocorre mais rapidamente (POOLE e SIMS, 2016), uma vez que, a difusão do CO₂ é facilitada e a presença da água garante as condições

necessárias para a ocorrência da reação de carbonatação com os compostos do cimento hidratado (POSSAN, et al (2017)).

Na Figura 3 pode ser observado a relação entre a umidade interna e a profundidade de carbonatação de pontos junto à sessão transversal da barragem de Itaipu apresentado no trabalho de Possan; et al (2017). Nela se observa que quanto maior a umidade interna do concreto da estrutura menor a profundidade de carbonatação, sendo o mínimo e máximo obtido para as umidades de 100% e 75%, respectivamente, o que corrobora com o discutido anteriormente.

Figura 3. Influência da umidade interna do concreto na profundidade de carbonatação



Fonte: adaptado de Possan *et al.*, 2017.

3.1.2 Ambiente de Exposição

Ortolan, Schiavon e Andrade, (2015) verificaram que argamassas armazenadas em ambiente interno (laboratório) carbonataram mais do que as expostas em ambiente externo, uma vez que ambientes fechados e com circulações de pessoas apresentam taxas elevadas de CO₂ dissolvido no ar. Os autores destacam também a importância da umidade interna do material neste processo, a qual se mantém constante, facilitando o ingresso de CO₂. Dentre os ambientes externos, o protegido da chuva apresenta maior profundidade de carbonatação e conseqüentemente maior potencial de captura de CO₂, visto que não há a saturação dos poros permitindo a difusão do gás com maior facilidade. Por outro lado, em ambientes externos sujeitos a intempéries, os avanços na profundidade de carbonatação são pequenos após dias chuvosos, uma vez que os poros ficam saturados dificultando/impedindo a difusão do CO₂ (ORTOLAN; SCHIAVON; ANDRADE, 2018).

3.1.3 Características do Material

As características dos materiais à base de cimento, especialmente, tempo de cura, presença de adições ou tipo de cimento e porosidade afetam a velocidade de carbonatação

(PAULETTI, 2004), e conseqüentemente a captura de CO₂. No caso das argamassas, a presença ou não da cal na mistura também influencia na profundidade de carbonatação.

De acordo com Furcas et al., (2014) argamassas a base de cimento apresentam maior captura de CO₂ do que a base de cal, uma vez que sua porosidade é maior. No entanto, com a elaboração do presente estudo têm-se indícios que a redução na profundidade de carbonatação nas argamassas não sejam influenciados apenas pela sua menor porosidade, como indicado por Furcas et al., (2014), mas também pela sua composição química.

Estudos mostram que o dióxido de carbono também reage com o hidróxido de magnésio (Mg(OH)₂) presente na cal (COSTA e PACHECO, 2017), desta maneira para que o CO₂ avance para o interior das argamassas é necessário que esse reaja com dois compostos (Ca(OH)₂ e Mg(OH)₂), retardando assim o seu avanço (ver item 6.3). Desta maneira, a quantidade de CO₂ aprisionada no interior das argamassas a base de cal, pode ser maior do que nas argamassas à base de cimento para uma mesma profundidade de carbonatação.

Em geral, quanto menor a porosidade do material cimentício, mais difícil é o ingresso de CO₂ para seu interior. Estudos realizados tanto em concreto como em argamassas produzidos com agregados reciclados demonstram que o aumento da porcentagem de substituição do RCD eleva a porosidade e o coeficiente de carbonatação.

Com relação às adições e tempo de cura, Sanjuán *et al.*, (2018) analisaram a influência da porcentagem de escória de alto forno (0, 14,4%, 28,1% e 62,2%) e o tempo de cura (0, 1, 3, 7, 14 e 28 dias) na profundidade de carbonatação de argamassas para cimentos europeus. Segundo os autores quanto menor o tempo de cura e maior a porcentagem de escória adicionada maior a profundidade de carbonatação. Isto ocorre, pois, durante o processo de cura do cimento a escória de alto forno reage com o hidróxido de cálcio, em vez de produzi-lo (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Assim, quando o CO₂ ingressa na estrutura sua velocidade de propagação é maior, no entanto a captura de CO₂ é reduzida devido à quantidade de hidróxido de cálcio disponível para a reação química ser menor.

3.1.4 Área e Proteção Superficial

a) Área Superficial

A área superficial exposta a ação do dióxido de carbono influencia na captura de CO₂, visto que o ingresso desse gás na estrutura ocorre da superfície para seu interior. Segundo estudos de Possan et al (2017) quanto maior a área superficial exposta ao CO₂, sem proteção (pintura) e menor a espessura do elemento, maior a potencialidade de captura durante a VU. Neste sentido

Andrade e Sanujuan (2018) destacam a importância de indicar nos estudos de captura a relação entre área superficial /volume de concreto do elemento (m²/m³).

b) Proteção Superficial

A velocidade de carbonatação varia de acordo com a difusibilidade do CO₂ através da superfície, desta maneira a aplicação de tinta ou papel de parede implica na redução da profundidade de carbonatação (LAGERBLAD, 2005).

Em seu estudo Lo et al., (2016) avaliaram a resistência à carbonatação de concretos revestidos com dois tipos de tintas, sendo as de emulsão para ambientes internos e as sintéticas para ambiente externo. Os resultados obtidos pelo autor mostram que as tintas utilizadas em ambientes externos apresentam maior resistência à carbonatação do que as de ambiente internos e que a redução da profundidade foi de 46-57% para ambiente interno e de 60-63% ambiente externo.

3.2 Medição da Profundidade Carbonatada

A profundidade de carbonatação pode ser determinada por diversos métodos, dentre eles pode-se citar a petrografia, a diferença de massa, a difração de raio-X, a análise térmica diferencial, a termogravimetria, a determinação de pH por meio de titulação, a espectrofotometria no infravermelho e indicadores químicos de pH. Apesar da grande variedade de métodos o mais utilizado é o último, devido à sua facilidade de manuseio e baixo custo (PAULETTI, 2004), sendo este o procedimento indicado pela RILEM (1998).

O indicador químico mais difundido é a fenolftaleína, o qual apresenta faixa de viragem de pH entre 8,3 a 10,0. Ou seja, pH superior a esta faixa representam a região não carbonatada e possui uma coloração vermelho carmim, enquanto que a região carbonatada permanece sem alteração de cor (NEVES, 2005). Após a aplicação deste indicador químico a medição da profundidade de carbonatação pode ser conduzida por meio de leituras com paquímetro e/ou análise de imagem (KULAKOWSKI, 2002).

4. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

Os resíduos de construção e demolição (RCD) podem ser definidos como todo e qualquer resíduo da construção civil, seja ele de novas construções, ou de reparos, reformas e demolições. Segundo a Resolução nº 307/02 do CONAMA fazem parte do RCD tijolos, blocos cerâmicos, concretos, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras, argamassas, gesso, telhas, vidro, plástico, fiação elétrica, entre outros, sendo estes divididos em 4 classes, conforme Tabela 2.

Tabela 2. Classificação dos RCD de acordo com a Resolução nº 307/02 e nº 401/2011

Classe	Definição
Classe A	São os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: <ul style="list-style-type: none"> – de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
	<ul style="list-style-type: none"> – de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto; – de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fio etc.) produzidas nos canteiros de obras;
Classe B	São os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: <ul style="list-style-type: none"> – plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso;
Classe C	São os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação
Classe D	São resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: <ul style="list-style-type: none"> – tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriunda de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros;
	<ul style="list-style-type: none"> – telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde

Fonte: adaptado de CONAMA, 2002.

De acordo com Zordan, (2001) os resíduos de construção e demolição sejam, talvez, o mais heterogêneo dos resíduos industriais e sua composição varia de acordo com o local de sua geração, em Araguari por exemplo a porcentagem de argamassa no RCD é de 25,5% (MARQUES, 2007) enquanto que em São Carlos é de 8% (NETO e SCHALCH, 2010). Na Tabela 3 pode ser observado a composição média (em porcentagem) do RCD em diversas cidades brasileiras.

Tabela 3 Composição média do RCD no Brasil

Classe	Componente	Brasil ¹	Araguari ²	São Carlos ³	Pelotas ⁴	Média
A	Argamassa	63,0	25,5	8,0	32,0	27,1
	Concreto	29,0	35,1	26,0		27,5
	Cerâmica	-	30,0	33,0	31,0	31,3
	Areia/Solo	-	8,5	9,0	25,0	14,1
B	Madeira	-	-	7,0	4,0	5,5
-	Orgânicos	1,0	-	-	1,0	1,0
-	Outros	7,0	0,7	17,0	7,0	7,9

Fonte: Adaptado de ¹Monteiro, (2001); ²Marques, (2007); ³Neto e Schalch, (2010); ⁴Tessaro; Sá; Scremin, (2012).

Segundo Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (ABRELPE, 2016), os resíduos da construção civil somaram mais de 45,1 milhões de toneladas no ano de 2016. Esses valores elevados associados às questões de legislação, sobretudo a Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei 12305 (BRASIL, 2010), têm impulsionado a IC a encontrar soluções para reduzir a quantidade de resíduos gerados e maneiras de reaproveitá-los.

Devido à grande variabilidade na composição do RCD, ele geralmente é separado com o intuito de torná-lo o mais homogêneo possível. Assim, o resíduo de construção e demolição pode ser dividido em resíduo cinza compostos predominantemente por concretos, agregados e argamassas; em resíduo vermelho oriundo de alvenarias, tijolos e materiais cerâmicos; e em resíduo misto, formado pela mistura dos dois anteriores (ARAÚJO, 2014).

Nos últimos anos diversos estudos vêm sendo desenvolvidos aplicando o RCD como agregados reciclados (ARs) para a fabricação de concretos e argamassas (TESSARO, SÁ e SCREMIN, 2012; ARAÚJO, 2014). No Brasil os ARs mais utilizados são obtidos a partir do resíduo cerâmico e do resíduo misto (ANDRADE *et al.*, 2018).

4.1 RCD e a Captura de CO₂

Andrade et al, (2018) avaliou a captura de CO₂ em argamassas produzidas com agregados reciclados cinza e misto e verificou que tanto a profundidade de carbonatação quanto a captura de CO₂ aumentam com o incremento do agregado de RCD. Isto ocorre, pois, o AR é rico em hidróxido de cálcio o qual reage com o CO₂ do ambiente (KALIYAVARADHAN e LING, 2017). Além disso, as argamassas produzidas com RCD tendem a apresentar maior porosidade o que facilita a difusão do CO₂ aumentando a taxa de carbonatação e conseqüentemente a captura de CO₂ (ANDRADE et al, 2018). Mazurana (2019) constatou por análise térmica que o AR de RCD entra na mistura cimentícia já carbonatado.

4.2 Propriedade das Argamassas com RCD

4.2.1 Resistência à Compressão

A resistência à compressão varia de acordo com o traço da argamassa e com as características dos materiais empregados e, portanto, diferentes resultados podem ser encontrados na literatura. Nos estudos de Araújo, (2014) foram avaliados dois traços de argamassa de revestimentos, produzidas com os agregados reciclados gerados na cidade de Natal, RN, um a base de cimento 1:8 e outro misto de cal 1:2:8. No primeiro caso, a resistência à compressão aumentou com o incremento da porcentagem de RCD variando de 1,33 a 2,64 MPa. Por outro lado, no traço misto de cal quanto maior a porcentagem de RCD

menor a resistência encontrada, variando de 1,38 a 2,13 MPa. Esta redução da resistência com o incremento do agregado reciclado também foi observada em outros trabalhos como o de Andrade et al., (2018) que avaliou o traço 1:5.

4.2.2 Resistência à Tração na Flexão

Assim como à resistência à compressão, à resistência à tração na flexão também apresentam resultados distintos na literatura. No trabalho de Araújo, (2014) o traço 1:2:8 a resistência reduziu de 0,98 MPa do referência para 0,63 MPa com 100% de substituição, no entanto para o traço à base de cimento (1:8) a resistência aumentou de 0,57 para 0,78 com o acréscimo do agregado reciclado de zero para 100%. Andrade et al., (2018) também observaram um aumento da resistência à tração na flexão com o incremento do agregado reciclado para a argamassa a base de cimento e traço 1:5.

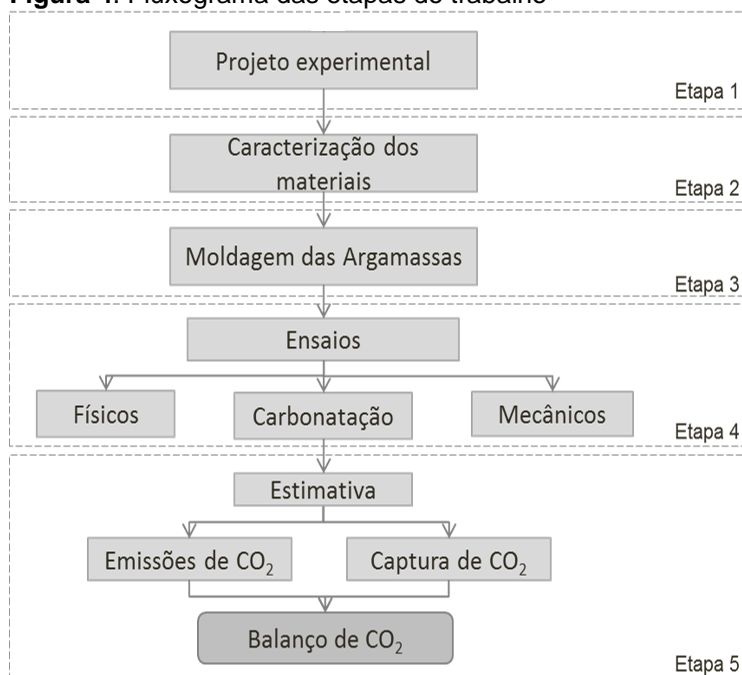
4.2.3 Módulo de Elasticidade

De acordo com a literatura há uma redução no módulo de elasticidade das argamassas produzidas com agregados de RCD. No entanto, diferentemente das resistências esta redução no módulo de elasticidade é favorável, uma vez que reduz a rigidez do material, permitindo maiores deformações e melhorando o desempenho contra a fissuração (ARAÚJO, 2014).

