



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE  
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E  
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA**

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA PROTEÇÃO SUPERFICIAL (PINTURA) NA  
CAPTURA DE CO<sub>2</sub> DEVIDO À CARBONATAÇÃO DE ARGAMASSAS DE  
REVESTIMENTO**

**GABRIEL ROSSETTO PEDRY**

Foz do Iguaçu  
2020

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA PROTEÇÃO SUPERFICIAL (PINTURA) NA  
CAPTURA DE CO<sub>2</sub> DEVIDO À CARBONATAÇÃO DE ARGAMASSAS DE  
REVESTIMENTO**

**GABRIEL ROSSETTO PEDRY**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito à aprovação do componente curricular de Trabalho de Conclusão de Curso II do curso de Bacharelado em Engenharia Civil de Infraestrutura.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Edna Possan  
Coorientador: MSc. Eduardo Rigo

GABRIEL ROSSETTO PEDRY

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA PROTEÇÃO SUPERFICIAL (PINTURA) NA  
CAPTURA DE CO2 DEVIDO À CARBONATAÇÃO DE ARGAMASSAS DE  
REVESTIMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito à aprovação do componente curricular de Trabalho de Conclusão de Curso II do curso de Bacharelado em Engenharia Civil de Infraestrutura

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientador: Prof. Dr<sup>a</sup>. Edna Possan  
UNILA

---

Coorientador: MSc. Eduardo Rigo

---

Prof. Dr. Cesar Winter De Mello  
UNILA

---

Prof. Dr<sup>a</sup>. Giovanna Patrícia Gava Oyamada  
UNIOESTE

Foz do Iguaçu, 18 de dezembro de 2020.

## TERMO DE SUBMISSÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS

Nome completo do autor(a): Gabriel Rossetto Pedry

Curso: Engenharia Civil de Infraestrutura

	Tipo de Documento
<input checked="" type="checkbox"/> graduação	<input type="checkbox"/> artigo
<input type="checkbox"/> especialização	<input checked="" type="checkbox"/> trabalho de conclusão de curso
<input type="checkbox"/> mestrado	<input type="checkbox"/> monografia
<input type="checkbox"/> doutorado	<input type="checkbox"/> dissertação
	<input type="checkbox"/> tese
	<input type="checkbox"/> CD/DVD – obras audiovisuais
	<input type="checkbox"/> _____

Título do trabalho acadêmico: AVALIAÇÃO DO EFEITO DA PROTEÇÃO SUPERFICIAL (PINTURA) NA CAPTURA DE CO<sub>2</sub> DEVIDO À CARBONATAÇÃO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO.

Nome do orientador(a): Edna Possan

Data da Defesa: 18 / 12 / 2020

### Licença não-exclusiva de Distribuição

O referido autor(a):

a) Declara que o documento entregue é seu trabalho original, e que o detém o direito de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade.

b) Se o documento entregue contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder à UNILA – Universidade Federal da Integração Latino-Americana os direitos requeridos por esta licença, e que esse material cujos direitos são de terceiros está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdo do documento entregue.

Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não a Universidade Federal da Integração Latino-Americana, declara que cumpriu quaisquer obrigações exigidas pelo respectivo contrato ou acordo.

Na qualidade de titular dos direitos do conteúdo supracitado, o autor autoriza a Biblioteca Latino-Americana – BIUNILA a disponibilizar a obra, gratuitamente e de acordo com a licença pública *Creative Commons Licença 3.0 Unported*.

Foz do Iguaçu, \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

---

Assinatura do Responsável

Dedico este trabalho aos que me são mais importantes, meus pais e meu irmão. Sem eles nada seria possível.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Deus.

Aos meus pais Ornélio e Roseli e ao meu irmão Rogério por toda a ajuda, incentivo e apoio nesta caminhada.

Aos professores da banca pelas orientações e contribuições.

À minha orientadora Edna Possan, pelas oportunidades, ensinamentos e orientações.

A meu coorientador Eduardo Rigo, pelo apoio e contribuição na realização desse trabalho.

À professora Giovanna Gava e a UNIOESTE pelo empréstimo de equipamentos para realização da pesquisa.

Aos colegas de curso, em especial Rafaela Goulart por todo apoio e por sempre estar ao meu lado, João Bonfim pela grande amizade de longa data e Gabriel Werner pela amizade e parceria.

Aos técnicos do laboratório LADEMA da UNILA, pela ajuda nos ensaios de laboratório.

À ITAIPU BINACIONAL e ao Instituto Federal do Paraná (IFPR) pela colaboração para a realização dos ensaios da pesquisa.

A todos, o meu muito obrigado.

*Não é o mais forte que sobrevive, nem o mais inteligente, mas o que melhor se adapta às mudanças. **Charles Darwin***

PEDRY, Gabriel Rossetto. **Avaliação do efeito da proteção superficial (pintura) na captura de CO<sub>2</sub> devido à carbonatação de argamassas de revestimento**. 2020. 71 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2020.

## RESUMO

A indústria da construção civil gera impactos ambientais pelo elevado consumo de recursos naturais, geração de resíduos ou produção de gases poluentes, que contribuem para a intensificação do efeito estufa. Assim, tem-se estudado o fenômeno da carbonatação dos materiais cimentícios como forma de capturar e estocar o CO<sub>2</sub> atmosférico para minimizar os problemas ambientais causados por este gás, de modo a mitigar as emissões ocasionadas pela indústria cimenteira. Contudo, os estudos já desenvolvidos desconsideram o efeito de proteções superficiais, o qual é a situação real da maioria dos revestimentos de argamassas, na difusão de dióxido de carbono nos materiais. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar a influência da proteção superficial do tipo pintura imobiliária na captura de CO<sub>2</sub> devido à carbonatação em argamassas de revestimento. Para isso foram produzidos corpos de provas prismáticos de argamassas no traço 1:1:6, variando-se o sistema de pintura aplicado à superfície, que foram comparados com amostras de referência (sem proteção superficial). Nas amostras com proteção superficial, foram empregadas quatro diferentes tintas imobiliárias tipo premium (látex PVA, acrílica fosca, acrílica acetinada e acrílica semibrilho), todas em tons neutros. As amostras foram submetidas a três diferentes ambientes de exposição natural (ambiente interno, externo protegido e externo desprotegido) e, também, submetidas à carbonatação acelerada a uma temperatura de 23°C, umidade de 60% e uma concentração de 5% de CO<sub>2</sub>. Foram coletados resultados de profundidade de carbonatação em diferentes idades de exposição ao CO<sub>2</sub> natural (64, 100, 190 dias) e acelerado (0, 10 dias). Os resultados mostraram que a proteção superficial do tipo pintura imobiliária reduziu consideravelmente a velocidade de difusão de CO<sub>2</sub> e, conseqüentemente, a taxa de captura de CO<sub>2</sub> pela reação de carbonatação. Verificou-se, ainda, que a profundidade de carbonatação foi maior em amostras sem proteção superficial, seguida das amostras com pintura tipo látex PVA e acrílica, sendo que para o ambiente externo protegido da chuva, aos 190 dias de exposição natural ao CO<sub>2</sub>, as amostras com tinta acrílica apresentaram redução média de 71,24% e 273,89% na profundidade de carbonatação, quando comparadas com tinta látex PVA e sem proteção superficial, respectivamente. Observou-se também que as amostras que receberam proteção superficial do tipo acrílica apresentaram frente de carbonatação muito próximas entre os diferentes tipos de acabamento (fosca, acetinada e semibrilho), demonstrando a alta potencialidade protetiva das tintas acrílicas. Portanto, com os resultados obtidos, constata-se que os estudos voltados ao tema de captura de CO<sub>2</sub> ao longo do ciclo de vida dos materiais à base de cimento devem considerar o efeito da proteção superficial, uma vez que estas reduzem consideravelmente a difusão de CO<sub>2</sub> para o interior dos materiais, comprometendo a velocidade de propagação da frente de carbonatação.

**Palavras-chave:** Difusão de CO<sub>2</sub>. Sequestro de carbono. Materiais a base de cimento. Estocagem de carbono.

PEDRY, Gabriel Rossetto. **Avaliação do efeito da proteção superficial (pintura) na captura de CO<sub>2</sub> devido à carbonatação de argamassas de revestimento**. 2020. 71 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2020.

## ABSTRACT

The construction industry generates environmental impacts due to high consumption of natural resources, waste generation or polluting gases production, which contributes to greenhouse effect intensification. Thus, the carbonation phenomenon of cementitious materials has been studied as a way of capture and store atmospheric CO<sub>2</sub> to minimize environmental problems caused by this gas, in order to mitigate emissions caused by cement industry and aggregates processing. However, studies already developed disregard surface protections effect, which is the real situation of most mortar coatings in materials carbon dioxide diffusion. In this context, the objective of this study is evaluate the influence of “paint type” surface protection on CO<sub>2</sub> capture due to carbonation in coating mortars. For that, prismatic mortar samples were produced in 1: 1: 6 mix, varying the applied painting system, which were compared with reference samples (without surface protection). In samples with superficial protection, four different premium type paints (PVA latex, matte acrylic, satin acrylic and semi-gloss acrylic) were used, all in neutral tones. The samples were submitted to three different natural exposure environments (indoor, outdoor protected and unprotected outdoor) and also submitted to accelerated carbonation at temperature of 23 °C, humidity of 60% and CO<sub>2</sub> concentration of 5%. Carbonation depth results were collected at different ages of natural exposure (64, 100, 190 days) and accelerated exposure (0, 10 days). The results showed that “painting type” surface protection considerably reduced CO<sub>2</sub> diffusion velocity and, consequently, the CO<sub>2</sub> capture rate by carbonation reaction. It was also verified that carbonation depth was greater in samples without surface protection, followed by samples with PVA and acrylic latex paint, and for external environment protected from rain, at 190 days of natural exposure to CO<sub>2</sub>, the samples with acrylic paint showed an average reduction of 41.5% and 73.2% in the carbonation depth, when compared with PVA latex paint and samples without surface protection, respectively. It was also observed that samples which received surface protection of acrylic type presented carbonation front very similar between the different types of these paints (matte, satin and semi-gloss), demonstrating the high protective potential of acrylic paints. Therefore, with results obtained, it appears that studies on topic of CO<sub>2</sub> capture throughout the life cycle of cement-based materials must consider the effect of surface protection, since these considerably reduce the diffusion of CO<sub>2</sub> into materials, compromising the propagation velocity of carbonation front.