5. METODOLOGIA

Conforme fluxograma da Figura 4, para cumprir com os objetivos propostos, a metodologia foi dividida em cinco etapas: 1) Definição do projeto experimental; 2) Caracterização dos materiais; 3) Moldagem das argamassas e produção dos corpos de prova; 4) Realização dos ensaios físicos, mecânicos e de carbonatação; 5) Estimativa das emissões de CO₂ para a fabricação das argamassa, quantificação da captura de CO₂ ao longo do tempo e realização do balanço de CO₂ das argamassas de revestimento

Figura 4. Fluxograma das etapas do trabalho

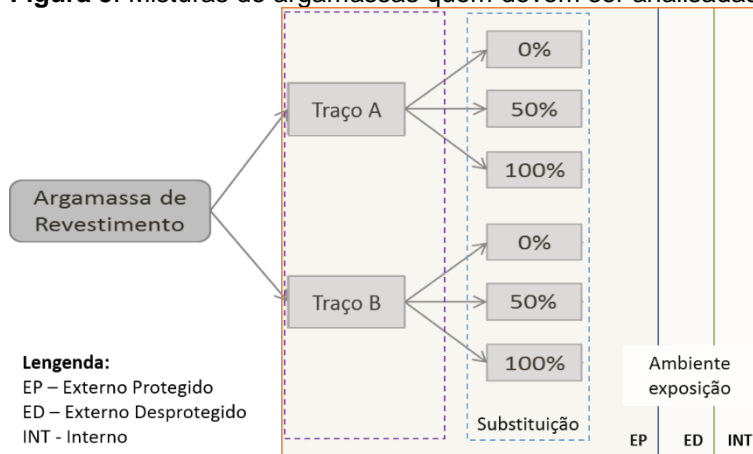


Fonte: Próprio autor.

5.1 Projeto Experimental - Etapa (1)

Neste trabalho foi estudado a captura de CO₂ devido à carbonatação em argamassas de revestimento sem proteção superficial (tintas ou revestimentos), produzidas com agregado reciclado de RCD. Foram analisados dois traços, sendo um à base de cimento (Traço A) e outro misto com cal (Traço B). A substituição do agregado natural pelo agregado de RCD foi realizado em massa, com porcentagens de 0%, 50% e 100%, para argamassas de cimento (Traço A) e mista, com cimento e cal, (Traço B), totalizando seis misturas, conforme Figura 5.

Figura 5. Misturas de argamassas quem devem ser analisadas



Fonte: Próprio autor.

Como a captura de CO₂ varia de acordo com as características do ambiente, as misturas da Figura 5 foram dispostas em três ambientes distintos, sendo eles: interno (INT), externo protegido (EP) e desprotegido da chuva (ED).

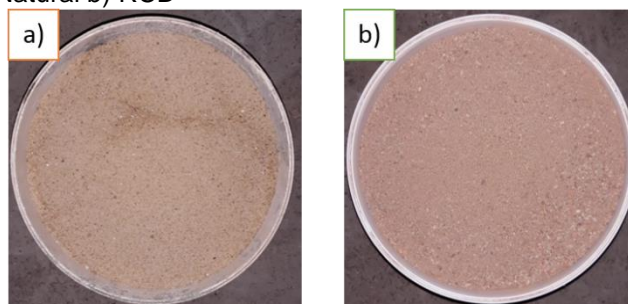
Além da captura de CO₂, também foram avaliadas as propriedades físicas e mecânicas das argamassas com e sem RCD, tais como: índice de consistência, absorção por capilaridade, resistência à compressão, à tração na flexão e ao arrancamento e módulo de elasticidade dinâmico.

5.2 Caracterização dos Materiais – Etapa (2)

5.2.1 Agregado Natural e Reciclado

Para a moldagem das argamassas foram utilizados dois agregados, o natural e o reciclado (ver Figura 6). O agregado natural, de origem quartzosa, é proveniente da jazida do Rio Paraná da cidade de Guaíra, PR. Enquanto o reciclado é proveniente da trituração dos resíduos de construção e demolição “Classe A” passante na peneira 4,8 mm, cedido pela empresa Future, Reciclagem inteligente, localizada na cidade de Cascavel, PR.

Figura 6. Agregados utilizados no preparo das argamassas:
 a) Natural b) RCD



Fonte: Próprio autor.

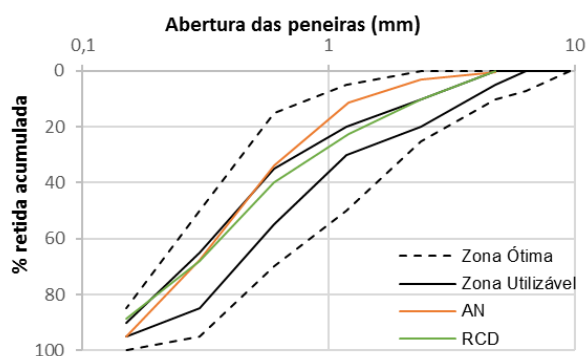
A caracterização destes agregados foi realizada mediante ensaios normalizados os quais são listados abaixo, cujos resultados são mostrados na Tabela 4 e Figura 7.

- Teor de material pulverulento, de acordo com NBR NM 46 (2003);
- Composição granulométrica, previsto na NBR NM 248 (2003);
- Massa específica do agregado miúdo, conforme NBR NM 52 (2009);
- Massa unitária do agregado miúdo, proposto na NBR NM 45 (2006).

Figura 7. Curva e granulométrica da areia natural e de RCD

Tabela 4. Características dos agregados

Característica	Natural	RCD
Teor de Material Pulverulento (%)	0,9	8,7
Dimensão máxima (mm)	2,36	4,75
Módulo de Finura (%)	2,11	2,29
Massa específica (g/cm ³)	2,70	2,43
Massa unitária (g/cm ³)	1,65	1,25



Fonte: Próprio autor.

Para o agregado reciclado de RCD, foi realizado a análise química semiquantitativa de espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), junto ao laboratório de Análise de Minerais e Rochas – LAMIR na UFPR. O equipamento utilizado foi um espectrômetro PANalytical Axios Max.

Tabela 5. Resultados das análises de FRX agregado reciclado

	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	K ₂ O	SO ₃	Na ₂ O	P ₂ O ₅	MnO	ZrO ₂	SrO	P.F
RCD	66,6	8,2	5,8	5,7	2,0	1,1	0,5	0,3	0,3	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	9,3

5.2.2 Cal

No presente trabalho foi utilizada a cal hidratada CH III disponível no mercado de Foz do Iguaçu, a qual foi submetida aos ensaios de caracterização citados abaixo:

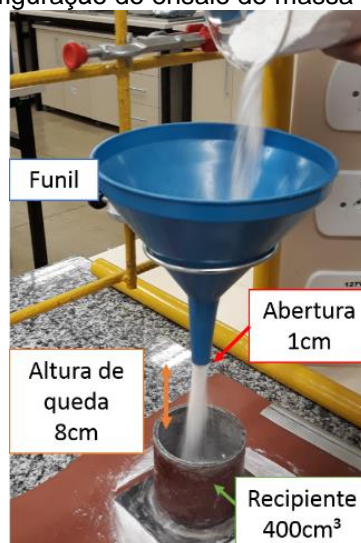
- Massa unitária;
- Massa específica;
- FRX – Espectrometria de fluorescência de Raios-X.

Como pode ser observado não há normas que regulamentem a determinação da massa específica e unitária da cal. Desta forma, a massa específica foi obtida por meio do mesmo procedimento empregado para o cimento conforme NBR 16605 (2017). Enquanto que a

massa unitária foi determinada de acordo com procedimento proposto por Mattana (2013), no qual se utiliza um funil com abertura de 1 cm e um recipiente cilíndrico de 400 cm³.

O resultado da massa unitária é obtido pela divisão entre a massa de material necessária para preencher o recipiente e o seu volume, que é conhecido. Para a realização do ensaio posiciona-se o funil de tal forma que a abertura fique a 8 cm da borda do cilindro o que garante que o material, no caso a cal, seja despejado no recipiente com uma altura e vazão de queda constantes, ver esquema na Figura 8.

Figura 8. Configuração do ensaio de massa unitária da cal



Fonte: Próprio autor.

O ensaio de FRX da cal, assim como o do RCD, foi realizado no laboratório LAMIR na UFPR com o mesmo equipamento e tipo de análise. Assim, os resultados de massa específica e unitária da cal, bem como sua composição química podem ser visualizados nas Tabela 6 e Tabela 7, respectivamente.

Tabela 6. Caracterização da cal hidratada

Cal CH III	g/cm ³
Massa Específica	2,60
Massa Unitária	0,61

Tabela 7. Resultados das análises de FRX para a cal

	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	P.F.
CH III	4,3	41,5	0,2	0,2	26,9	0,1	26,7

5.2.3 Cimento Portland

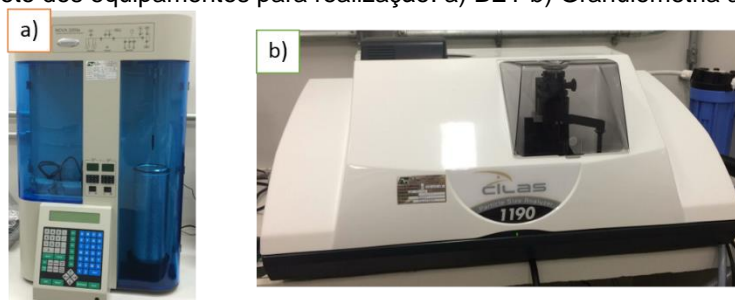
Dentre os cimentos indicados para o preparo de argamassas disponíveis no mercado de Foz do Iguaçu, PR optou-se pelo CP IV RS 32, o qual pode conter de 45% a 85% de

clínquer, de 15% a 50% de material pozolânico e 0 a 5% de material carbonático, conforme NBR 5736 (1999)⁴. Para a caracterização do cimento foram realizados os seguintes ensaios:

- Massa específica, conforme NBR 16605 (2017);
- Massa unitária;
- FRX – Espectrometria de fluorescência de Raios-X;
- Área superficial BET;
- Granulometria a laser.

O ensaio de massa unitária do cimento não é normalizado, assim utilizou-se o mesmo esquema de ensaio descrito por Mattana, (2013) para a cal. Para a determinação do FRX foi realizado ensaio conforme procedimento descrito anteriormente para o RCD. Já a determinação da área superficial BET e a granulometria a laser foram utilizados os equipamentos Quantachrome Instruments NOVA 3200e e Cilas Particle Size Analyzer 1190, respectivamente, do Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais – LADEMA da UNILA.

Figura 9. Foto dos equipamentos para realização: a) BET b) Granulometria a laser



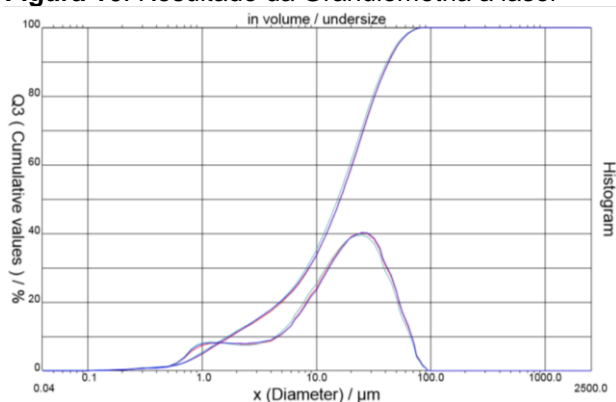
Fonte: Próprio autor.

Os resultados obtidos para a caracterização do cimento são apresentadas a seguir nas Tabela 8, Tabela 9 e Figura 10.

Tabela 8. Caracterização do cimento

CP IV RS 32	
Massa Específica (g/cm ³)	3,10
Massa Unitária (g/cm ³)	1,14
Área Superficial BET (m ² /g)	5,50

Figura 10. Resultado da Granulometria a laser



Fonte: Próprio autor.

⁴ Na presente pesquisa foram utilizados os valores limites da norma NBR 5736 (1991), tendo em vista que a pesquisa experimental iniciou em janeiro de 2018. A atual norma de cimentos NBR 16679 (2018) entrou em vigência em julho de 2018.

Tabela 9. Resultados das análises de FRX para o cimento

	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	K ₂ O	SO ₃	Na ₂ O	P ₂ O ₅	MnO	SrO	ZnO	P.F.
CP IV RS 32	25,6	50,1	7,2	4,6	2,6	0,4	0,8	1,4	0,2	0,2	0,7	0,3	<0,1	5,9

5.3 Moldagem das argamassas - Etapa (3)

O consumo de material foi estimado com base na quantidade de argamassa necessária para a realização de cada um dos ensaios citados na seção 5.1. Para a determinação da quantidade de água fixou-se o índice de consistência em 260 ± 20 mm e a partir disso calculou-se a relação água materiais secos (H). O ensaio de índice de consistência foi realizado conforme diretrizes da NBR 13276 (2016), no entanto o erro permitido foi aumentado devido a utilização do agregado reciclado que possui elevada absorção de água afetando a trabalhabilidade da mistura. Na Tabela 10 pode ser observada a quantidade de material para 1 metro cúbico de argamassa.