**Palavras-chave:** CO<sub>2</sub> diffusion. Carbon sequestration. Cement-based materials. Carbon storage.

PEDRY, Gabriel Rossetto. **Avaliação do efeito da proteção superficial (pintura) na captura de CO<sub>2</sub> devido à carbonatação de argamassas de revestimento**. 2020. 71 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2020.

## RESUMEN

La industria de la construcción causa impactos ambientales debido al alto consumo de recursos naturales, generación de residuos o producción de gases contaminantes, que contribuyen a la intensificación del efecto invernadero. Por lo cual, se ha estudiado el fenómeno de la carbonatación de materiales cementosos como una forma de captar y almacenar CO<sub>2</sub> atmosférico para minimizar los problemas ambientales ocasionados por este gas, con la finalidad de mitigar las emisiones generadas por la industria cementera y el beneficiamiento de agregados. Sin embargo, estudios que han sido desarrollados desconsideran el efecto de protección de superficies, que es la situación real de la mayoría de los revestimientos de mortero, en la difusión de dióxido de carbono en los materiales. En este contexto, el objetivo de este trabajo es evaluar la influencia de la protección superficial del tipo de pintura inmobiliaria en la captura de CO<sub>2</sub> debido a la carbonatación en morteros de revestimiento. Para esto se han realizados probetas de mortero prismáticas con dosaje de 1:1:6, variando el sistema de pintura aplicado, que se compararon con muestras de referencia (sin protección de superficie). En las muestras con protección superficial se utilizaron cuatro diferentes tipos de pinturas premium (látex PVA, acrílica esmerilado, acrílica satinado y acrílica de acabado semi-brillante), todas en tonos neutros. Las muestras han sido aplicadas en tres ambientes de exposición natural diferentes (ambiente interior, ambiente exterior protegido y ambiente exterior desprotegido) y también aplicadas a carbonatación acelerada a una temperatura de 23 °C, humedad de 60% y concentración de CO<sub>2</sub> del 5%. Los resultados de la profundidad de carbonatación han sido colectados en diferentes edades de exposición al CO<sub>2</sub> natural (64, 100 y 190 días) y acelerada (0 y 10 días). Los resultados mostraron que la protección superficial del tipo de pintura inmobiliaria redujo considerablemente la velocidad de difusión del CO<sub>2</sub> y, en consecuencia, la tasa de captura de CO<sub>2</sub> debido a la reacción de carbonatación. Además, se ha verificado que la profundidad de carbonatación ha sido mayor en muestras sin protección superficial, seguida de muestras con pintura de tipo látex PVA y acrílica, por otra parte, para el ambiente externo protegido de la lluvia, a los 190 días de exposición natural al CO<sub>2</sub>, las muestras con pintura acrílica mostraron una reducción promedio de 41,5% y 73,2% en la profundidad de carbonatación, al ser comparadas con pintura de látex PVA y sin protección superficial, respectivamente. Al mismo tiempo, se observó que las muestras que recibieron protección superficial del tipo acrílica presentaron similitud en la carbonatación entre los diferentes tipos de acabado (esmerilado, satinado y semi-brillante), demostrando el alto potencial protector de las pinturas acrílicas. Por tanto, con los resultados obtenidos, se constata que los estudios acerca de captura de CO<sub>2</sub> a lo largo del ciclo de vida de los materiales cementosos deben considerar el efecto de protección superficial, una vez que reducen considerablemente la difusión de CO<sub>2</sub> para el interior de los materiales comprometiendo la velocidad de propagación ante la carbonatación.

**Palabras clave:** Difusión de CO<sub>2</sub>. Almacenamiento de carbono. Materiales a base de cemento. Almacenamiento de carbono.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Ilustração dos diferentes ambientes de exposição de argamassa de revestimento em uma edificação.....	19
Figura 2: Coloração do indicador de fenolftaleína conforme o pH .....	22
Figura 3: Fluxograma ilustrativo do programa experimental .....	24
Figura 4: Determinação da massa específica (A) e unitária (B) da areia .....	25
Figura 5: Equipamentos Cilas Particle Size Analyzer 1190.....	26
Figura 6: Curva granulométrica do agregado natural .....	26
Figura 7: Granulometria a laser da cal .....	27
Figura 8: Análise TG (A) e DTG (B) da cal .....	28
Figura 9: Granulometria a laser do cimento .....	29
Figura 10: Análise TG (A) e DTG (B) do cimento .....	29
Figura 11: Análise TG (A) e DTG (B) dos diferentes tipos de tinta .....	31
Figura 12: Equipamento usado para o ensaio de retenção de água.....	35
Figura 13: Ensaio do índice de consistência .....	36
Figura 14: Ensaio de resistência à tração na flexão .....	37
Figura 15: Ensaio de resistência à compressão axial.....	38
Figura 16: Equipamento para ensaio de módulo de elasticidade dinâmico .....	39
Figura 17: Impermeabilidade frente ao CO <sub>2</sub> gerada pela aplicação de parafina conforme o número de demãos .....	40
Figura 18: Derretimento em Banho Maria (A) e aplicação nos corpos de prova (B) .	40
Figura 19: Ambiente natural de exposição das amostras: externo protegido e desprotegido (A) ambiente interno (B) e ambiente acelerado (C).....	41
Figura 20: Corpo de prova com proteção superficial .....	42
Figura 21: Linha do tempo das atividades laboratoriais realizadas.....	42
Figura 22: Processo de fratura dos corpos de prova .....	43
Figura 23: Processo de leitura da profundidade de carbonatação.....	44
Figura 24: Amostra íntegra (A) e fração de amostra para análise térmica TG/DTG (B) .....	46
Figura 25: Resultados de profundidade de carbonatação .....	52
Figura 26: Profundidade de carbonatação para os corpos de prova de referência (sem proteção superficial) x ambiente de exposição .....	52
Figura 27: Desplacamento da parafina (A) e proteção com película de filme PVC(B) .....	55
Figura 28: Carbonatação em amostra com (A) e sem proteção de parafina (B) .....	56
Figura 29: Resultados de profundidade de carbonatação .....	57
Figura 30: Estimativa da captura média de CO <sub>2</sub> aos 64 e 190 dias (e=37,5mm) .....	59
Figura 31: Estimativa da captura média de CO <sub>2</sub> aos 64 e 190 dias (e=20mm).....	60
Figura 32: Curvas TG (A) e DTG (B) da argamassa referência (1:1:6) submetida à carbonatação natural .....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características do agregado natural .....	26
Tabela 2: Características da cal .....	27
Tabela 3: Características do cimento .....	29
Tabela 4: Propriedades e recomendações das tintas empregadas conforme indicações do fabricante .....	30
Tabela 5: Propriedades e recomendações da massa corrida .....	32
Tabela 6: Consumo de materiais para 1m <sup>3</sup> resultados de caracterização da argamassa .....	32
Tabela 7: Emissões referente a produção do cimento .....	47
Tabela 8: Emissões referentes a produção de cal ( $E_{cal}$ ) .....	48
Tabela 9: Porcentagem de óxido de cálcio e de magnésio totalmente carbonatável presente na cal e no cimento .....	49
Tabela 10: Profundidade de carbonatação nas amostras em ambiente natural de exposição.....	51
Tabela 11: Profundidade de carbonatação das diferentes proteções superficiais aos 64 e 190 dias de exposição ao CO <sub>2</sub> em ambiente natural.....	53
Tabela 12: Profundidade de carbonatação das proteções superficiais acrílicas aos 64 dias .....	54
Tabela 13: Profundidade de carbonatação aos 28 e 64 dias para amostras de referência e com proteção superficial respectivamente .....	55
Tabela 14: Profundidade de carbonatação em ambiente acelerado .....	56
Tabela 15: Estimativa da captura de CO <sub>2</sub> em ambientes naturais (KgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ) e=37,5mm.....	58
Tabela 16: Estimativa da captura de CO <sub>2</sub> em ambientes naturais (KgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ) e=20mm.....	59
Tabela 17: Potenciais de captura de CO <sub>2</sub> das argamassas avaliadas .....	61
Tabela 18: Emissões de CO <sub>2</sub> devido a produção de 1 tonelada de cimento CP IV-32 RS.....	62
Tabela 19: Emissões de CO <sub>2</sub> devido a produção da argamassa .....	62
Tabela 20: Balanço de emissões para as amostras expostas em ambientes naturais .....	63

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	13
1.1	OBJETIVOS.....	14
1.2	LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	15
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	15
2.	CAPTURA DE CO <sub>2</sub> POR CARBONATAÇÃO.....	17
2.1	FATORES QUE INFLUENCIAM NA CARBONATAÇÃO.....	18
2.1.1	Condições ambientais.....	18
2.1.2	Ambiente de exposição.....	19
2.1.3	Composição química da matriz cimentícia.....	20
2.1.4	Área de exposição e proteção superficial.....	20
2.2	MEDIÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO.....	21
3.	METODOLOGIA.....	23
3.1	DEFINIÇÃO DO PROJETO EXPERIMENTAL.....	23
3.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	25
3.2.1	Agregado natural.....	25
3.2.2	Cal.....	27
3.2.3	Cimento Portland.....	28
3.2.4	Materiais de pintura.....	30
3.3	EXECUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS.....	32
3.3.1	Ensaio no estado fresco.....	33
3.3.2	Ensaio no estado endurecido.....	36
3.4	PREPARO DE AMOSTRAS.....	39
3.5	ENSAIOS DE CARBONATAÇÃO.....	42
3.5.1	Carbonatação em ambientes naturais.....	43
3.5.2	Carbonatação em ambiente controlado.....	44
3.6	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TG/DTA).....	45
3.7	EMISSÕES E CAPTURA DE CO <sub>2</sub> .....	46
3.7.1	Emissões de CO <sub>2</sub> .....	46
3.7.2	Captura de CO <sub>2</sub> devido à carbonatação.....	49
3.7.3	Balço de emissões.....	50
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	51
4.1	PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO.....	51
4.1.1	Exposição em ambiente natural.....	51
4.1.2	Exposição em câmara acelerada.....	56
4.2	ESTIMATIVA DA CAPTURA DE CO <sub>2</sub> .....	58

4.2.1	Por meio da profundidade de carbonatação .....	58
4.2.2	Por análise termogravimétrica (TG) e termogravimétrica derivada (DTG) .....	60
4.3	EMISSÕES DE CO <sub>2</sub> .....	62
4.4	BALANÇO DE EMISSÕES DE CO <sub>2</sub> .....	63
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	64
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66

## 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

O aquecimento global tem sido cada vez mais estudado e debatido, principalmente devido aos eventos climáticos extremos que podem ocasionar, enchentes, ciclones, secas, dentre outros. A ocorrência desses eventos em locais onde antes não eram frequentes, exigirá uma readaptação dos modelos de engenharia locais (JOHN, 2017).