Tabela 10. Traço das argamassas para 1m³

Argamassa	Cimento (kg)	Cal (kg)	Areia Natural (kg)	RCD (kg)	Água (kg)	a/c ¹
A-0	302,24	0	1813,45	0,00	253,2	0,8
A-50	276,96	0	830,87	830,87	266,3	1,0
A-100	243,67	0	0,00	1462,02	310,9	1,3
B-0	218,34	218,34	1310,02	0,00	376,6	1,7
B-50	197,35	197,35	592,06	592,06	401,2	2,0
B-100	188,31	188,31	0,00	1129,84	395,1	2,1

¹ Os valores para a/c apresentados não levaram em consideração a absorção de água dos agregados reciclados, os quais foram adicionados à mistura na condição seca.

Devido ao volume de argamassa necessário para a realização de todos os ensaios, o preparo das mesmas foi realizado com uma hélice, utilizada normalmente para misturar tinta, acoplada a uma furadeira conforme mostra Figura 11a. Apesar desta adaptação seguiram-se as recomendações da NBR 7200 (1998), a qual prevê que as argamassas mistas de cal necessitam de um período de maturação, para permitir uma completa hidratação dos óxidos o que proporciona um aumento da trabalhabilidade, retenção de água e plasticidade (NIQUES, 2013). Assim, 24 h antes da moldagem misturaram-se a areia, a cal hidratada e metade da quantidade de água de amassamento e deixou-se a mistura reservada em uma vasilha vedada com lona para impedir a perda de água durante esse período, ver Figura 11b.

Figura 11. Detalhes da moldagem: a) Hélice para mistura b) Argamassa vedada em maturação

Fonte: Próprio autor.

Após a mistura, as argamassas foram moldadas em corpos de prova cilíndricos e prismáticos, como será detalhado na próxima seção, e desformadas após 24h. Os CPs utilizados para o ensaio de carbonatação foram colocados nos ambientes de exposição imediatamente após sua desforma (Figura 12), enquanto que os demais foram curados ao ar até a data de realização dos demais ensaios.

Figura 12. Corpos de Prova expostos em ambiente: a) Interno b) Externo Protegido c) Externo Desprotegido



Fonte: Próprio autor.

5.4 Ensaios – Etapa (4)

Para analisar a influência da utilização de diferentes porcentagens de agregado reciclado de RCD nas propriedades físicas e mecânicas e compará-las com as argamassas de referência foram realizados os ensaios apresentados na Tabela 11 e Figura 13a conforme as normas indicadas.

Tabela 11. Normas para a realização dos ensaios físicos, mecânicos e de carbonatação

Ensaio	Norma	Corpos de prova			Idade (dias)
		Quantidade	Total	Dimensão (cm)	
Físico	Índice de Consistência	NBR 13276 (2016)	-	-	-
	Absorção por Capilaridade	NBR 9779 (2012)	3	3	5x10 28
Mecânico	Resistência à Compressão	NBR 13279 (2005)	3 por idade	9	4x4x16 7, 28 e 63
	Resistência à Tração na Flexão				
	Módulo de Elasticidade Dinâmico	ASTM E1876-15 (2006)	3	3	4x4x16 28
	Resistência ao Arrancamento	NBR 15258 (2005)	10	10	φ 5 28
Carbonatação	Profundidade de carbonatação	RILEM (1998)	2 por ambiente	8	4x4x16 28, 56, 84/95, 167, 195/202

5.4.1 Ensaios Físicos

Para o ensaio de absorção modificou-se os tempos de leituras de 3 h, 6 h, 24 h, 48 h e 72 h da NBR 9779 (2012) para 15 min, 30 min, 45 min, 60 min, 90 min, 2 h, 3 h, 4 h e 24 h conforme recomendação de Casali, Gava e Prudêncio (2006), a fim de melhorar a confiabilidade dos resultados, uma vez que as argamassas são muito porosas sendo

necessário o aumento do número de leituras no início do ensaio. Para que o nível de água fosse mantido dentro dos limites da norma, foram utilizadas duas garrafas com pequenos furos na tampa, para gotejarem ao longo da realização do ensaio, impedindo que a água fosse totalmente evaporada e/ou absorvida (ver Figura 13b).

Figura 13. Ensaio físico: a) Índice de consistência b) Absorção de água

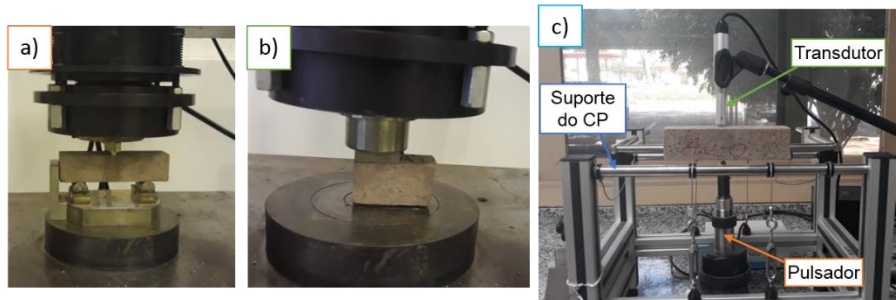


Fonte: Próprio autor.

5.4.2 Ensaio Mecânicos

Os ensaios de resistência à compressão e à tração na flexão foram realizados conforme norma correspondente. Por outro lado, o módulo de elasticidade dinâmico, foi obtido por meio da técnica de excitação por impulso, no qual um corpo de prova sofre um impacto de curta duração e começa a vibrar de acordo com suas frequências naturais de vibração. Com auxílio de um transdutor captou-se a resposta acústica e a frequência de ressonância. A partir destes dados e das características do corpo de prova utilizou-se o software Sonelastic para calcular o módulo de elasticidade dinâmico (COSSOLINO e PEREIRA, 2010).

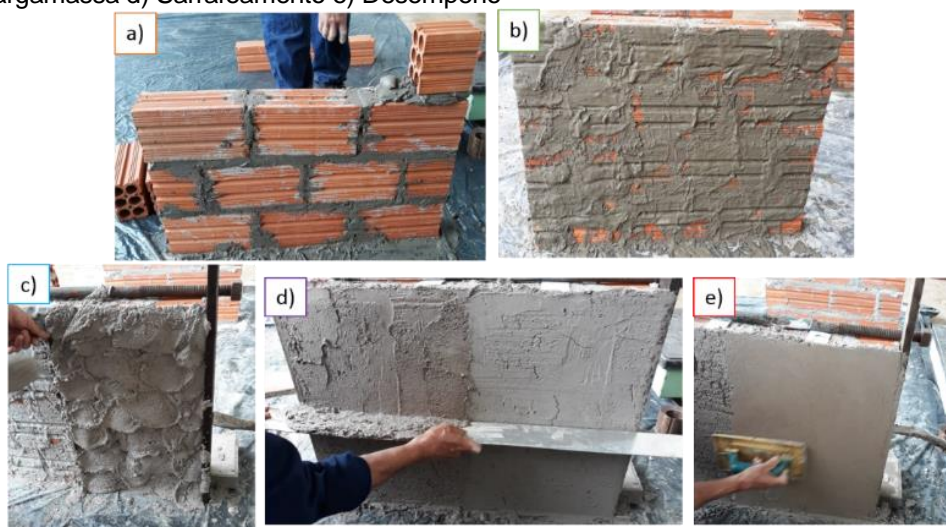
Figura 14. Ensaio mecânico: a) Resistência à tração na flexão b) Resistência à compressão c) Módulo de elasticidade dinâmico



Fonte: Próprio autor.

Para verificação da aderência dos revestimentos argamassados com a alvenaria, foi realizado o ensaio de arrancamento. Para isso, três mini paredes de 76,5 cm de largura e 60,5 cm de altura foram elevadas e chapiscadas (traço 1:3) conforme Figura 15a, b. Após uma semana a alvenaria foi revestida com os 6 traços de argamassas analisados no presente trabalho (Figura 15c), em seguida fez-se o Sarrafeamento e desempenho como mostra as Figuras 15 d, e.

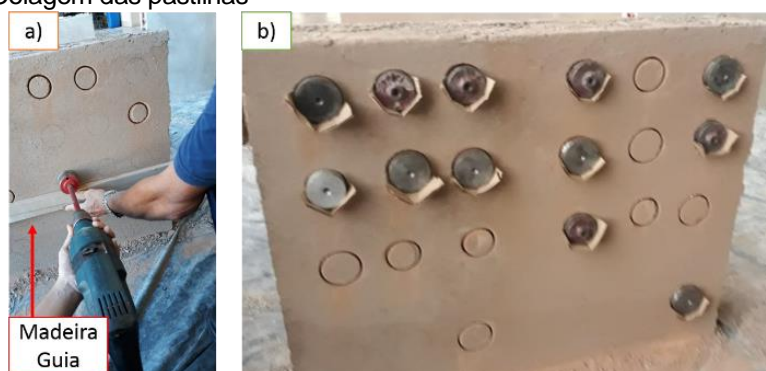
Figura 15. Etapas execução alvenaria: a) Assentamento b) Chapisco c) Aplicação da argamassa d) Sarrafeamento e) Desempeno



Fonte: Próprio autor.

A resistência de aderência à tração foi determinada conforme NBR 15258 (2005), 28 dias após a aplicação da argamassa de revestimento. Para isso um dia antes da realização do ensaio, fizeram-se as marcações dos furos evitando juntas e trincas, em seguida fizeram-se os cortes com uma serra copo acoplada a furadeira e por último colou-se as pastilhas com cola epóxi de secagem rápida de 10 minutos. Para facilitar a execução dos cortes e colagem das pastilhas utilizaram-se, respectivamente, madeiras como guias e pedaços de papelão como suporte, como pode ser visualizado na figura abaixo.

Figura 16. Etapas para execução do arrancamento: a) Corte b) Colagem das pastilhas



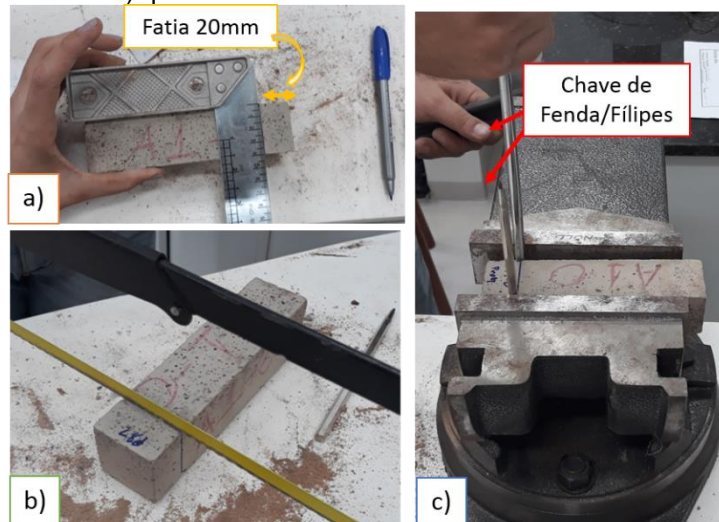
Fonte: Próprio autor.

5.4.3 Carbonatação

Para a determinação da profundidade de carbonatação das argamassas ao longo do tempo foi necessário fraturar os corpos de prova prismáticos em fatias de aproximadamente 20 mm. Com isso conseguiu-se de 7 a 8 amostras por CP, permitindo diversas leituras ao longo do tempo. Também como não se fez a proteção do topo da amostra, a espessura de 20 mm evitaria a retirada de fragmento totalmente carbonatado.

As fraturas foram realizadas em uma morsa com auxílio de duas chaves de fenda e/ou philips, posicionada uma de cada lado do CP. Para facilitar a fratura e garantir a espessura desejada, demarcou-se os 20 mm no CP e serrou-se superficialmente para a criação de uma zona de falha, como mostra a Figura 17.

Figura 17. Procedimento utilizado para fraturar o CP a) medição da fatia b) corte com serra c) quebra na morsa com auxílio da chave de fenda/Philips.



Fonte: Próprio autor.

Imediatamente após a obtenção da amostra, na superfície fraturada da mesma foi aspergido fenolftaleína a 1% dissolvido em 70% de álcool etílico e 30% de água. Após 20 min, foram realizadas quatro leituras da profundidade de carbonatação de cada fatia do corpo de prova.

Figura 18. Determinação da profundidade de carbonatação das argamassas



Fonte: Próprio autor.

5.5 Balanço das Emissões de CO₂ – Etapa (5)

O balanço de CO₂ das argamassas de revestimento é obtido pela diferença entre o total de CO₂ emitido para a sua produção das argamassas e a quantidade de CO₂ absorvida ao longo do tempo, conforme a eq. 3 (adaptado de POSSAN; FELIX; THOMAZ, 2016):

$$B_{CO_2} = E_{argm} - Cap_{CO_2} \quad (3)$$

Onde:

B_{CO_2} = balanço das emissões de CO₂, em kg;

E_{argm} = emissões do CO₂ da argamassa, em kg;

Cap_{CO_2} = captura de CO₂ ao longo do CV, em kg.

O balanço de CO₂ também pode ser expresso em porcentagem de CO₂ absorvido com relação ao emitido no processo de produção (ver eq.4). Isto é, a porcentagem de CO₂ emitido durante a sua produção que foi capturado da atmosfera pela estrutura ao longo do tempo:

$$Absor_{CO_2}(\%) = \left(\frac{Cap_{CO_2}}{E_{argm}} \right) \times 100 \quad (4)$$

5.5.1 Estimativa das Emissões de CO₂

A estimativa das emissões para a fabricação de revestimentos argamassados foram obtidos pela soma das emissões referente à produção do cimento, da cal (caso haja), do agregado natural e do agregado reciclado, multiplicadas pelo consumo de cada material como mostra eq. 5. As emissões por transporte não foram consideradas, devido à dificuldade de obtenção de dados consolidados na literatura.

$$E_{argm} = E_{cim} \times Q_{cim} + E_{areia} \times Q_{areia} + E_{RCD} \times Q_{RCD} + E_{cal} \times Q_{cal} \quad (5)$$

Q_{cim} = consumo de cimento para produzir um m³, em kg;

Q_{cal} = consumo de cal para produzir um m³, em kg;

Q_{ag} = consumo de agregado reciclado para produzir um m³, em kg;

a) Cimento

As emissões para a produção do cimento (E_{cim}) advêm do processo de produção do clínquer (descarbonatação e queima de combustível fóssil para aquecimento dos fornos) e do consumo de energia elétrica. Assim, para determinar a emissão do cimento multiplica-se a porcentagem de clínquer presente no cimento ($\%C_{cim}$) pela emissão do clínquer ($E_{clinquer}$), que considera a queima de combustível fóssil e a descarbonatação da rocha calcária e soma-se a emissão da energia elétrica ($E_{ene\ elet}$) multiplicada pelo seu fator de emissão (FE), conforme eq. 6:

$$E_{cim} = E_{clinquer} \times \%C_{cim} + E_{ene\ elet} \times FE \quad (6)$$

A emissão do clínquer e da energia elétrica foram obtidos no GNR Projetc do Brasil, enquanto que a porcentagem de clínquer no cimento é dado por norma, no caso do CP IV NBR 5736 (1991) e o fator de emissão foi disponibilizado pelo (BRASIL, 2016b), como mostra Tabela 12.