Um dos fenômenos que contribui para o aquecimento global é o efeito estufa. Em condições naturais esse fenômeno é essencial para vida por manter o planeta em boas condições climáticas, uma vez que os gases atmosféricos retêm parte da energia solar que seria irradiada de volta ao espaço. Este fenômeno tem se intensificado nas últimas décadas graças ao aumento da concentração desses gases de efeito estufa, dentre os quais se destaca o CO<sub>2</sub>, o qual possui um papel fundamental neste processo por ser um gás não condensável, podendo permanecer centenas de anos na atmosfera terrestre (JUNGES; SANTOS; MASSONI, 2018). É nesse sentido que a intensificação do efeito estufa ocasiona um aumento da temperatura média da atmosfera terrestre, causando o nominado aquecimento global.

A indústria da construção civil contribui consideravelmente nas emissões de gases do efeito estufa, principalmente devido à produção de suas matérias-primas, seja pela queima de combustíveis ou pela decomposição das rochas carbonáticas para produção de cimento, cal e aço (JOHN, 2017). Destaque principal é dado ao cimento que é a matéria-prima mais utilizada pela indústria, sendo a base de diversos produtos de matriz cimentícia, como o concreto e as argamassas. Somente no ano de 2014, no Brasil foi consumida a quantidade de 72.021.814 toneladas de cimento (SNIC, 2019b).

Tendo em vista os problemas causados pelo CO<sub>2</sub>, atualmente tem-se estudado diversas formas de captura e estocagem deste gás (GASPAR, 2014). Dentre essas formas, destaca-se a carbonatação dos materiais derivados do cimento, que pode ser definida como um processo físico-químico onde o CO<sub>2</sub> atmosférico difunde pelos poros dos materiais de origem cimentícia, reagindo com a água e com os produtos carbonatáveis alcalinos presentes no interior destes materiais (GALAN; ANDRADE; CASTELLOTE, 2012; POSSAN *et al.*, 2017; XI *et al.*, 2016), formando sais carbonáticos.

A carbonatação é amplamente estudada em concretos, devido ao processo de corrosão nas armaduras. Em argamassas, que geralmente possuem aplicações sem funções estruturais, esse fenômeno não foi amplamente estudado (FURCAS *et al.*, 2014). Porém, com o surgimento da consideração de captura de CO<sub>2</sub> em materiais à base de

cimento como medida mitigadora das emissões de CO<sub>2</sub> oriundas da indústria da construção civil, esse tema começou a ter maior relevância e ser amplamente estudado (ANDRADE, C.; SANJUÁN, 2018; CULTRONE; SEBASTIÁN; HUERTAS, 2005; FURCAS *et al.*, 2014; MAZURANA, 2019; XI *et al.*, 2016).

XI *et al.* (2016) compararam a capacidade de reabsorção das emissões de CO<sub>2</sub> das argamassas e dos concretos sem a presença de proteção superficial. Os resultados mostram que no concreto cerca de 16,1% das emissões são reabsorvidas durante a vida útil, 1,4% durante a demolição e mais 0,1 % é reabsorvida durante o uso secundário dos materiais, totalizando uma absorção de 17,6% das emissões para sua produção. Já no caso das argamassas, 97,9% das emissões são reabsorvidas durante a vida útil e os outros 2,1% são reabsorvidos durante o estágio da demolição, totalizando 100% de reabsorção das emissões liberadas em sua produção.

Analisando estes dados, pode-se dizer que os materiais de origem cimentícia, em especial, as argamassas podem ser um sumidouro representativo do CO<sub>2</sub> atmosférico. Porém, como a grande maioria dos materiais de origem cimentícia aplicados em estruturas reais possuem proteção superficial, estes valores podem variar, pois se suspeita que a proteção superficial pode ser uma barreira para a permeabilidade de CO<sub>2</sub> para o interior do material. Esta barreira por sua vez, pode evitar ou reduzir o fluxo de CO<sub>2</sub> para o interior da matriz a base de cimento, dependendo da sua espessura e composição química.

Assim, neste estudo, analisou-se a influência da proteção superficial do tipo tinta na captura de CO<sub>2</sub> em argamassas de revestimento, tendo em vista que a grande maioria das obras civis brasileiras utilizam argamassas, e essas, em sua grande maioria, estão revestidas com pintura imobiliária para seu acabamento final.

## 1.1 OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivo geral avaliar a influência da proteção superficial do tipo pintura imobiliária na captura de CO<sub>2</sub> devido à carbonatação de argamassas de revestimento.

Em decorrência, tem-se os seguintes objetivos específicos:

- a) Analisar a influência de diferentes tipos (PVA e acrílica) e acabamentos de

tintas imobiliárias<sup>1</sup> na captura de CO<sub>2</sub> por carbonatação, em argamassas de revestimento;

- b) Avaliar a influência do ambiente de exposição natural na captura de CO<sub>2</sub> de argamassas de revestimento quando protegidas superficialmente com pintura imobiliária;
- c) Avaliar a difusão de CO<sub>2</sub> em argamassas de revestimento com e sem proteção superficial em ambiente natural e acelerado;
- d) Avaliar o potencial de captura de CO<sub>2</sub> por análise termogravimétrica;
- e) Conduzir o balanço de emissões do CO<sub>2</sub> considerando o sistema de pintura.

## 1.2 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Para a realização deste estudo foram produzidas apenas argamassas mistas de cimento e cal, no traço 1:1:6. Optou-se por escolher um único traço de argamassa, pois como o objetivo deste trabalho é avaliar a influência da proteção superficial do tipo pintura imobiliária na captura de CO<sub>2</sub> devido à carbonatação de argamassas de revestimento, não há a necessidade de variar o tipo de argamassa e sim tipos de tintas, de modo a avaliar a influência do sistema de pintura.

No trabalho, não se avaliou a influência da cor da tinta imobiliária, sendo empregada apenas uma única tonalidade classificada pelos fornecedores como neutra ou *off-white*.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 1 apresentou-se uma breve introdução acerca do tema de estudo, os objetivos pretendidos e as justificativas para a realização do trabalho. Além disso, apresentou-se algumas limitações aplicadas à pesquisa.

No capítulo 2 será apresentado um embasamento teórico referente ao fenômeno da carbonatação em materiais cimentícios, os fatores que influenciam na carbonatação e alguns métodos para mensurar a profundidade de carbonatação nos materiais a base de cimento.

---

<sup>1</sup> Conforme NBR 11702 (ABNT, 2019), NBR 15079-1 (ABNT, 2019) e NBR 15079-2 (ABNT, 2019).

O capítulo 3 apresentará toda a metodologia aplicada durante o trabalho, abrangendo temas como definição do procedimento experimental, caracterização dos materiais, execução e caracterização das argamassas, preparo das amostras, ensaio de carbonatação e definição da captura de CO<sub>2</sub>.

Já no capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos no estudo e suas respectivas discussões. No capítulo 5 serão apresentadas as considerações finais a respeito do trabalho e as sugestões para futuros trabalhos. Finalmente no capítulo 6 serão apresentadas as referências bibliográficas utilizadas neste trabalho.

## 2. CAPTURA DE CO<sub>2</sub> POR CARBONATAÇÃO

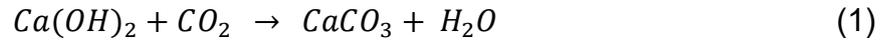
O efeito estufa tem sido bastante discutido na atualidade devido ao aumento da emissão de gases poluentes como o CO<sub>2</sub>. O setor da construção civil possui uma contribuição considerável das emissões, tendo em vista que somente a indústria cimenteira contribui com de cerca de 7% das emissões globais de CO<sub>2</sub> (IPCC, 2007). Globalmente são liberados cerca de 825 Kg de CO<sub>2</sub> por tonelada de clínquer produzido (ANDRADE; SANJUÁN, 2018). Estima-se que entre 30% e 40% das emissões de CO<sub>2</sub> para a produção do cimento são devido à queima de combustíveis fósseis, entre 60% e 70% ocorrem pela calcinação da rocha calcária e outros 5% ocorrem de forma indireta pelo consumo elétrico (SNIC, 2019).

A indústria cimenteira do Brasil é uma das que apresentam a menor emissão de CO<sub>2</sub> por tonelada de cimento produzido a nível mundial, emitindo para a atmosfera, em média, cerca de 570 Kg de CO<sub>2</sub> por tonelada de cimento produzido (CSI, 2014). Isso ocorre por uma série de características da indústria brasileira, tais como: possuir um moderno parque industrial com elevada eficiência térmica e elétrica, uso de combustíveis alternativos e uso de adições ao clínquer (SNIC, 2019). Contudo, ao quantificar as emissões de CO<sub>2</sub> por tonelada de clínquer produzido, constata-se que a média brasileira é superior à média internacional. Conforme indica o GNR Project (WBCSD, 2016) as emissões brasileiras em 2016 foram da ordem de 866kg de CO<sub>2</sub> por tonelada de clínquer produzido, enquanto que a média mundial foi de 842kg de CO<sub>2</sub> por tonelada de clínquer produzido.

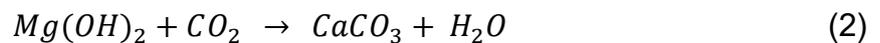
Diversos autores (ANDRADE; SANJUÁN, 2018; PADE; GUIMARAES, 2007; WERLE; KAZMIERCZAK; KULAKOWSKI, 2011; XI *et al.*, 2016) têm estudado a potencialidade dos materiais derivados do cimento capturarem CO<sub>2</sub> por meio de um fenômeno denominado carbonatação. XI *et al.* (2016) estimam que, entre os anos de 1930 e 2013, 4,5 Giga Tonelas de CO<sub>2</sub> (GTC) foram sequestradas da atmosfera devido à carbonatação de materiais cimentícios, representando cerca de 43% das emissões de descarbonatação associada à produção de cimento nesse período, ou seja, sem considerar as emissões decorrentes da queima de combustíveis para este processo.