Tabela 12. Emissões do clínquer (descarbonatação e energia térmica), da energia elétrica e produção do cimento

Material	Descrição	Valor (2016)	Referência
Clínquer	Emissão descarb. + Ene.term. (kgCO ₂ /t)	866,00	(WBCDS, 2016a)
	Porcentagem no CP IV	45% a 85%	NBR 5736 (1991)
Energia Elétrica	Consumo (kWh/t)	109,00	(WBCDS, 2016b)
	Fator Emissão (kgCO ₂ /kWh)	0,08	(BRASIL, 2016b)

b) Cal

Para a estimativa das emissões advinda da produção da cal (Ecal) foi adotado a faixa de valores apresentada pela Economia de Baixo Carbono para o cenário base (business as usual) que varia de 466 a 766 kgCO₂/t independentemente do tipo de cal (JOHN, PUNHAGUI e CINCOTTO, 2015).

c) Agregado

Moraes, Punhagui, (s/d) 5 em sua pesquisa compilaram diversos trabalhos brasileiros que estimam a quantidade de CO₂ emitido para a produção de diferentes materiais de construção. Segundo as pesquisas encontradas por estes autores a emissão para a fabricação da areia natural varia de 4 a 86 kgCO₂/t e o valor adotado pelos autores foi de 15 kgCO₂/t, que corresponde a mediana.

Para o agregado reciclado não foi encontrado nenhuma estimativa de emissão na literatura, assim assumiu-se que ela se assemelha com a da produção da brita, que segundo Moraes, Punhagui, (s/d) varia de 9 a 86 kgCO₂/t. Tendo em vista a variação dos resultados neste estudo adotou-se a mediana de 9 kgCO₂/t.

5.5.2 Estimativa da Captura de CO₂

A estimativa da quantidade de CO₂ capturada pelos revestimentos argamassados nos diferentes ambientes de exposição foi calculada pela eq.7 adaptada da normativa BRE EM 15804 (2014):

$$CO_2 = e_c \times (CaO_{cim} \times Q_{cim} \times \%C_{cim} \times \%CaO_{cim} + CaO_{ag} \times Q_{ag} \times \%CaO_{ag} + CaO_{cal} \times Q_{cal} \times \%CaO_{cal}) \times A \times M \quad (7)$$

Onde:

e_c = profundidade de carbonatação, obtido a partir dos dados experimentais, em mm;

⁵ Dados compilados, não publicados até o presente momento, pelos autores no projeto de pesquisa PID1386-2018, cadastrado na PRPPG/Unila.

CaO_{cim} = quantidade de óxido de cálcio contido no cimento, determinado pela análise de FRX (ver Tabela 9);

CaO_{cal} = quantidade de óxido de cal contido na cal, obtido a partir da análise de FRX (ver Tabela 7);

CaO_{ag} = quantidade de óxido de cálcio contido no agregado reciclado, determinada com base na análise de FRX (ver Tabela 5);

$\%CaO_{cim}$ = proporção de CaO totalmente carbonatável no cimento, isto é, que se transforma em CaCO₃. De acordo com a literatura este valor vale 75% (ANDRADE *et al.*, 2018);

$\%CaO_{cal}$ = proporção de CaO totalmente carbonatável na cal, isto é, que se transforma em CaCO₃;

$\%CaO_{ag}$ = proporção de CaO totalmente carbonatável no agregado reciclado, isto é, que se transforma em CaCO₃. Segundo dados da literatura este valor equivale a 35% (YOU *et al.*, 2011)

$\%C_{cim}$ = porcentagem de clínquer contido no cimento;

A = área da seção transversal exposta ao CO₂, em m²; e

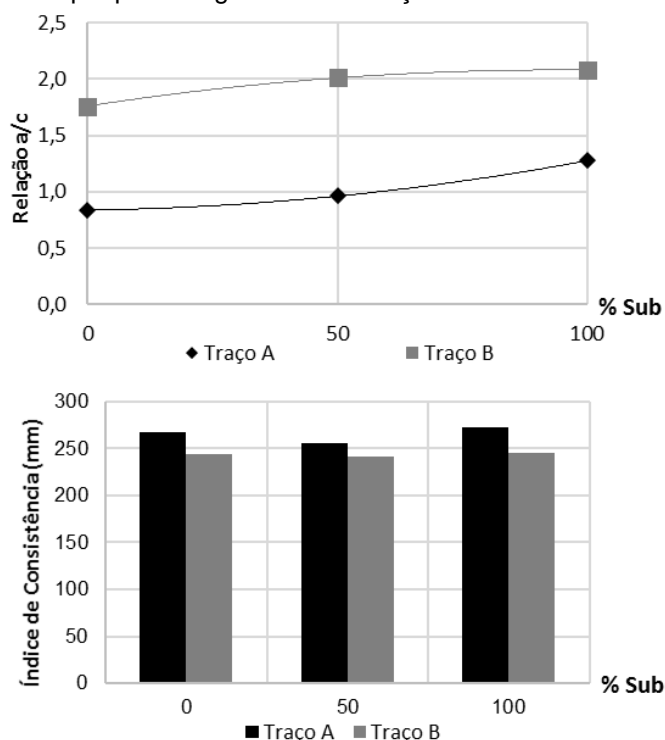
M = fração molar do CO₂/CaO (0,786), referente a estequiometria da química.

6. RESULTADOS

6.1 Propriedades Físicas

Os resultados obtidos para índice de consistência, bem como a relação água/cimento encontrada podem ser observados na Figura 19.

Figura 19. Relação água cimento (a/c) e índice de consistência das argamassas por porcentagem de substituição⁶



Fonte: Próprio autor.

Pode-se observar que para atingir a consistência desejada, as argamassas com RCD necessitaram de maior quantidade de água, o que acarreta em um incremento da relação água/cimento com a elevação da porcentagem de substituição de agregado natural por reciclado, resultado também observado por Oliveira, (2015). Isto ocorre, pois, o agregado reciclado é mais poroso e apresenta uma superfície específica maior, o qual eleva o índice de absorção do agregado e, conseqüentemente o consumo de água (ARAÚJO, 2014). Os agregados miúdos reciclados possuem absorção da ordem de 7 a 13 % (EVANGELISTA e BRITO, 2014), enquanto que o agregado miúdo natural de origem quartzosa da ordem de 2% (BARBOSA, COURA e MENDES, 2008).

Quanto à presença de cal, pode-se perceber que as argamassas mistas com este material apresentaram espalhamento inferior as de cimento, ainda que dentro do intervalo desejado, e que

⁶ Os valores da absorção de água por capilaridade ao longo do tempo estão presentes no APÊNDICE A.

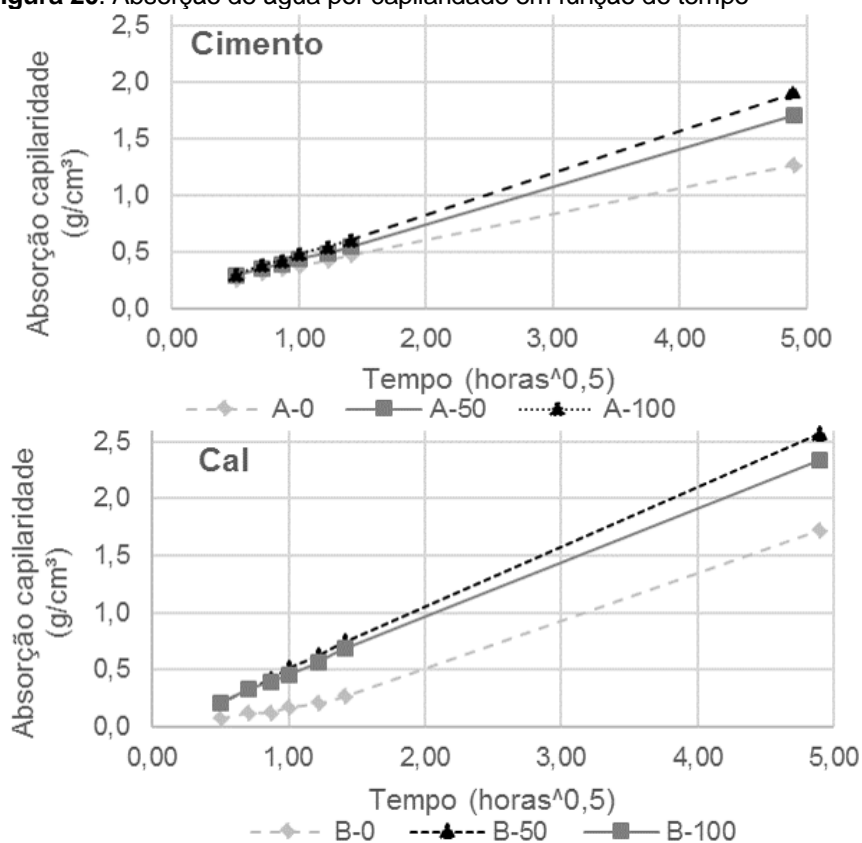
para isso necessitaram de uma maior quantidade de água e, conseqüentemente apresentam relação a/c maior, para uma mesma trabalhabilidade.

Os resultados de absorção de água por capilaridade são observados na Tabela 13 e Figura 20, sendo devido ao horário de funcionamento do laboratório utilizado na pesquisa não foi possível fazer as leituras de 180 e 360 minutos como previsto por Casali, Gava e Prudêncio (2006).

Tabela 13. Resultados de absorção de água por capilaridade das argamassas

Traço/ tempo (min)	15	30	45	60	90	120	1440	h ₂ O (mm)
A-0	0,250	0,311	0,346	0,372	0,423	0,469	1,263	75,7
A-50	0,285	0,351	0,392	0,438	0,489	0,545	1,711	72,7
A-100	0,300	0,382	0,428	0,484	0,550	0,611	1,905	59,6
B-0	0,071	0,117	0,122	0,168	0,204	0,265	1,716	71,9
B-50	0,214	0,336	0,423	0,519	0,632	0,749	2,572	89,8
B-100	0,209	0,331	0,397	0,458	0,570	0,688	2,338	74,5

Figura 20. Absorção de água por capilaridade em função do tempo



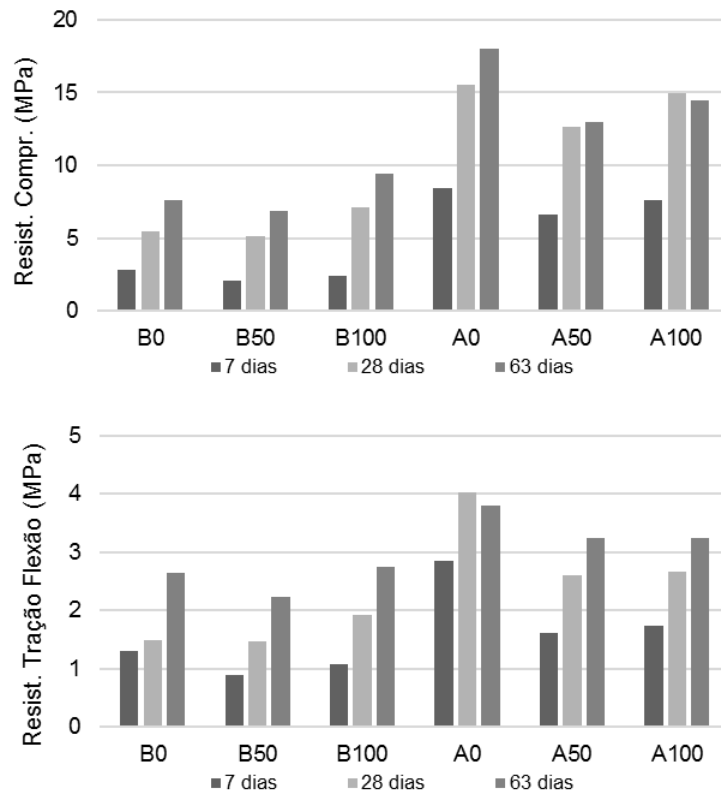
Fonte: Próprio autor.

Com base nos resultados apresentados acima, observa-se que a absorção por capilaridade aumentou linearmente ao longo do tempo para ambos os casos. Quanto ao teor de substituição, observa-se que quando este aumenta a absorção por capilaridade, também se eleva para as argamassas a base de cimento, o que está de acordo com os resultados obtidos por Andrade et al., (2018). No entanto, para as argamassas com cal, nota-se que os maiores resultados de absorção ocorreram para o traço B-50, o qual não foi possível identificar o motivo.

6.2 Propriedades Mecânicas

Na Figura 22 são apresentados os resultados de resistência à compressão e à tração na flexão ao longo do tempo para as misturas analisadas no presente trabalho.

Figura 21. Resistência à compressão e à tração na flexão ao longo do tempo⁷



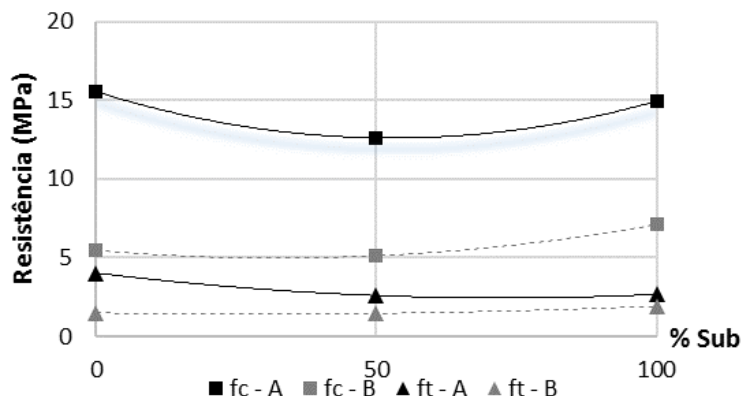
Fonte: Próprio autor.

Pode-se perceber que tanto à resistência à compressão quanto à tração na flexão na flexão aumentam ao longo do tempo, para a maior parte das misturas analisadas. Com relação à presença de cal, nota-se que as argamassas com este material apresentam resistências inferiores do que as argamassas à base de cimento. Sendo que, a maior redução foi encontrada para a mistura com 0% de RCD chegando a 65% na compressão e 63% na tração à flexão.

Com base nas resistências aos 28 dias pode-se elaborar o gráfico apresentado na Figura 22, para analisar a influência da porcentagem de substituição na resistência.

⁷ Os valores de resistência à compressão e à tração na flexão, módulo de elasticidade dinâmico podem ser observados no APÊNDICE B.

Figura 22. Resistência à compressão (fc) e à tração na flexão (ft) em função da porcentagem de substituição



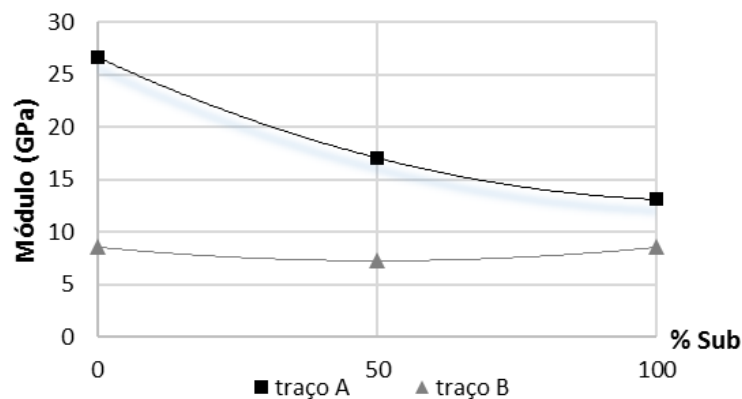
Fonte: Próprio autor.

Pode-se perceber que a resistência à compressão reduziu com a substituição de 0% para 50% do AN pelo de RCD, no entanto ao incrementar a substituição para 100% a resistência aumentou. Tais resultados diferem dos encontrados por Andrade et al., (2018), no qual verificou que quanto maior a porcentagem de substituição menor a resistência obtida. Tal fato pode estar associado à variabilidade do agregado reciclado, à variações do ensaio e a problemas de moldagem dos CPs.

Quanto à resistência à tração na flexão observou-se que ela reduziu com o aumento da porcentagem de substituição para a argamassa a base de cimento e aumento ligeiramente para a argamassa mista com cal, o que corrobora com os resultados obtidos por Araújo (2014).

Para o módulo de elasticidade, apresentado na Figura 23, nota-se que este reduz com o incremento da porcentagem de substituição. Além disso, as argamassas mistas de cal apresentam valores menores que as argamassas a base de cimento. No entanto diferentemente do que ocorrem com a resistência à compressão ou à tração na flexão a redução do módulo é favorável uma vez que diminui a rigidez do material e conseqüentemente a probabilidade de fissuração.

Figura 23. Módulo de elasticidade das argamassas



Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 14 são apresentados os valores de resistência ao arrancamento e a forma que ocorreu a ruptura do revestimento. Observa-se que a quantidade de CPs avaliados variou para cada traço, devido a problemas na realização do corte.

Tabela 14. Resultado de resistência ao arrancamento e tipo de ruptura

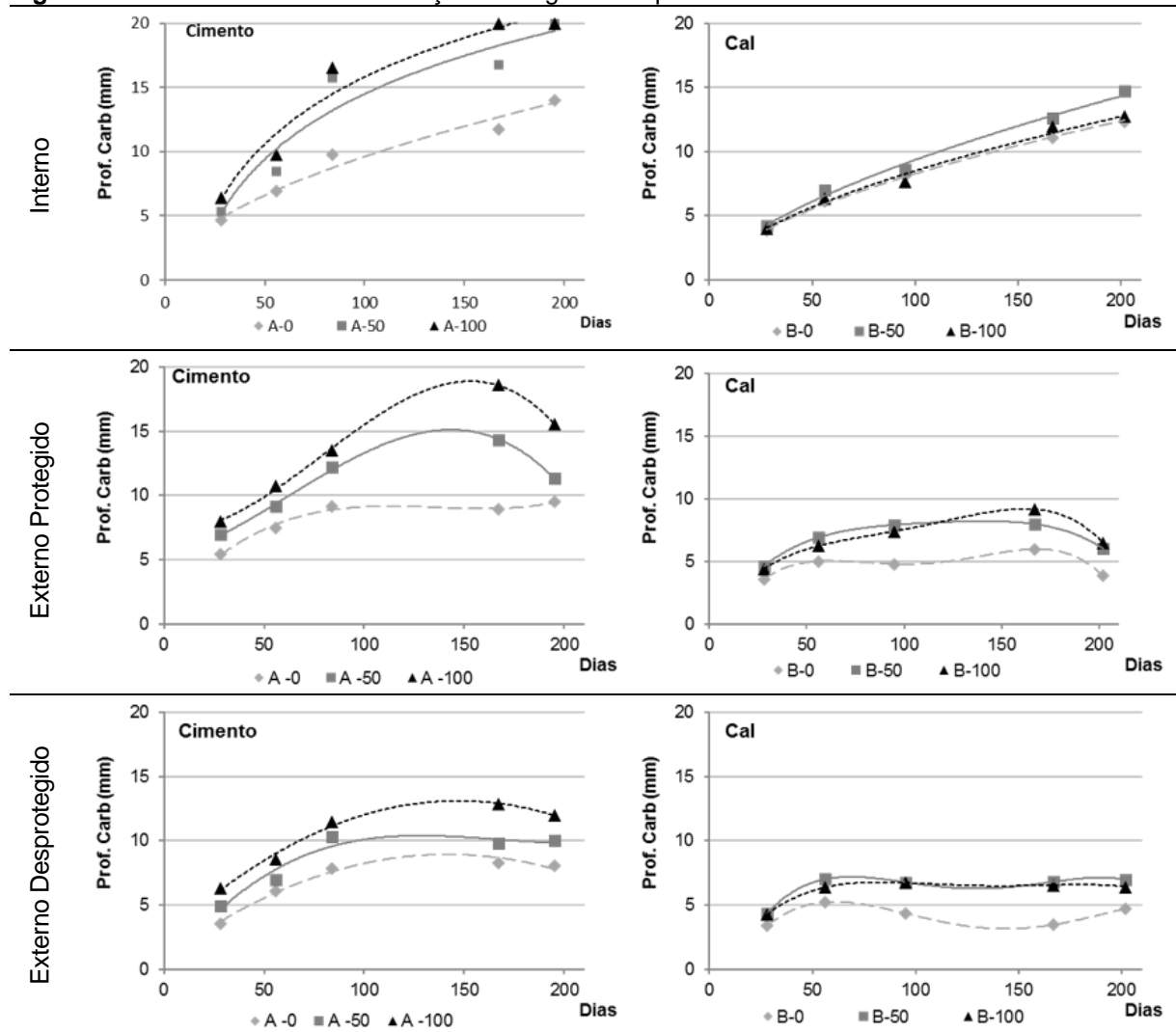
%	Traço A			Traço B		
	F (kN)	MPa	forma	F (kN)	MPa	forma
0	0,21	1,07E-04	S	-	-	-
	0,20	1,02E-04	S	0,25	1,27E-04	S
	0,03	1,18E-05	S	0,18	7,05E-05	S
	0,44	1,72E-04	S	0,00	0,00E+00	S
	0,33	1,29E-04	S	0,15	5,88E-05	F
	0,33	1,68E-04	S	0,23	9,01E-05	S/A
	0,14	5,49E-05	S	0,18	7,05E-05	S
	0,30	1,53E-04	S	0,04	2,04E-05	S
	0,00	0,00E+00	S	-	-	-
	0,24	9,41E-05	S	-	-	-
	0,00	0,00E+00	F	0,00	0,00E+00	S
	0,27	1,38E-04	S	0,00	0,00E+00	S
50	0,00	0,00E+00	F	0,17	6,66E-05	S/A
	0,15	7,64E-05	S	0,28	1,10E-04	S
	0,19	7,45E-05	S	-	-	-
	0,21	8,23E-05	S/A	0,11	5,60E-05	F
100	0,07	3,57E-05	F	0,13	6,62E-05	A
	0,21	8,23E-05	S	0,24	1,22E-04	A
	0,12	4,70E-05	S	0,21	8,23E-05	S
	0,20	1,02E-04	F	0,04	2,04E-05	S/A
	0,04	2,04E-05	S	0,07	2,74E-05	S/A
	0,01	3,92E-06	F	-	-	-

Legenda: S – Ruptura no substrato; S/A – Ruptura na interface substrato/argamassa; A – Ruptura na argamassa; F – Falha de colagem da pastilha metálica.

Os resultados apresentados acima não foram satisfatórios, uma vez que a maior parte das rupturas ocorreu no substrato (contato do chapisco com a alvenaria). Isso significa, portanto, que o ensaio avaliou a resistência à aderência do substrato (no caso o chapisco) e não da argamassa. Notou-se durante a realização do ensaio, que a aplicação do chapisco foi inadequada, o que interferiu nos resultados do ensaio. Desta maneira a NBR 15258 (2005) recomenda que o ensaio seja refeito, o que não foi possível devido ao tempo para a finalização do presente trabalho.

6.3 Carbonatação

Na Figura 24 são apresentadas as profundidades de carbonatação ao longo do tempo para as seis misturas analisadas, em diferentes ambientes de exposição. Para as misturas a base de cal (traço A) as amostras foram retiradas com idades de 28, 56, 84, 167 e 195 dias enquanto que as misturas mistas com cal (traço B) as idades foram 28, 56, 95, 167, 202 dias.

Figura 24. Profundidade de carbonatação ao longo do tempo⁸

Fonte: Próprio autor.

Com base na Figura 24 pode-se observar que a profundidade de carbonatação aumenta ao longo do tempo apenas para as argamassas do ambiente interno. No entanto, esperava-se que isto ocorresse para todos os ambientes, uma vez que é consenso na literatura que a profundidade de carbonatação é proporcional ao tempo de exposição havendo diversos modelos matemáticos, como Tuutti, (1982), Possan, (2010), Lagerblad, (2005), entre outros, que demonstram esta relação.

Uma das possíveis causas para a redução da profundidade de carbonatação nos ambientes externos nas últimas idades, foi que os corpos de prova ficaram em contato direto com o piso no local de exposição, desta forma sua base permaneceu úmida por mais tempo e, conseqüentemente retardou o ingresso do CO₂ nesta região da amostra. Assim, recomenda-se a utilização de estrados ou algum outro tipo de suporte elevado, preferencialmente de materiais poliméricos, a fim de evitar contato direto das amostras com o piso, permitindo circulação de ar na

⁸ Os valores de profundidade de carbonatação, emissão e captura ao longo do tempo para todos os ambientes estão no APÊNDICE C

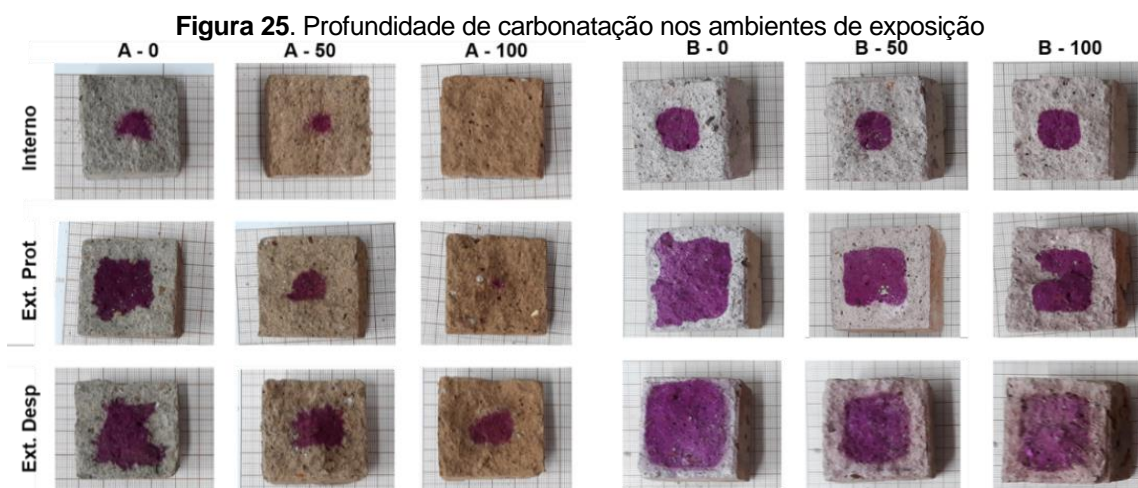
base das mesmas a fim de minimizar os problemas de variação de umidade no corpo de prova ao longo do ensaio natural.