A carbonatação pode ser definida como um processo físico-químico que inicia na superfície dos materiais cimentícios e avança com o tempo para o seu interior. Neste processo o CO<sub>2</sub> penetra pelos poros dos materiais, onde na presença de água reage com os componentes alcalinos da pasta, principalmente hidróxido de cálcio

(Ca(OH)<sub>2</sub>) gerando assim carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) e água (H<sub>2</sub>O) como produtos (WERLE; KAZMIERCZAK; KULAKOWSKI, 2011), conforme a Equação 1.



No caso das argamassas mistas ou de cal, dependendo do tipo de rocha (cálcica, dolomítica ou magnesiana) usada para a confecção da cal, além do hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) existe também o hidróxido de magnésio (Mg(OH)<sub>2</sub>) que reage com o CO<sub>2</sub> gerando carbonato de magnésio (MgCO<sub>3</sub>) e água como produtos (COSTA; PACHECO, 2018), conforme a Equação 2.



## 2.1 FATORES QUE INFLUENCIAM NA CARBONATAÇÃO

Existem diversos fatores que influenciam na captura de CO<sub>2</sub> e, conseqüentemente, na carbonatação dos materiais cimentícios. Dentre os principais têm-se as condições ambientais, o ambiente de exposição, a composição química da matriz cimentícia, a área de exposição e a proteção superficial.

### 2.1.1 Condições ambientais

A carbonatação é fortemente influenciada pela concentração de CO<sub>2</sub>, pela umidade do ambiente de exposição e pela temperatura do ambiente. Quanto maior a concentração de CO<sub>2</sub> do ambiente, maior será a velocidade de carbonatação (WERLE; KAZMIERCZAK; KULAKOWSKI, 2011).

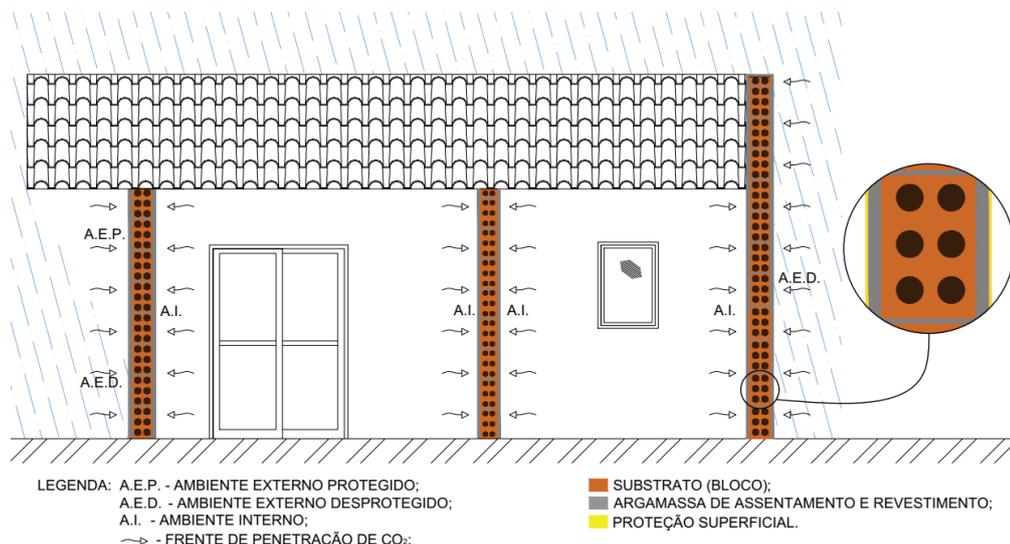
Já a umidade do ambiente está diretamente relacionada com o grau de saturação dos poros dos materiais, que é um parâmetro muito importante, pois se os poros estiverem totalmente saturados o CO<sub>2</sub> praticamente não consegue penetrar e se a matriz estiver totalmente seca o CO<sub>2</sub> não irá reagir com o Ca(OH)<sub>2</sub> e não haverá a carbonatação (KULAKOWSKI, 2002). Alguns autores estudaram a relação entre a umidade e a velocidade de carbonatação, para Possan *et al.* (2017) as maiores velocidades de carbonatação ocorrem para umidades próximas a 75%, já para Thiery

*et al.* (2007) e para Lo e Lee (2002) as maiores velocidades ocorrem para umidades entre 50 e 70% e para Bary e Sellier (2004) ocorre em umidades entre 40 e 80%.

### 2.1.2 Ambiente de exposição

O ambiente de exposição e seu microclima tem um papel fundamental na taxa de carbonatação e por consequência na captura de CO<sub>2</sub>, uma vez que ao variar o ambiente são variadas também as condições ambientais como concentração de CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade relativa. Em seus estudos Ortolan, Squiavon e Andrade (2015), Antonio (2018) e Mazurana (2019) indicam que a carbonatação é maior em ambientes internos, seguido por ambientes externos protegidos da chuva e ambientes externos desprotegidos da chuva. A maior taxa de carbonatação em ambientes internos pode ser explicada, pois nestes ambientes a concentração de CO<sub>2</sub> tende a ser maior e geralmente a amostra possui uma umidade interna constante. Já nos ambientes externos a concentração de CO<sub>2</sub> é menor e as amostras estão mais suscetíveis a ciclos de molhagem e secagem, fazendo assim com que nos períodos mais úmidos a entrada de CO<sub>2</sub> fique prejudicada (ORTOLAN; SQUIAVON; ANDRADE, 2015). A Figura 1 ilustra os três ambientes de exposição que uma argamassa de revestimento pode ser exposta quando aplicada em uma edificação.

Figura 1: Ilustração dos diferentes ambientes de exposição de argamassa de revestimento em uma edificação



### 2.1.3 Composição química da matriz cimentícia

A composição química da matriz cimentícia afeta a quantidade de álcalis disponíveis para reagir com o CO<sub>2</sub> durante o processo da carbonatação. Esta quantidade de álcalis disponíveis nos materiais cimentícios é definida como reserva alcalina. Uma maior reserva alcalina nos materiais diminuirá a velocidade e conseqüentemente a profundidade de carbonatação, uma vez que para que a frente de carbonatação avance o CO<sub>2</sub> precisa reagir com uma maior quantidade de materiais (BAUTISTA; VELASCO; TORRES-CARRASCO, 2019; HELENE, 1993; KULAKOWSKI, 2002; MEDEIROS *et al.*, 2017; ZORNOZA *et al.*, 2009).

Em concretos, o composto carbonatável principal é o hidróxido de cálcio Ca(OH)<sub>2</sub>, sendo encontrado também em quantidades muito baixas o hidróxido de potássio (KOH) e o hidróxido de sódio (NaOH) (CUNHA; HELENE, 2001). Já em argamassas, devido ao uso corriqueiro da cal hidratada na mistura, podem existir dois compostos carbonatáveis principais; o hidróxido de cálcio Ca(OH)<sub>2</sub> e o hidróxido de magnésio Mg(OH)<sub>2</sub>, o que pode indicar que a velocidade de carbonatação torne-se mais lenta em argamassas a base de cal (COSTA; PACHECO, 2018). De fato, Mazurana (2019) constatou que em argamassas a base de cal, a velocidade de carbonatação é menor quando comparada as argamassas a base de cimento. Contudo, o teor de CO<sub>2</sub> fixado é maior devido a maior reserva alcalina da matriz.

### 2.1.4 Área de exposição e proteção superficial

A relação entre a área superficial e o volume total do elemento é um importante parâmetro para avaliar a capacidade de absorção de CO<sub>2</sub> por carbonatação, pois conforme indicam Andrade e Sanjuán (2018), quanto maior a superfície em relação ao volume, uma maior quantidade de material estará exposta ao mesmo tempo proporcionando assim uma maior absorção de CO<sub>2</sub>. Por esta razão, alguns autores (PADE; GUIMARAES, 2007; POSSAN *et al.*, 2017) defendem que a absorção de CO<sub>2</sub> é elevada quando ocorre o processo de demolição da estrutura, uma vez que a área superficial é elevada substancialmente.

Lo *et al.* (2016) analisaram a influência da proteção superficial na absorção de CO<sub>2</sub> em concretos, empregando o método de ensaio acelerado. Foram utilizados oito

tipos de tintas geralmente empregadas em edifícios, sendo quatro tintas interiores à base de emulsões convencionais e quatro exteriores sintéticas. Os resultados mostraram que aos 28 dias a redução na carbonatação foi de 56% para revestimentos com pinturas interiores e 71% para revestimentos com pinturas exteriores para concretos com classe de resistência C25. Já para concretos da classe C35 aos 28 dias a redução foi de 57% para revestimentos com pinturas interiores e 63% para revestimentos com pinturas exteriores. Estes resultados indicam que a proteção superficial em tinta pode representar uma barreira para a ocorrência da carbonatação, e conseqüentemente para a captura de CO<sub>2</sub>. Em relação à difusão de CO<sub>2</sub> em argamassas de revestimento com proteção superficial não foram encontrados estudos na literatura, indicando uma possível lacuna do conhecimento.

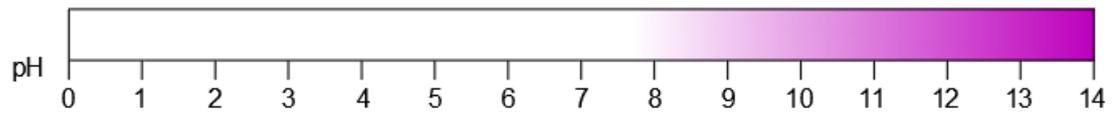
## 2.2 MEDIÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

Para determinar a profundidade e o grau de carbonatação em materiais cimentícios existem diversos métodos que podem ser adotados, dentre os quais segundo Despotou *et al.* (2016) destacam-se:

- Difração de raio-X;
- Métodos termogravimétrico e gravimétrico;
- Espectroscopia infravermelho com transformada de Fourier (FTIR);
- Titulação química;
- Indicadores químicos de pH;

Neste trabalho, o método adotado foi o de indicadores químicos de pH, devido à sua grande simplicidade de execução, baixo custo agregado e boa precisão. Os indicadores químicos de pH são substâncias que mudam de cor em função do pH do elemento em que estão aplicados. O indicador adotado nessa pesquisa foi o de fenolftaleína (Figura 2), o qual conforme destacado por (CHINCHÓN-PAYÁ; ANDRADE; CHINCHÓN, 2016) é amplamente empregado para medir a profundidade da frente de carbonatação em argamassas e concretos, por meio de sua pulverização sobre a superfície fraturada do material em análise.

Figura 2: Coloração do indicador de fenolftaleína conforme o pH



Este indicador se apresenta praticamente incolor quando em contato com superfícies que apresentam valores de pH mais baixos ( $\text{pH} < 8,5$ ) e apresentam uma coloração roxa ou magenta para valores maiores de pH ( $\text{pH} > 10$ ), sendo que, quanto maior o pH, mais intensa será sua tonalidade.

### 3. METODOLOGIA

Neste trabalho estudou-se a influência da proteção superficial do tipo pintura imobiliária na captura de CO<sub>2</sub>, devido à carbonatação em argamassas de revestimento. A metodologia foi distribuída em 6 etapas principais:

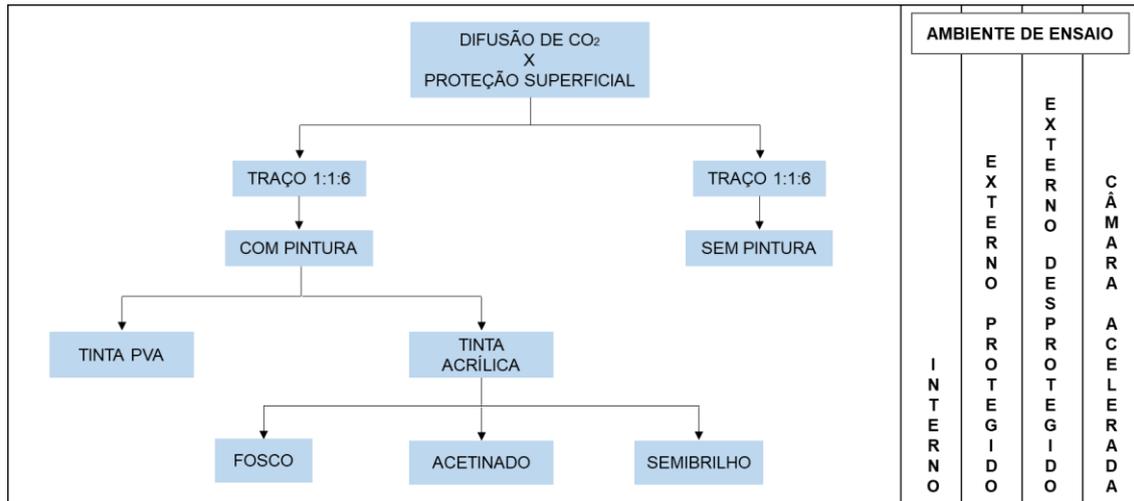
1. Definição do projeto experimental;
2. Caracterização dos materiais;
3. Execução e caracterização das argamassas;
4. Preparo das amostras;
5. Ensaio de carbonatação;
6. Emissões e captura de CO<sub>2</sub>.

#### 3.1 DEFINIÇÃO DO PROJETO EXPERIMENTAL

Para analisar a influência da proteção superficial (pintura) em revestimentos de argamassas, foram produzidos corpos de provas prismáticos com dimensões de 75mm x 95mm x 150mm no traço 1:1:6 (cimento: cal: areia). Foram testadas variações com e sem proteção superficial do tipo pintura, com o objetivo de possuir amostras de controle para comparar os resultados obtidos.

Utilizou-se o sistema convencional de pintura, ou seja, com a aplicação de selador, massa corrida e quatro variações de tinta premium (Tintas acrílicas fosca, acetinada e semibrilho e tinta látex PVA), visando assim, avaliar a influência destes quatro tipos de tinta na profundidade de carbonatação. Cada variação final obtida foi exposta em 3 diferentes ambientes de exposição natural e em câmara acelerada. A Figura 3 apresenta um fluxograma ilustrativo do programa experimental.

Figura 3: Fluxograma ilustrativo do programa experimental



O número de amostras a serem expostas em cada ambiente, foi definido por meio de análise estatística, levando em consideração um desvio padrão ( $\sigma$ ), um erro amostral máximo ( $\varepsilon = 0,3mm$ ) e um grau de confiança desejado ( $z = 1,96$ ), como pode-se observar na Equação 3.

$$n = \frac{\sigma^2 * z^2}{\varepsilon^2} \quad (3)$$

Para a determinação do desvio padrão a ser adotado, foram utilizados como base os resultados de profundidade de carbonatação ao longo do tempo obtidos por Antonio (2018) e Mazurana (2019). Sendo assim, definiu-se que três amostras de cada variação executada seriam expostas em três ambientes de exposição diferentes (ambiente interno, externo protegido e externo desprotegido) e apenas duas amostras de cada variação na câmara de carbonatação, com o objetivo de analisar o comportamento conjunto entre a proteção superficial e o ambiente de exposição. Cabe ressaltar que a câmara de carbonatação possui uma variabilidade menor nos resultados, por ser um ambiente com todas as variáveis controladas (temperatura, umidade e concentração de  $CO_2$ ), de modo que foi possível reduzir o número de amostras expostas.

Portanto, foram executados um total de 55 corpos de prova para estudo da difusão do  $CO_2$ , sendo:

- A. Onze corpos de prova sem pintura;
- B. Onze corpos de prova revestidos com duas demãos de tinta PVA;

- C. Onze corpos de prova revestidos com duas demãos de tinta acrílica fosca;
- D. Onze corpos de prova revestidos com duas demãos de tinta acrílica acetinada;
- E. Onze corpos de prova revestidos com duas demãos de tinta acrílica semibrilho.

Para o controle tecnológico foram produzidos corpos de prova prismáticos de 40x40x160 mm para avaliação da resistência à tração na flexão e à compressão e módulo de elasticidade dinâmico. No estado fresco, fez-se a determinação da massa específica, índice de consistência e retenção de água.

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais usados foram obtidos na cidade de Foz do Iguaçu, PR e a caracterização deles ocorreu conforme as especificações previstas em normas técnicas e procedimentos encontrados na bibliografia, conforme relatado a seguir.

#### 3.2.1 Agregado natural

Para a moldagem das argamassas foi utilizado o agregado natural do Rio Paraná. Foram realizados ensaios de determinação da massa unitária conforme a NBR NM 45 (ABNT, 2006) e a determinação da massa específica ocorreu por meio do ensaio do picnômetro, conforme especificado por Rocha e Xavier (2000) e demonstrado na Figura 4 (A e B).

Figura 4: Determinação da massa específica (A) e unitária (B) da areia



Para o agregado natural foi realizado o ensaio de granulometria a laser, para o

qual foi utilizado o equipamento Cilas Particle Size Analyzer 1190 do Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais (LADEMA) da UNILA, conforme pode-se observar na Figura 5. A curva granulométrica obtida através da granulometria a laser está apresentada na Figura 6 e os resultados na Tabela 1.

Figura 5: Equipamentos Cilas Particle Size Analyzer 1190



Figura 6: Curva granulométrica do agregado natural

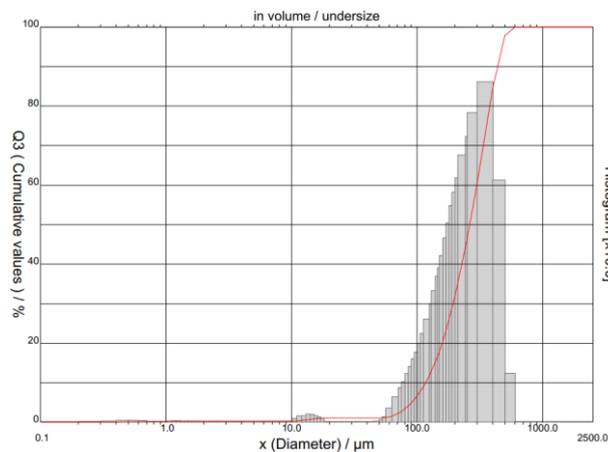


Tabela 1: Características do agregado natural

Característica	Valor
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,521
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,65
Módulo de finura (%)	1,34
Diâmetro d50 (μm)	273,11
Diâmetro d90 (μm)	443,77

### 3.2.2 Cal

A cal utilizada neste trabalho foi a cal hidratada CH III, oriunda da região metropolitana de Curitiba, PR, e os ensaios de caracterização deste material foram os seguintes:

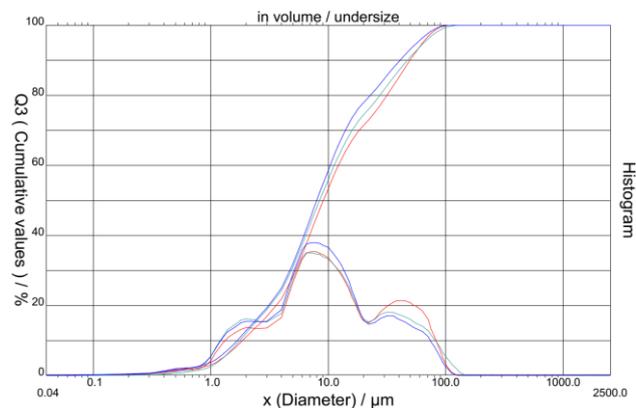
- Análise termogravimétrica (TG/DTG) – conforme ASTM E 2550 (ASTM, 2017);
- Granulometria a laser – conforme ISO 13320 (ISO, 2009);
- Massa unitária - conforme o método proposto por Mattana (2013);
- Massa específica – conforme a NBR 16605 (ABNT, 2017).

Não existem normas brasileiras que regulamentam a determinação da massa específica e unitária da cal. Por isso, a determinação da massa específica ocorreu por meio do procedimento empregado para o Cimento Portland e outros materiais pulverulentos, conforme a NBR 16605 (ABNT, 2017). Já para a determinação da massa unitária, utilizou-se o procedimento estabelecido por Mattana (2013), no qual se utiliza um recipiente cilíndrico de 400 cm<sup>3</sup>, um funil com 1 cm de diâmetro de abertura e um suporte com regulagem de altura de forma a possibilitar a queda do material a uma altura de 8 cm entre a saída do funil e a borda do recipiente. Os resultados obtidos de massa específica, massa unitária e área superficial BET estão presentes na Tabela 2 e os resultados obtidos na granulometria a laser estão apresentados na Figura 7.