Pode-se perceber ainda que a frente de carbonatação avança rapidamente para o interior das argamassas. No ambiente interno, por exemplo, duas das três misturas a base de cimento carbonataram totalmente (20 mm) em pouco menos de 200 dias. Como a NBR 13749 (2013) recomenda que o revestimento tenha espessura de 5 a 30 mm dependendo se são aplicadas interna ou externamente, observa-se que as argamassas de revestimento carbonatam totalmente em curtos períodos de tempo.

Já as argamassas mistas com cal apresentam uma propagação mais lenta, provavelmente devido à presença do MgO, uma vez que para o CO₂ avançar para o interior das argamassas ele precisa reagir com o CaO e também com o MgO. No entanto seus resultados são relevantes visto que para o ambiente interno chegaram até 15 mm (B-50) com 202 dias. Tal fato pode estar associado à menor porosidade das argamassas de cal, assim como a quantidade de compostos carbonatáveis na matriz cimentícia, o que é proporcional ao teor de cal empregado.

Outra análise que pode ser observada dos gráficos acima foi que para as argamassas a base de cimento a profundidade de carbonatação aumenta juntamente com a porcentagem de substituição do RCD, o que corrobora com os resultados de Andrade et al., (2018). No entanto, para as argamassas mistas com cal, a variação da substituição de 50% para 100% praticamente não alterou a profundidade de carbonatação encontrada, contudo foi mais elevada que a de referência. Isso pode estar relacionado à maior porosidade do agregado reciclado assim como à sua carbonatação prévia o que permitiu uma frente de carbonatação mais rápida.

Para avaliar a influência da profundidade de carbonatação nos diferentes ambientes de exposição, selecionaram-se as imagens dos corpos de prova com 167 dias de exposição e montou-se a Figura 25.



Fonte: Próprio autor.

Pode-se observar que para todas as misturas, seja elas com ou sem cal, a profundidade de carbonatação foi maior no ambiente interno, seguido do ambiente externo protegido da chuva e por último do ambiente externo desprotegido da chuva. Este resultado corrobora com o esperado e explicado na revisão bibliográfica, seção 3.1.2, comprovando que tanto a umidade quanto a concentração de CO₂ são fatores determinantes no avanço da frente de carbonatação.

6.4 Balanço das Emissões

6.4.1 Emissões

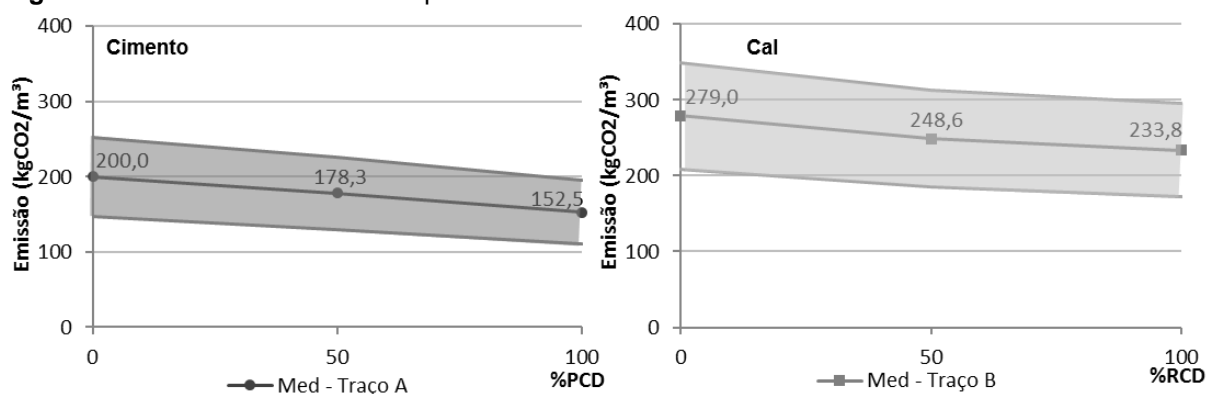
Para estimar as emissões de CO₂ associadas à produção das argamassas, foi necessário determinar primeiro as emissões advindas do cimento e da cal. Para a emissão do cimento fez-se a estimativa com base na porcentagem mínima, máxima e média de clínquer e somou-se a emissão por descarbonatação e energia térmica com a energia elétrica como pode ser observado na Tabela 15.

Tabela 15. Emissão do clínquer e do cimento

Emissão Clínquer (kgCO ₂ /t)	%Clínquer	Emissão do Cimento (kgCO ₂ /t)		
		Descarb. + Ene. Térmica	Ene. Elétrica	Total
866	Mínimo 45	389,7		398,6
	Máximo 85	736,1	8,91	745,0
	Média 65	562,9		571,8

Com os valores apresentados nas tabelas acima, as emissão da cal e dos agregados (presente na seção 5.5.1b e 5.5.1c) e a quantidade de material necessário para produzir 1 m³ de argamassa (ver Tabela 10) pode-se calcular a emissão por metro cúbico de argamassa. Na Figura 26 este resultado é apresentado, sendo que a faixa sombreada representa o intervalo máximo e mínimo da emissão e os valores evidenciados a média obtida para cada traço.

Figura 26. Estimativa das Emissões por m³



Fonte: Próprio autor.

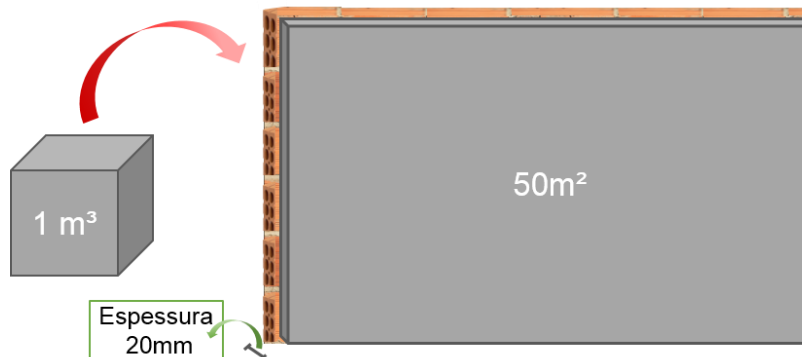
Como pode ser observado na figura acima, as emissões reduzem ligeiramente com o aumento da porcentagem de substituição do AN pelo de RCD. Quanto à presença de cal observa-se que este aumenta a emissão de CO₂ da argamassa em 39, 39 e 53 % para as misturas com 0, 50 e

100% de RCD, respectivamente. uma vez são dois materiais que contribuem consideravelmente para as emissões, o cimento e a cal.

6.4.2 Captura

Considerando que as argamassas estudadas no presente trabalho podem ser aplicadas tanto em paredes internas quanto externas e seguindo as recomendações da NBR 13749 (2013)⁹, definiu-se que a espessura média do revestimento seria de 20 mm. A partir disso, foi possível determinar a área de alvenaria que pode ser revestida com 1 m³ de argamassa, como mostra a Figura 27, o que dá uma relação de 50 m²/ 1 m³ de argamassa

Figura 27. Relação entre 1 m³ de argamassa e sua área aplicável considerando espessura média de 20 mm



Fonte: Próprio autor.

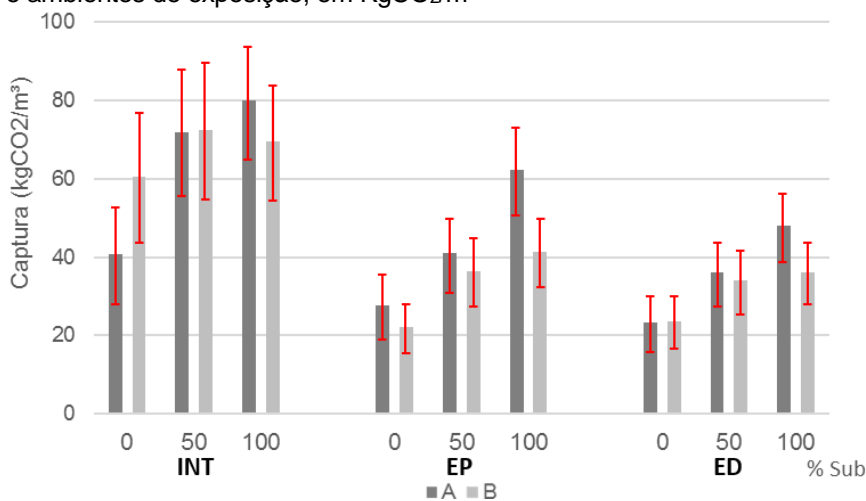
Com a determinação da área exposta ao CO₂ foi possível aplicar a eq. 8 e calcular a captura de CO₂ ao longo do tempo para as argamassas à base de cimento. Já para as argamassas mistas com cal não se encontrou na literatura a porcentagem de óxido de cálcio totalmente carbonatável¹⁰. Assim, para estimar sua captura de CO₂ utilizou-se uma faixa de valores considerando como limite mínimo 60%, limite máximo de 100% e a média entre os dois de 80% (STANMORE e GILOT, 2005).

Na Figura 28 são apresentados os resultados obtidos para a captura de CO₂ aos 195 dias nos diferentes ambientes de exposição. Nos gráficos, as colunas representam a captura de CO₂ considerando a porcentagem média de clínquer contido no cimento, enquanto que as barras de erro representam a captura considerando o teor máximo até a mínimo de clínquer que pode estar contido no cimento empregado na dosagem, conforme NBR 5736 (1991).

⁹ Determina que a espessura admissível do revestimento em paredes internas varia de 5 a 20 mm e em paredes externas de 20 a 30 mm

¹⁰ As normas NBR 6453 (2003) e NBR 7175 (2003) que tratam respectivamente sobre cal virgem e cal hidratada não apresentam este valor.

Figura 28. Captura de CO₂ aos 195 dias para as diferentes misturas e ambientes de exposição, em KgCO₂/m³



Fonte: Próprio autor.

A partir dos gráficos acima, pode-se observar que o sequestro de CO₂ foi maior para o ambiente interno, seguido do externo protegido da chuva e do externo desprotegido da chuva, o que corrobora com outros trabalhos da literatura.

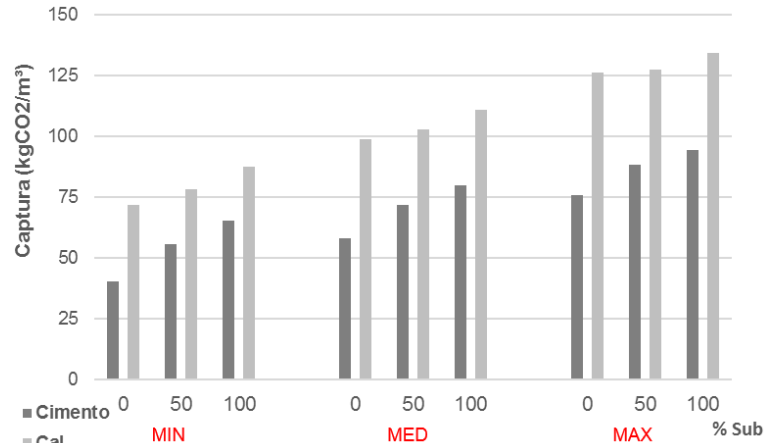
Com relação à porcentagem de substituição, observa-se que conforme esta aumenta, a captura de CO₂ também se eleva. No ambiente interno, a utilização de 100% de RCD aumenta a captura de CO₂, com relação ao referência (sem RCD) de 1,1 a 1,3 vezes nas argamassas com cal e de 1,8 a 2,3 vezes nas sem cal, dependendo da porcentagem de clínquer presente no cimento. Isto ocorre, pois na composição do RCD há a presença de materiais cimentícios e, conseqüentemente, hidróxido de cálcio também disponível para a carbonatação, o que favorece o sequestro de CO₂ do ambiente.

Além disso, Mazurana (2019) constatou que os agregados reciclados utilizados em seu estudo já estavam carbonatados e apresentavam CO₂ em sua superfície. Segundo a autora, o CO₂ presente no RCD pode carbonatar as argamassas e acelerar o ingresso de CO₂ para o interior do material, uma vez que parte do hidróxido de cálcio presente na matriz cimentante já foi consumido anteriormente

Tomando como base para os cálculos a leitura da profundidade carbonatada ao longo dos 195 dias, nota-se que as argamassas com cal possuem captura de CO₂ menor em relação às de cimento, sendo da ordem de 1 a 33% inferior, excetuando-se a mistura de referência para o ambiente interno, onde a captura de CO₂ da argamassa com cal foi 49% superior. Maiores estudos devem ser conduzidos com a finalidade de confirmar esse comportamento.

Por outro lado, se não levar em conta o período de tempo necessário para que as argamassas sejam totalmente carbonatada, mas apenas a profundidade máxima de carbonatação as argamassas mistas com cal apresentam captura superior do que as de cimento (ver Figura 29), sendo da ordem de 34 a 79% dependendo da porcentagem de clínquer contido no cimento.

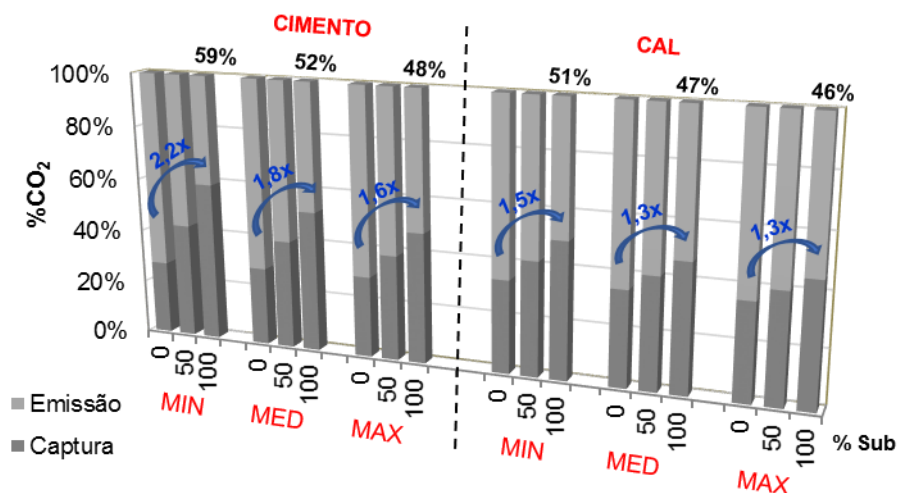
Figura 29. Captura máxima para as argamassas com e sem cal para a porcentagem mínima, máxima e média de clínquer.