Tabela 2: Características da cal

Cal hidratada CH III	
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	0,60
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,32
Diâmetro d50 (µm)	8,52
Diâmetro d90 (µm)	45,96

Figura 7: Granulometria a laser da cal

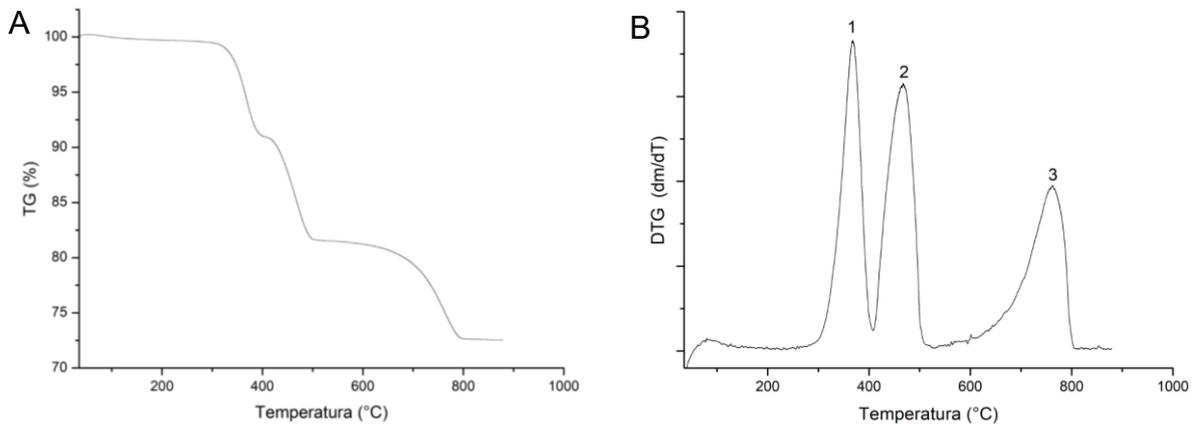


Os resultados da granulometria a laser da cal, mostram que ela possui partículas com diâmetro médio inferiores a 8,47 µm e uma curva de frequência

trimodal (3 picos).

A análise termogravimétrica ocorreu no Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais (LADEMA) da UNILA, no equipamento da marca Percking Elmer, modelo STA 8000. Os resultados podem ser observados na Figura 8 (A e B).

Figura 8: Análise TG (A) e DTG (B) da cal



Analisando a Figura 8 observa-se uma massa residual de aproximadamente 72% após a análise térmica. Essa perda de massa ocorreu em 3 momentos distintos, sendo o primeiro próximo a 350°C (ponto 1) que corresponde a decomposição do hidróxido de magnésio ( $Mg(OH)_2$ ), o segundo momento ocorre próximo aos 430°C (ponto 2) que corresponde a decomposição do hidróxido de cálcio ( $Ca(OH)_2$ ) e o terceiro momento ocorreu em temperaturas próximas a 750°C devido a decomposição de carbonatos (MAZURANA, 2019; MAZURANA; POSSAN; BITTENCOURT, 2019).

### 3.2.3 Cimento Portland

O cimento Portland escolhido para o preparo das argamassas é o CP IV-32 RS, o qual possui conforme a NBR 16697 (ABNT, 2018) os seguintes limites de composição em porcentagem de massa:

- Clínquer + sulfatos de cálcio: 45% a 85%;
- Material pozolânico: 15% a 50%;
- Material carbonático: 0% a 10%.

Optou-se por este cimento devido a sua ampla utilização na confecção de argamassas. Os ensaios para a caracterização deste material foram:

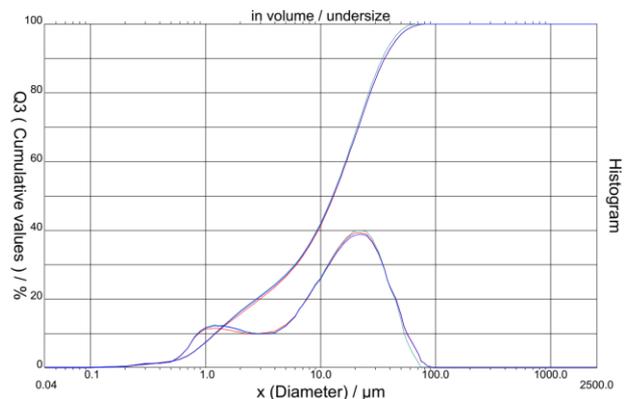
- Análise termogravimétrica (TG/DTG) – conforme ASTM E 2550 (ASTM, 2017);
- Granulometria a laser – conforme ISO 13320 (ISO, 2009);
- Massa unitária - conforme o método proposto por Mattana (2013);
- Massa específica – conforme a NBR 16605 (ABNT, 2017).

Todos os ensaios de caracterização do cimento Portland, foram realizados com os mesmos equipamentos e procedimentos adotados para a cal. Os resultados das caracterizações podem ser observados na Tabela 3 e na Figura 9.

Tabela 3: Características do cimento

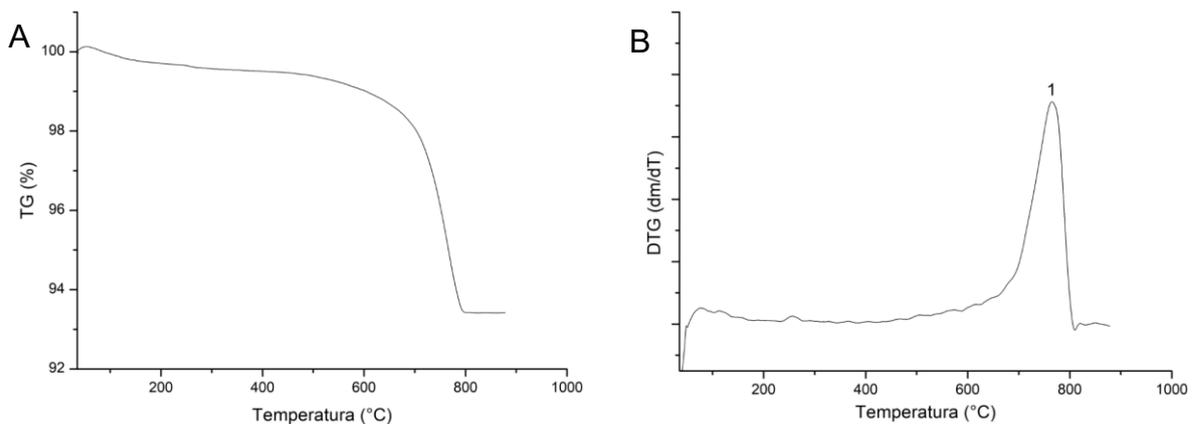
Cimento CP IV-32 RS	
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	0,905
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,974
Diâmetro d50 (µm)	12,84
Diâmetro d90 (µm)	35,66

Figura 9: Granulometria a laser do cimento



Os resultados da granulometria a laser do cimento, mostram que o mesmo possui partículas com diâmetro médio inferiores a 12,87 µm e uma curva de frequência bimodal (2 picos). Já os resultados da análise térmica, podem ser observados na Figura 10 (A e B).

Figura 10: Análise TG (A) e DTG (B) do cimento



Observa-se na Figura 10 uma massa residual de aproximadamente 93% após

a análise térmica. Essa perda de massa ocorreu principalmente numa temperatura de aproximadamente 750°C (ponto 1), que corresponde a decomposição de carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) (MAZURANA, 2019; NEVES JUNIOR *et al.*, 2019; RIGO, 2019).

### 3.2.4 Materiais de pintura

Para a caracterização dos materiais de pintura, foi realizado o ensaio de TG nas tintas. Não foram realizados outros ensaios nas tintas e nos demais materiais, uma vez que os fabricantes disponibilizam informações.

#### 3.2.4.1 Tinta de acabamento

Neste trabalho foram utilizados 4 tipos de tintas imobiliárias nas cores neutras ou *off-white*, sendo elas a látex PVA, acrílica fosca, acrílica acetinada e acrílica semibrilho. As principais informações fornecidas pelo fabricante referente as propriedades e modo de aplicação de cada uma podem ser observadas na Tabela 4.

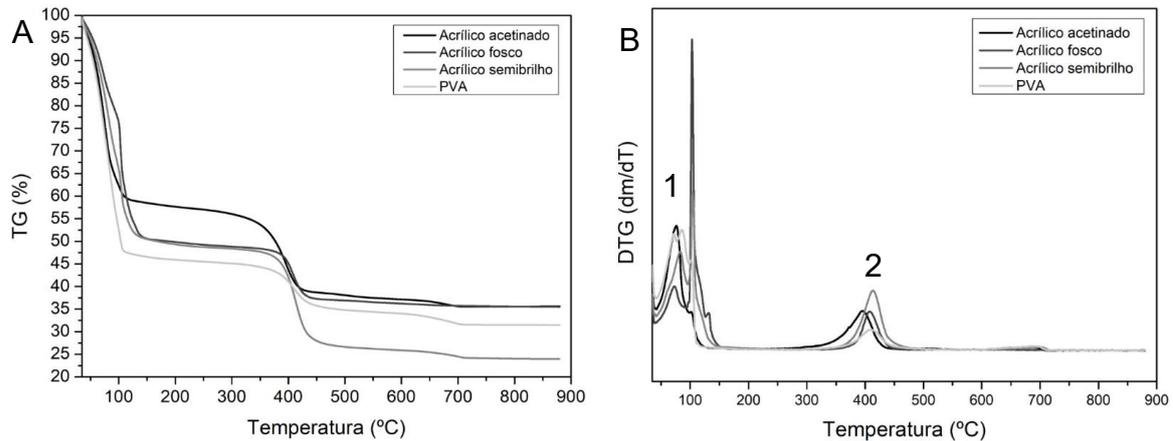
Tabela 4: Propriedades e recomendações das tintas empregadas conforme indicações do fabricante

Tipo	Marca, rendimento e diluição	Composição
Látex PVA	Marca: Suvinil Clássica premium sem cheiro. Rendimento: 21,25m <sup>2</sup> por litro a cada demão. Diluição: 50% em todas as demãos.	Resina a base de polímeros acrílicos e vinílicos, pigmentos isentos de metais pesados, cargas inertes, glicóis e tensoativos etoxilados e carboxilados.
Acrílica fosca	Marca: Suvinil acrílico premium fosco completo sem cheiro. Rendimento: 21,25m <sup>2</sup> por litro a cada demão. Diluição: 30% em todas as demãos.	Resina à base de copolímero estireno acrílico, pigmentos isentos de metais pesados, cargas minerais inertes, glicóis, tensoativos etoxilados e carboxilados e diuron.
Acrílica acetinada	Marca: Suvinil acrílico premium acetinado sem cheiro. Rendimento: 18,5m <sup>2</sup> por litro a cada demão. Diluição: 30% em todas as demãos.	Resina à base de copolímero estireno acrílico, aditivos, pigmentos isentos de metais pesados, cargas minerais, glicóis espessantes, tensoativos, fungicidas, bactericida a base de isotiazolinonas e diuron.
Acrílica semibrilho	Marca: Suvinil acrílico premium ilumina sem cheiro. Rendimento: 17,5m <sup>2</sup> por litro a cada demão. Diluição: 20 a 30% na primeira demão e nas demais de 10 a 20%.	Resina à base de copolímero estireno acrílico, pigmentos isentos de metais pesados, cargas minerais inertes, hidrocarbonetos alifáticos, glicóis e tensoativos etoxilados e carboxilados.

Ressalta-se que para todos os tipos de tintas apresentados na Tabela 4, devem ser aplicados de 2 (duas) à 3 (três) demãos, respeitando um tempo mínimo de secagem e cura da argamassa de 28 dias e tendo a superfície previamente preparada com selador acrílico e massa corrida.

Os resultados da análise térmica das tintas são apresentados nas Figuras 11 A e B.

Figura 11: Análise TG (A) e DTG (B) dos diferentes tipos de tinta



Analisando a Figura 11, observa-se uma massa residual de aproximadamente 35,5% para as tintas acrílicas fosca e acetinada, 31,5% para a tinta latéx PVA e 24% para a tinta acrílica semibrilho, após a realização de análise termogravimétrica. Este resultado indica que as tintas acrílicas fosca, acetinada e latéx PVA possuem uma menor quantidade de base polimérica e maior quantidade de cargas sólidas quando comparadas com a tinta acrílica semibrilho. Observa-se também, dois momentos onde a perda de massa foi mais significativa, de modo que o primeiro ocorreu para temperaturas entre 40°C e 150°C (ponto 1), que corresponde a decomposição dos solventes presentes na tinta e o segundo para temperaturas entre 350°C e 450°C (ponto 2), que corresponde a decomposição das bases poliméricas presentes nas tintas (POPESCU; TIBIRNA; VASILE, 2011; RESTREPO *et al.*, 2018; TAO *et al.*, 2010).

### 3.2.4.2 Selador

O selador usado neste trabalho foi o selador acrílico Hydronorth, o qual pode ser utilizado tanto para ambientes internos quanto para ambientes externos. Dentre as principais indicações e características fornecidas pelo fabricante destacam-se:

- A superfície deve ser preparada conforme a NBR 13245 (ABNT, 2011);
- Antes da aplicação, o produto deve ser diluído em 10% de água;
- O produto deve ser aplicado em uma demão e possui um rendimento de 6,9m<sup>2</sup> por litro a cada demão;
- O tempo mínimo para aplicação de massa corrida é de 6 horas.

### 3.2.4.3 Massa corrida

Foram usados dois tipos de massa corrida, tendo em vista que se recomenda a utilização de massa corrida PVA para pinturas em tinta Latex PVA e massa corrida acrílica para pinturas em tintas à base de resinas acrílicas. Na Tabela 5 pode-se observar algumas características e recomendações disponibilizadas pelos fabricantes.

Tabela 5: Propriedades e recomendações da massa corrida

Tipo	Marca e rendimento	Composição	Preparação e Aplicação
PVA	Massa corrida Mega, linha complementos. Rendimento de 8 a 12 m <sup>2</sup> para galão de 3,6L.	Água, resina PVA, cargas minerais e aditivos especiais.	Pronta para uso, aplicar de 2 a 3 demãos com intervalo de uma hora.
Acrílica	Massa corrida Blascor complementos acrílicos. Rendimento de 4 a 8 m <sup>2</sup> para galão de 3,6L.	Água, cargas minerais inertes, emulsão acrílica, pigmentos, hidrocarbonetos alifáticos, aditivos e microbiocidas não metálicos.	Pronta para uso e necessita de apenas uma demão.

## 3.3 EXECUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS

Para a moldagem dos corpos de prova, foi necessário primeiramente realizar a definição do volume de material a ser utilizado (conforme o planejado na seção 3.1) e, posteriormente, a definição do consumo de cada material. Para isso, necessitou-se dos resultados da massa específica e unitária dos materiais, assim como a quantidade de água requerida conforme o traço. A determinação da quantidade de água requerida, foi obtida através do ensaio de índice de consistência conforme recomendações da NBR 13276 (ABNT, 2016), no qual fixou-se um índice de consistência de  $260 \pm 5$  mm. Após todas essas informações obtidas, foi possível calcular a relação água/materiais secos (H) e, por consequência, a quantidade necessária de cada material. Observa-se, na Tabela 6, o consumo teórico de cada material para 1 m<sup>3</sup> de argamassa e os resultados dos ensaios de caracterização físicos e mecânicos.

Tabela 6: Consumo de materiais para 1m<sup>3</sup> resultados de caracterização da argamassa

Consumo de materiais (kg)				Relação a/c	$\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> )	Retenção de água (%)	ft (MPa)	fc (MPa)	Ecd (GPa)
Cimento	Cal	Areia	Água						
140,92	93,3	1477,3	349,6	2,48	1999,91	96,89	1,01	2,03	5,22

Definidos os consumos de cada material, o próximo passo foi a execução das argamassas, processo que ocorreu no Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais (LADEMA) da UNILA, conforme especificações da NBR 7200 (ABNT, 1998), a qual prevê que argamassas que empreguem misturas de cal e areia, devem passar por um período de maturação de no mínimo 16 horas destes materiais com parte da água total prevista no traço. Devido ao elevado volume de material, as argamassas foram executadas em uma betoneira com capacidade do tambor de 120 litros. Ressalta-se que o processo de maturação da cal ocorreu diretamente no tambor da betoneira por um período de 24 horas e foi prevista uma perda de 15% do material.

Após executada a mistura, as argamassas foram moldadas, adensadas e permaneceram nos moldes em ambiente interno por 24 horas, sendo desmoldadas após este período.

Após a desforma, as amostras destinadas à análise de carbonatação foram encaminhadas diretamente para seus respectivos ambientes de exposição, enquanto as amostras destinadas para os ensaios físicos e mecânicos foram armazenadas em ambiente interno para a realização do processo de cura até as datas de realização dos ensaios.

### 3.3.1 Ensaios no estado fresco

#### A) Massa específica

Para a determinação da massa específica no estado fresco, seguiram-se como base as orientações da norma NBR 13278 (ABNT, 2005), a qual determina que logo após o preparo da argamassa, deve-se preencher um recipiente de 400 cm<sup>3</sup> em 3 camadas de espessuras aproximadamente iguais aplicando entre cada uma 20 golpes com espátula e 3 quedas do recipiente na mesa de consistência. E ao final deste processo, deve-se arrasar a argamassa e pesá-lo em balança com resolução de 0,1g.

Devido a falta do recipiente calibrado de 400 cm<sup>3</sup> no laboratório onde as argamassas foram executadas, necessitou-se adaptar o ensaio e realizá-lo nas formas de 75mmX95mmX150mm destinadas aos ensaios de profundidade de carbonatação. Para isso, as formas foram previamente calibradas com água ( $\gamma=1\text{g/cm}^3$ ) de modo a obter o seu volume exato por meio da Equação 4.

$$v_r = m_a - m_v \quad (4)$$

Onde:

$v_r$ : Volume do recipiente ( $\text{cm}^3$ ).

$m_a$ : Massa do recipiente com água (g);

$m_v$ : Massa do recipiente vazio (g);

A massa específica no estado fresco foi calculada através da Equação 5.

$$d = \frac{m_c - m_v}{v_r} * 1000 \quad (5)$$

Onde:

$d$ : Massa específica da argamassa ( $\text{Kg/m}^3$ );

$m_c$ : Massa do recipiente com a argamassa (g);

$m_v$ : Massa do recipiente vazio (g);

$v_r$ : Volume do recipiente ( $\text{cm}^3$ ).

Como resultado para a massa específica no estado fresco obteve-se um valor de 1999,91  $\text{Kg/m}^3$ .

## B) Retenção de água

Para a realização do ensaio de retenção de água tomou-se como base os procedimentos prescritos na NBR 13277 (ABNT, 2005), sendo necessário o emprego de equipamentos como bomba de vácuo, funil de Buchner, discos de papel-filtro com 200 mm de diâmetro, soquete metálico, balança com resolução de 0,1g, cronômetro e demais utensílios de laboratório, conforme a Figura 12.

Figura 12: Equipamento<sup>2</sup> usado para o ensaio de retenção de água



Ao final dos procedimentos, a retenção de água foi obtida através das Equações 6 e 7.

$$R_a = \left[ 1 - \frac{(m_a - m_s)}{AF * (m_a - m_v)} \right] * 100 \quad (6)$$

$$AF = \frac{m_w}{m + m_w} \quad (7)$$

Onde:

R<sub>a</sub>: Retenção de água;

m<sub>a</sub>: Massa do conjunto com a argamassa (g);

m<sub>s</sub>: Massa do conjunto após a sucção (g);

m<sub>v</sub>: Massa do conjunto vazio (g);

AF: Fator água/argamassa fresca;

m<sub>w</sub>: Massa total de água adicionada à mistura (g);

m: Soma das massas dos componentes anidros da argamassa (g).

A retenção de água obtida foi de 96,89%.

### C) Índice de consistência

Para a determinação do índice de consistência, usou-se como base os procedimentos prescritos na NBR 13276 (ABNT, 2016). Durante a realização deste ensaio necessitou-se das seguintes aparelhagens: Mesa para índice de consistência (flow table), molde troncônico, soquete metálico, régua metálica e paquímetro com resolução de pelo menos 1mm (Figura 13). O ensaio foi realizado no Laboratório de

<sup>2</sup> Equipamento emprestado do Laboratório de Estruturas e Materiais de Engenharia (LEME) – UNIOESTE Cascavel.

Tecnologia do Concreto de ITAIPU (LTCl).

Figura 13: Ensaio do índice de consistência



Neste trabalho, estipulou-se como ponto de parada o índice de consistência que representava um espalhamento médio de  $260 \pm 5$  mm. Sendo assim, o procedimento foi repetido ajustando a quantidade de água até que a relação presente na Equação 8 fosse atendida.

$$255 \text{ mm} \leq \frac{d_1 + d_2 + d_3}{3} \leq 265 \text{ mm} \quad (8)$$

Onde  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  representam 3 (três) diâmetros medidos imediatamente após a última queda da mesa para índice de consistência. Após a realização do ensaio, o índice de consistência obtido foi de 263 mm.