Fonte: Próprio autor.

Com base nos resultados apresentados no gráfico acima foi possível calcular o potencial de CO₂ absorvido pelas argamassas com relação ao total emitido no seu processo de produção. Os resultados obtidos, com base na porcentagem mínima (MIN), média (MED) e máxima (MAX) de clínquer contido no cimento, podem ser visualizados na Figura 30.

Figura 30. Potencial de absorção com relação ao CO₂ emitido no processo de produção das argamassas



Fonte: Próprio autor.

As argamassas absorvem de 46 a 59% do CO₂ emitido no processo de produção, dependendo da presença ou não de cal e da quantidade de clínquer na composição do cimento. Estas porcentagens de absorção são as mesmas para todos os ambientes de exposição, o que altera entre eles é o tempo necessário para que isso ocorra. No caso do presente trabalho, as

argamassas à base de cimento expostas em ambiente interno com 50 e 100 % de RCD levaram menos de 200 dias para atingir a carbonatação total (20 mm) e, conseqüentemente, a captura de CO₂ máxima possível.

Com base na figura acima, pode-se observar que a utilização de RCD eleva o sequestro do CO₂ em até 2,2 vezes, para as argamassas de cimento, para o teor mínimo de clínquer contido no cimento, uma vez que para a fabricação do AR a quantidade de CO₂ emitida é menor e este material contribui com o aprisionamento do CO₂ devido à presença de materiais cimentícios carbonatáveis em sua composição.

7. CONCLUSÃO

Com a elaboração do presente trabalho pode-se concluir que a utilização do agregado reciclado reduz a emissão associada ao processo de produção das argamassas de revestimento e eleva a captura em até 2,3 vezes, considerando o teor mínimo de clínquer contido no cimento e o emprego de 100% de RCD.

As argamassas com cal, devido a maior disponibilidade de produtos carbonizáveis, como Ca(OH)_2 e Mg(OH)_2 , possuem maior potencial de captura de CO_2 ao longo da vida útil da edificação, podendo absorver 34 a 79% mais CO_2 do que as argamassas de cimento.

Após a carbonatação total ser atingida, as argamassas de revestimento podem absorver de 46 a 59% do CO_2 emitido no processo de produção, dependendo da presença ou não de cal e da quantidade de clínquer na composição do cimento. Este potencial de captura está atrelado à relação m^2/m^3 , ou seja, área de revestimento/volume de argamassa empregado, já que a captura de CO_2 é função da área superficial sujeita à carbonatação.

O tempo para o qual a profundidade de carbonatação máxima seja alcançada varia de acordo com o ambiente de exposição, sendo atingido primeiro pelas argamassas do ambiente interno, seguido do externo protegido da chuva e por último do externo desprotegido da chuva. No caso do presente trabalho, as argamassas à base de cimento com 50 e 100% de RCD precisam de menos de 200 dias para que isso ocorra em ambiente interno e capturam até 88 e 94 kgCO_2/m^3 , respectivamente.

Quanto à presença do RCD nas propriedades físicas e mecânicas das argamassas pode-se concluir que este reduz a resistência à tração na flexão das argamassas à base de cimento, no entanto produz um pequeno aumento nas argamassas mistas com cal. Já a resistência à compressão reduz, em ambos os casos, com a utilização de 50% de RCD, mas volta a aumentar com a elevação do teor para 100%. A presença da cal reduz consideravelmente tanto a resistências à tração quanto à compressão chegando a 63% e 65% 28 dias, respectivamente.

O aumento da porcentagem de agregado reciclado acarreta uma redução no módulo de elasticidade dinâmico, contudo diferentemente da resistência, isso é favorável pois diminui a rigidez das argamassas melhora a sua trabalhabilidade e reduz a probabilidade de fissuração.

Destaca-se que o estudo da captura de CO_2 de materiais à base de cimento, como argamassas e concretos é de elevada importância técnica e ambiental, tendo em vista o emprego deste indicador como medida compensatória no balanço das emissões.

O ambiente construído nacional é predominantemente à base de materiais cimentícios, sendo de importância compreender que estes produtos estão constantemente absorvendo CO₂ desde a fase da construção, durante a vida útil e no período pós-demolição da edificação, o que é desejável do ponto de vista ambiental.

Neste sentido, futuros estudos devem ser conduzidos avaliando as emissões e captura de CO₂ associadas às argamassas, no que se refere: i) ao emprego de aditivos substituídos da cal; ii) a variações do traço; e, iii) ao efeito do tipo e espessura de revestimento da edificação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5736: Cimento Portland pozolânico**. Rio de Janeiro. 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 99779: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade**. Rio de Janeiro. 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7200: Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Procedimento**. Rio de Janeiro. 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro. 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem**. Rio de Janeiro. 2003.
- 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**. Rio de Janeiro. 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15258: Argamassa para revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência potencial de aderência à tração**. Rio de Janeiro. 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro. 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52: Agregado Fino - Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro. 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13749: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Especificação**. Rio de Janeiro. 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605: Cimento portland e outro materiais em pó - Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro. 2017.
- ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, 2016. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/panorama_apresentacao.cfm>. Acesso em: 22 abr. 2018.
- ANDRADE, C.; SANJUÁN, M. Á. Updating Carbon Storage Capacity of Spanish Cements. **Sustainability**, v. 10, n. 11, 2018. ISSN <https://doi.org/10.3390/su10124806>.
- ANDRADE, J. J. O. et al. Evaluation of mechanical properties and carbation of mortars produced with construction and demolition waste. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 70-83, 2018. ISSN doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.089.
- ARAÚJO, N. N. **Desempenho de Argamassas de Revestimento Produzidas com Agregado Reciclados Oriundos do Resíduo de Construção e Demolição da Grande Natal - RN**. Dissertação de mestrado - UFRN. Natal. 2014.
- ASTM. **E 1876 -01: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration**. ASTM International. West Conshohocken, PA. 2006.
- BARBOSA, M. T. G.; COURA, C. V. G.; MENDES, L. O. Estudo sobre a areia artificial em substituição à natural para confecção de concreto. **Ambiente Construído**, v. 8, n. 4, p. 51-60, out/dez 2008. ISSN 1678-8621.
- BRASIL. **Lei nº 12.305 - Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Publicado no DOU 03/08/2010
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicação (MCTIC). **Terceiro Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa: Setor Processos Industriais - Produtos Mineraiis**, 2015. Disponível em: <www.sirene.mcti.gov.br/publicacoes>. Acesso em: 28 Abril 2018.

- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicação (MCTIC). **Terceira Edição das Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil**, 2016a. Disponível em: <www.sirene.mcti.gov.br/publicacoes>.
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações. **Fator médio - Inventários corporativos**, 2016b. Disponível em: <https://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao_corporativos.html>. Acesso em: 05 novembro 2018.
- BRE. **Global, Product Category Rules for Type III environmental product declaration of construction products**. EN15804:2012+A1:2013. PN514. 2014. (Issue 1.0 2014).
- CASALI, J. M.; GAVA, G. P.; PRUDÊNCIO, L. R. J. Avaliação do desempenho de aditivos hidrofugantes e impermeabilizantes empregados em argamassas de assentamento para alvenaria estrutural. **Anais Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído - Entac**, Florianópolis, n. 11, p. 10, agosto 2006.
- CHUN, Y.; NAIK, T. R.; KRAUS, R. N. **Carbon Dioxide Sequestration in Concrete in Different Curing Environments**. International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. Coventry, UK: [s.n.]. 2007.
- CNI, C. N. D. I.-. **Indústria Brasileira de Cimento: Base para a construção do desenvolvimento**. Encontro da indústria para a Sustentabilidade. Brasília. 2012.
- CONAMA. **Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002**. Publicado no DOU nº136 de 17/07/2002, págs. 95-96. [S.I.]. 2002.
- CONAMA. **Resolução nº 431, de 24 de maio de 2011**. Publicada no DOU nº 99, de 25/05/2011, pág. 123. [S.I.]. 2011.
- COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, A. H. A. **Informativo Técnico-Científico ITC-ME/ATCP: Módulos elásticos: visão geral e métodos de caracterização**. ATCP Engenharia Física. [S.I.]. 2010.
- COSTA, M. R. M. M.; PACHECO, A. P. G. Avaliação do potencial de carbonatação de cales hidratadas em pasta. **Revista Matéria**, 2017. ISSN 1517-7076.
- EVANGELISTA, L.; BRITO, J. Concrete with fine recycled aggregates: a review. **European journal of environmental and Civil Engineering**, v. 18, n. 2, p. 129-172, 2014. ISSN 10.1080/19648189.2013.851038.
- IFUKUI, E. et al. CO₂ liverado na produção de argamassas. **X Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas**, Fortaleza, 2013. ISSN 2238-0191.
- FURCAS, C. et al. Evaluation of CO₂ uptake under mild accelerated carbonation conditions in cement-based and lime-based mortars. **Advanced Materials research**, p. 57-61, junho 2014. ISSN 10.4028/www.scientific.net/AMR.980.57.
- HUIJGEN, W. J. J.; COMANS, R. N. J. Carbon dioxide Sequestration by mineral carbonation. **Energy**, p. 1-52, Fevereiro 2003. ISSN ECN-C--03-016.
- JOHN, V. M. et al. **Potencial de mitigação de CO₂ de materiais cimentícios. SINIC e ABCP**. São Paulo: [s.n.], 2018 (não publicado).
- JOHN, V. M.; PUNHAGUI, K. R. G.; CINCOTTO, M. A. **Economia de baixo carbono: impactos de novos marcos regulatórios e tecnologias sobre a economia brasileira**. Ribeirão Preto: FUNPEC, 2015.
- JOHN, V. M.; PUNHAGUI, K. R. G.; CINCOTTO, M. A. **Produção de cal**. Economia de Baixo Carbono - Impactos de Novos Marcos Regulatórios e Tecnologias Sobre a Economia Brasileira. Ribeirão Preto: Funpec Editora, p. 371-400. 2014. (ISBN: 978-857747-103-4).
- KALIYAVARADHAN, S. K.; LING, T. C. Potential of CO₂ sequestration through construction and demolition (C&D) waste - An overview. **Journal of CO₂ utilization**, p. 234-242, julho 2017. ISSN <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcou.2017.05.014>.
- KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adições de sílica ativa**. Tese de Doutorado - UFRGS. Porto Alegre. 2002.
- LAGERBLAD, B. **Carbon dioxide uptake during concrete life cycle - State of the art**. Swedish Cement and Concrete Research Institute. Estocolmo. 2005. (ISBN 91-976070-0-2 / ISSN 0346-8240).

LO, T. et al. Evaluation of carbonation resistance of paint coated concrete for buildings. **Construction and Building Materials**, v. 107, p. 299-306, 2016. ISSN <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.026>.

MARQUES, R. B. **Resíduos da construção civil em Araguari - MG: do diagnóstico à proposta de um modelo gerencial proativo**. Dissertação de mestrado UFU. Uberlândia, p. 174. 2007.

MATTANA, A. J. **ESTUDOS DE CALES HIDRATADAS DE MERCADO - CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, FÍSICA E COMPORTAMENTO REOLÓGICO DA PASTA**. Dissertação de Mestrado - UFPR. Curitiba, p. 148. 2013.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedade e materiais**. São Paulo: Ibracon, 2014.

MONTEIRO, J. H. P. **Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos**. IBAN. Rio de Janeiro. 2001.

NETO, J. C. M.; SCHALCH, V. Gestão dos Resíduos de Construção e Demolição: Estudo da Situação no Município de São Carlos -SP Brasil. **Revista Engenharia Civil da Universidade do Minho**, 2010.

NEVES, I. B. F. **Avaliação da Carbonatação em Argamassas de Cimento com Adições de Cinza de Casca de Arroz Amorfa e Cristalina**. Dissertação de Mestrado - UnB. Brasília. 2005.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5ª. ed. Porto Alegre: bookman, 2016. pagina 521.

NIQUES, G. **Efeito do tempo de maturação na microestrutura de uma cal virgem dolomítica**. Dissertação de mestrado - UFSC. Florianópolis. 2013.

OLIVEIRA, B. T. **Usao de Resíduos de construção e demolição em argamassas para revestimento de alvenari**. Trabalho de conclusão de curso - UFRJ. Rio de Janeiro, p. 68. 2015.

ORTOLAN, T. L. P.; SCHIAVON, J. Z.; ANDRADE, J. J. O. Estudo da carbonatação natural em argamassas produzidas com agregados miúdos reciclados de construção e demolição. **57º Congresso Brasileiro do Concreto**, Bonito-MS, outubro 2015.

PADE, C.; GUIMARAES, M. The CO₂ uptake of concrete in a 100 year perpective. **Cement and Concrete Research**, p. 1384-1356, 2007. ISSN 10.1016/j.cemconres.2007,06,09.

PAULETTI, C. **Análise Comparativa de Procedimentos para Ensaio Acelerados de Carbonatação**. Dissertação de Mestrado - UFRGS. Porto Alegre. 2004.

PAULETTI, C. **Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de preciação**. Tese de Doutorado - UFRGS. Porto Alegre, p. 285. 2009.

PAULETTI, C.; POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. C. Carbonatação Acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 7, n. 2, p. 7-20, out/dez 2007. ISSN 1678-8621.

PESSÔA, P. O. A. **Avaliação da Influência do Consumo de Cimento na Corrosão de Armaduras em Estruturas de Concreto Carbonatadas**. Dissertação - UnB. Brasília. 2002.

POOLE, A. B.; SIMS, I. **Concrete Petrography - A handbook of investigative techniques**. 2ª. ed. Londres: Taylor&Francis, 2016.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. Tese de Doutorado - UFRGS. Porto Alegre. 2010.

POSSAN, E. et al. CO₂ uptake potential due to concrete carbonation: A case study. **Case Studies in Construction Materials**, n. 6, p. 147 - 161, 2017. ISSN <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.01.007>.

POSSAN, E.; FELIX, E. F.; THOMAZ, W. A. Metodologia para estimativa da captura de CO₂ devido à carbonatação do concreto. In: _____ **Estudos Ambientais**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, v. 4, 2017. p. 17-29.

RILEM. CPC 18 Measurement of Hardened Concrete Carbonation Depth. **TC56 - MHM Hydrocarbon Materials**, 1998. ISSN 0025-5432/88.

- SANJUÁN, M. A. et al. Effect of Curing Time on Granulated Blast-furnace Slag Cement Mortars Carbonation. **Cement and Concrete Composite**, abril 2018. ISSN doi: 10.1016/j.cemconcomp.2018.04.006.
- SINIC, S. N. D. I. D. C.-. **Resultados Preliminares Julho de 2017**, 2017. Disponível em: <<http://www.snic.org.br/pdf/resultado/Resultados%20Preliminares%20Julho%202017.pdf>>. Acesso em: 22 agosto 2017.
- SIPILÄ, J.; TEIR, S.; ZEVENHOVEN, R. **Carbon dioxide Sequestration by mineral carbonation - Literature review update 2005-2007**. Report, Abo Akademi Univ. Heat Engineering Lab. Turku, Finlandia. 2008.
- STANMORE, B. R.; GILOT, P. Review - Calcination and Carbonation of limestone during thermal cycling for CO₂ sequestration. **Fuel Processing Technology**, v. 86, n. 16, p. 1708-1743, 2005. ISSN <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2005.01.023>.
- TESSARO, A. B.; SÁ, J. S.; SCREMIN, L. B. Quantificação e Classificação dos Resíduos Procedentes da Construção Civil e Demolição no Município de Pelotas, RS. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, p. 121-130, abr./jun 2012. ISSN 1678-8621.
- THOMAS, C. et al. Durability of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 1054-1065, 2014. ISSN 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.106.
- TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Swedish Cement and Concrete Research Institute. Stockholm, Suecis, p. 30. 1982.
- USGS. **Mineral Commodity Summaries 2017**, 2017. Disponível em: <<https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement/mcs-2017-cemen.pdf>>. Acesso em: 22 agosto 2017.
- VAN GERVEN, T. et al. Effects of carbonation and leaching on porosity in cement-bound waste. **Waste Management**, v. 27, p. 977-985, 2007. ISSN 10.1016/j.wasman.2006.05.00.
- WBCDS. GNR Project Reporting CO₂. **Gross CO₂ emissions - Weighted average excluding CO₂ from on-site power generation - Grey clinker**, 2016a. Disponível em: <<http://www.wbcscement.org/GNR-2016/index.html>>. Acesso em: 10 outubro 2018.
- WBCDS. GNR Project Reporting CO₂. **Cement plant power consumption - Weighted average Grey and white cement**, 2016b. Disponível em: <http://www.wbcscement.org/GNR-2016/Brazil/GNR-Indicator_33AGW-Brazil.html>. Acesso em: 05 novembro 2018.
- XI, F. et al. Substantial Global Carbon Uptake by Cement Carbonation. **Nature Geoscience**, Novembro 2016. ISSN 10.1038/NGEO2840.
- YANG, K. H.; SEO, E. A.; TAE, S. H. Carbonation and CO₂ uptake of concrete. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 46, p. 43-52, 2014. ISSN <http://dx.doi.org/10.1016/j.eiar.2014.01.004>.
- YOU, K. S. et al. Effect of CO₂ Carbonation on the Chemical Properties of Waste Cement: CEC and the Heavy Metal Adsorption Ability. **Materials Transactions**, v. 52 (8), p. 1679-1684, 2011. ISSN <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2011089>.
- ZORDAN, S. E. **Entulho da Indústria da Construção Civil**. Projeto de Reciclagem da Escola Politécnica da USP. [S.I.]. 2001.

APÊNDICE A

Figura 31. Valores para a absorção de água por capilaridade em g/cm³.

Traço	15min	30min	45min	1h	1,5h	2h	24h	h _{água} (mm)
A-0	0,250	0,311	0,346	0,372	0,423	0,469	1,263	75,7
A-50	0,285	0,351	0,392	0,438	0,489	0,545	1,711	72,7
A-100	0,300	0,382	0,428	0,484	0,550	0,611	1,905	59,6
B-0	0,071	0,117	0,122	0,168	0,204	0,265	1,716	71,9
B-50	0,214	0,336	0,423	0,519	0,632	0,749	2,572	89,8
B-100	0,209	0,331	0,397	0,458	0,570	0,688	2,338	74,5

APÊNDICE B

Tabela 16. Valores para resistência a compressão e tração na flexão, em MPa.

Dias	Compressão			Tração na Flexão		
	7	28	63	7	28	63
A-0	8,47	15,54	17,98	2,86	4,03	3,80
A-50	6,63	12,61	12,96	1,62	2,60	3,23
A-100	7,59	14,94	14,49	1,73	2,67	3,23
B-0	2,84	5,46	7,60	1,31	1,50	2,65
B-50	2,11	5,13	6,88	0,89	1,46	2,23
B-100	2,43	7,12	9,43	1,08	1,92	2,74

Tabela 17. Valores para Módulo de elasticidade dinâmico, em GPa.

%	Traço A	Traço B
0	26,63	8,54
50	17,05	7,25
100	13,08	8,53

APÊNDICE C

Tabela 18. Profundidade de carbonatação ao longo do tempo, em mm

Traço	Tempo (dias)	Interno			Ext. Protegido			Ext. Desprotegido		
		0	50	100	0	50	100	0	50	100
A	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	28	4,66	5,34	6,40	5,43	6,97	7,99	3,56	4,90	6,29
	56	6,92	8,48	9,79	7,48	9,16	10,74	6,07	6,95	8,61
	84	9,77	15,73	16,57	9,13	12,20	13,53	7,81	10,30	11,47
	167	11,75	16,77	20,00	8,91	14,34	18,67	8,25	9,82	12,86
	195	14,01	20,00	20,00	9,51	11,37	15,56	8,07	10,01	12,00
B	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	28	3,85	4,20	4,03	3,59	4,63	4,39	3,36	4,33	4,29
	56	6,14	6,99	6,38	5,02	6,91	6,24	5,22	7,01	6,37
	95	8,09	8,61	7,65	4,79	7,92	7,42	4,35	6,78	6,74
	167	11,07	12,65	11,94	5,99	7,99	9,17	3,47	6,81	6,56
	202	12,34	14,73	12,73	3,83	6,03	6,52	4,73	6,96	6,41

Tabela 19. Emissão para as argamassas com base na porcentagem de clínquer, em kgCO₂/m³

	A-0	A-50	A-100	B-0	B-50	B-100
min	147,7	130,3	110,3	208,4	184,8	173,0
max	252,4	226,3	194,7	349,6	312,4	294,7
med	200,0	178,3	152,5	279,0	248,6	233,8

Tabela 20. Captura de CO₂ para as argamassas à base de cimento (traço A), em kgCO₂/m³

	tempo	Interno			Ext. Protegido			Ext. Desprotegido		
		0	50	100	0	50	100	0	50	100
min	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	28	9,4	14,8	20,9	10,9	19,3	26,1	7,1	13,6	20,6
	56	13,9	23,5	32,0	15,0	25,4	35,1	12,2	19,3	28,1
	84	19,6	43,7	54,2	18,3	33,9	44,2	15,7	28,6	37,5
	167	23,6	46,6	65,4	17,9	39,8	61,0	16,6	27,3	42,0
	195	28,1	55,6	65,4	19,1	31,6	50,9	16,2	27,8	39,2
max	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	28	17,7	23,6	30,1	20,6	30,7	37,6	13,5	21,6	29,6
	56	26,2	37,4	46,1	28,4	40,4	50,5	23,0	30,7	40,5
	84	37,1	69,4	78,0	34,6	53,8	63,7	29,6	45,4	54,0
	167	44,6	74,0	94,2	33,8	63,3	87,9	31,3	43,3	60,5
	195	53,1	88,3	94,2	36,1	50,2	73,3	30,6	44,2	56,5
med	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	28	13,5	19,2	25,5	15,8	25,0	31,9	10,3	17,6	25,1
	56	20,1	30,5	39,1	21,7	32,9	42,8	17,6	25,0	34,3
	84	28,3	56,6	66,1	26,5	43,9	54,0	22,7	37,0	45,8
	167	34,1	60,3	79,8	25,9	51,5	74,4	23,9	35,3	51,3
	195	40,6	71,9	79,8	27,6	40,9	62,1	23,4	36,0	47,8

Tabela 21. Captura de CO₂ para as argamassas mistas de cal (traço B), em kgCO₂/m³

	tempo	Interno			Ext. Protegido			Ext. Desprotegido		
		0	50	100	0	50	100	0	50	100
min	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	28	13,8	16,4	17,6	12,9	18,1	19,2	12,1	16,9	18,7
	56	22,0	27,3	27,9	18,0	27,0	27,3	18,7	27,4	27,8
	84	29,0	33,7	33,4	17,2	31,0	32,4	15,6	26,5	29,4
	167	39,7	49,5	52,1	21,5	31,2	40,1	12,4	26,6	28,6
	195	44,3	57,6	55,6	13,7	23,6	28,5	17,0	27,2	28,0
max	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	28	24,3	26,7	27,0	22,6	29,5	29,5	21,2	27,6	28,8
	56	38,7	44,5	42,8	31,6	44,0	41,9	32,9	44,6	42,7
	84	51,0	54,8	51,3	30,2	50,4	49,8	27,4	43,1	45,2
	167	69,7	80,5	80,1	37,7	50,8	61,5	21,8	43,4	44,0
	195	77,7	93,7	85,4	24,1	38,4	43,7	29,8	44,3	43,0
med	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	28	19,0	21,6	22,3	17,7	23,8	24,3	16,6	22,3	23,7
	56	30,3	35,9	35,3	24,8	35,5	34,6	25,8	36,0	35,3
	84	40,0	44,2	42,3	23,7	40,7	41,1	21,5	34,8	37,3
	167	54,7	65,0	66,1	29,6	41,0	50,8	17,1	35,0	36,3
	195	61,0	75,7	70,5	18,9	31,0	36,1	23,4	35,8	35,5

Tabela 22. Potencial de absorção com relação ao CO₂ emitido no processo de produção das argamassas à base de cimento (traço A)

	tempo	Interno			Ext. Protegido			Ext. Desprotegido	
		0	50	100	0	50	100	0	50
min	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	28	6,3	11,4	19,0	7,4	14,8	23,7	4,8	10,4
	56	9,4	18,1	29,0	10,2	19,5	31,8	8,3	14,8
	84	13,3	33,5	49,1	12,4	26,0	40,1	10,6	21,9
	167	16,0	35,7	59,3	12,1	30,5	55,3	11,2	20,9
	195	19,0	42,6	59,3	12,9	24,2	46,1	11,0	21,3
max	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	28	7,0	10,4	15,5	8,2	13,6	19,3	5,3	9,5
	56	10,4	16,5	23,7	11,2	17,9	26,0	9,1	13,5
	84	14,7	30,7	40,1	13,7	23,8	32,7	11,7	20,1
	167	17,7	32,7	48,4	13,4	28,0	45,1	12,4	19,2
	195	21,1	39,0	48,4	14,3	22,2	37,6	12,1	19,5
med	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	28	6,8	10,8	16,7	7,9	14,0	20,9	5,2	9,9
	56	10,0	17,1	25,6	10,9	18,5	28,1	8,8	14,0
	84	14,2	31,7	43,3	13,2	24,6	35,4	11,3	20,8
	167	17,0	33,8	52,3	12,9	28,9	48,8	12,0	19,8
	195	20,3	40,3	52,3	13,8	22,9	40,7	11,7	20,2

Tabela 23. Potencial de absorção com relação ao CO₂ emitido no processo de produção das argamassas mistas de cal (traço B)

		Interno			Ext. Protegido			Ext. Desprotegido	
tempo		0	50	100	0	50	100	0	50
min	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	28	6,6	8,9	10,2	6,2	9,8	11,1	5,8	9,2
	56	10,6	14,8	16,1	8,6	14,6	15,8	9,0	14,8
	84	13,9	18,2	19,3	8,2	16,8	18,7	7,5	14,3
	167	19,1	26,8	30,1	10,3	16,9	23,2	6,0	14,4
	195	21,2	31,2	32,1	6,6	12,8	16,5	8,1	14,7
max	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	28	6,9	8,5	9,2	6,5	9,4	10,0	6,1	8,8
	56	11,1	14,2	14,5	9,0	14,1	14,2	9,4	14,3
	84	14,6	17,5	17,4	8,6	16,1	16,9	7,8	13,8
	167	20,0	25,8	27,2	10,8	16,3	20,9	6,2	13,9
	195	22,2	30,0	29,0	6,9	12,3	14,8	8,5	14,2
med	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	28	6,8	8,7	9,5	6,4	9,6	10,4	6,0	9,0
	56	10,9	14,4	15,1	8,9	14,3	14,8	9,3	14,5
	84	14,3	17,8	18,1	8,5	16,4	17,6	7,7	14,0
	167	19,6	26,1	28,3	10,6	16,5	21,7	6,1	14,1
	195	21,9	30,4	30,1	6,8	12,5	15,4	8,4	14,4