### 3.3.2 Ensaio no estado endurecido

#### A) Resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão seguiu como base os procedimentos prescritos na NBR 13279 (ABNT, 2005). Para a realização deste ensaio, necessitou-se de uma máquina para ensaios de resistência à tração na flexão, dispositivo capaz de aplicar uma carga uniforme e sem choque de 50 N/s, cronômetro e demais utensílios para laboratório (Figura 14). Este ensaio foi realizado no Laboratório de

Tecnologia do Concreto de ITAIPU (LTCl) no equipamento da marca AMSLER.

Figura 14: Ensaio de resistência à tração na flexão



Posteriormente, a resistência à tração na flexão foi calculada utilizando-se a Equação 9.

$$R_f = \frac{1,5 * F_f * L}{40^3} \quad (9)$$

Onde:

$R_f$ : Resistência à tração na flexão (MPa);

$F_f$ : Carga aplicada verticalmente no centro do prisma (N);

$L$ : Distância entre suportes (mm).

A resistência a tração na flexão obtido para as argamassas após os 28 dias foi de 1,01 MPa.

#### B) Resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão axial seguiu como base os procedimentos prescritos na NBR 13279 (ABNT, 2005). Para a realização deste ensaio necessitou-se de uma máquina para ensaios de compressão, dispositivo de carga capaz de aplicar uma carga uniforme e sem choque de 500 N/s, cronômetro e demais utensílios para laboratório (Figura 15). O ensaio foi realizado no mesmo laboratório e equipamento do ensaio de tração na flexão.

Figura 15: Ensaio de resistência à compressão axial



A resistência à compressão axial foi calculada utilizando-se a Equação 10.

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (10)$$

Onde:

$R_c$ : Resistência à compressão (MPa);

$F_c$ : Carga máxima aplicada (N);

Após o ensaio, verificou-se que a resistência à compressão axial obtida aos 28 dias foi de 2,03 MPa.

### C) Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico foi obtido por meio da Técnica de Excitação por Impulso (TEI), realizado no Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais (LADEMA) da Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA). Esta técnica consiste na obtenção dos módulos elásticos de um material a partir das frequências naturais de vibração de um corpo de prova, geradas por um impacto mecânico de curta duração, seguida da captação da resposta acústica por meio de um transdutor (Figura 16). Através destes dados e de características do corpo de prova (geometria, massa e dimensões) é possível calcular o módulo de elasticidade dinâmico por meio do software Sonelastic (OTANI; PEREIRA, 2017).

Figura 16: Equipamento para ensaio de módulo de elasticidade dinâmico



O valor de módulo de elasticidade dinâmico obtido foi de 5,22 GPa.

### 3.4 PREPARO DE AMOSTRAS

Neste estudo, para o preparo dos corpos de prova para a exposição natural e acelerada ao CO<sub>2</sub>, foram conduzidos alguns testes pilotos, uma vez que não se têm estudos prévios para a fundamentação metodológica.

Buscando uma maior aproximação com a realidade, necessitou-se desenvolver um sistema de impermeabilização frente à entrada de CO<sub>2</sub> de 5 faces dos corpos de prova, fazendo com que apenas a face com proteção superficial do tipo pintura imobiliária ficasse exposta ao ambiente, assim como ocorre nas aplicações práticas. O sistema de impermeabilização usado foi o de aplicação de parafina<sup>3</sup>, sendo que para atestar sua eficiência, foi realizado um pré-teste com oito corpos de prova, o qual mostrou uma boa eficiência da parafina quando aplicada em camadas com uma, duas ou três demãos como pode-se observar na Figura 17.

---

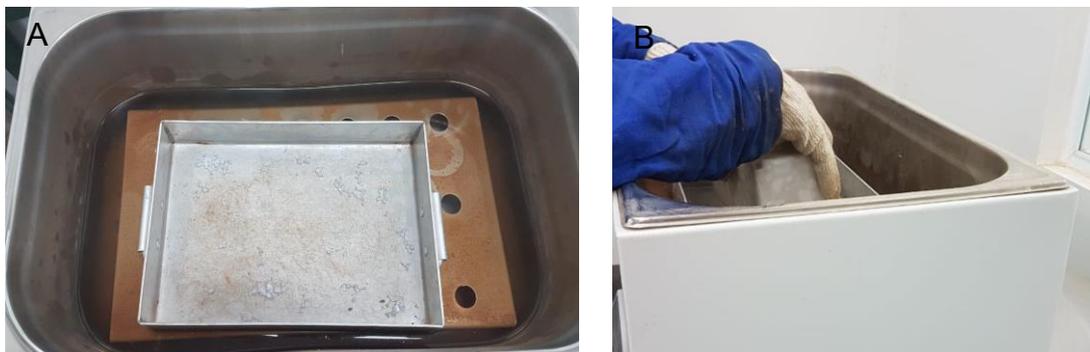
<sup>3</sup> Existem outros sistemas possíveis para tal, como uso de resina epóxi. Contudo, neste estudo escolheu-se a parafina devido ao menor custo e disponibilidade na região do estudo. Cabe destacar que para exposição externa a parafina não é uma opção eficaz, devido sua vulnerabilidade ao calor.

Figura 17: Impermeabilidade frente ao CO<sub>2</sub> gerada pela aplicação de parafina conforme o número de demãos



Com base nos resultados obtidos no pré-teste, optou-se por realizar a aplicação de 3 demãos de parafina nas faces do corpo de prova, devido ao maior desempenho na formação de barreira. O processo de impermeabilização com parafina ocorreu 7 dias após a confecção dos corpos de prova. A parafina foi derretida em Banho Maria e a aplicação no corpo de prova ocorreu por meio de imersão de cada face da argamassa no recipiente que continha a parafina derretida, conforme pode-se observar na Figura 18 (A e B).

Figura 18: Derretimento em Banho Maria (A) e aplicação nos corpos de prova (B)



Após a aplicação da parafina, os corpos de prova foram levados para os ambientes naturais de exposição ao CO<sub>2</sub> (ambiente interno, externo protegido e desprotegido da chuva) e as amostras que seriam submetidas ao ensaio acelerado

ficaram expostas em ambiente interno de laboratório até a data de ensaio (220 dias), conforme observa-se na Figura 19 (A, B e C).

Figura 19: Ambiente natural de exposição das amostras: externo protegido e desprotegido (A) ambiente interno (B) e ambiente acelerado (C)



A aplicação da proteção superficial foi conduzida, para todas as amostras, 30 dias após sua produção, conforme exposto na NBR 13245 (ABNT, 2011), que especifica um tempo de cura ao ar de 30 dias antes da aplicação do selador. Para garantir uma uniformidade dos materiais aplicado, todo o processo foi conduzido pelo mesmo aplicador. Definiu-se a aplicação de apenas uma demão de selador, uma única camada de massa corrida (onde para cada corpo de prova, a quantidade de material aplicado foi pesada de forma a ter a mesma quantidade empregada em todos os exemplares) e duas demãos de cada tipo de tinta. Antes da aplicação da proteção superficial, determinou-se nos corpos de prova de referência a profundidade de carbonatação inicial (devido à penetração de  $\text{CO}_2$  do período de cura ao ar).

As leituras das profundidades de carbonatação ocorreram 34, 70 e 160 dias após a aplicação do sistema de proteção superficial, sendo assim, 64, 100 e 190 dias

após a moldagem das argamassas. Cabe ressaltar que as amostras que apresentavam sistema de proteção superficial em uma face possuíam também proteção com parafina em todas as outras faces para impedir a entrada de CO<sub>2</sub> pelas mesmas (Figura 20).

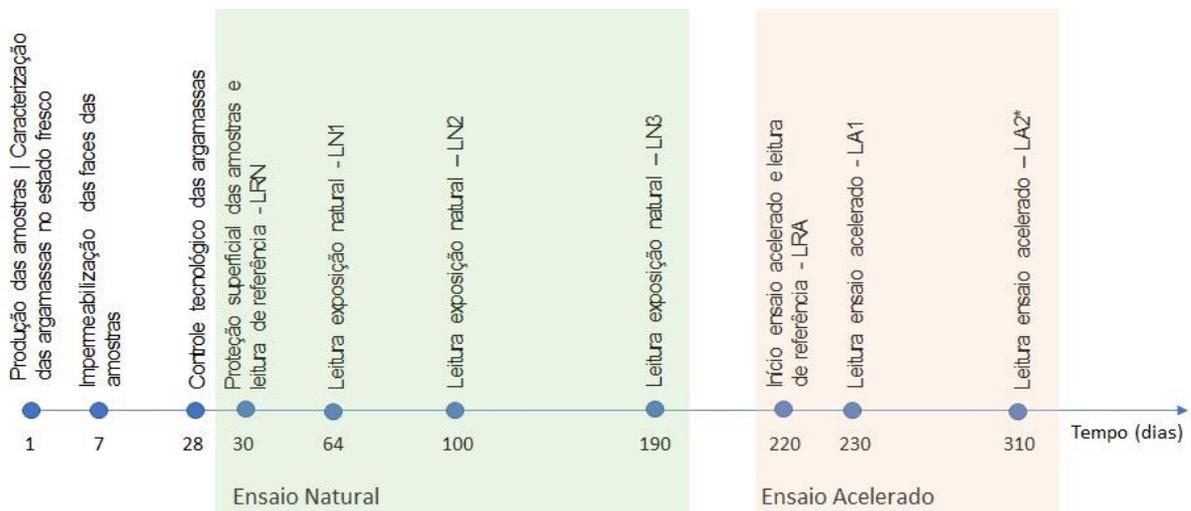
Figura 20: Corpo de prova com proteção superficial



### 3.5 ENSAIOS DE CARBONATAÇÃO

Na Figura 21, tem-se a linha do tempo das atividades de laboratório realizadas no presente estudo.

Figura 21: Linha do tempo das atividades laboratoriais realizadas



\*Leitura a ser realizada.

### 3.5.1 Carbonatação em ambientes naturais

Para a medição da profundidade de carbonatação foram utilizados corpos de prova prismáticos de 75x95x150mm. Em cada ambiente de exposição foram inseridas 15 amostras, das quais 3 possuíam sistema de proteção superficial com tinta PVA, 3 com tinta acrílica fosca, 3 com tinta acrílica acetinada, 3 com tinta acrílica semibrilho e 3 sem nenhum tipo de proteção, servindo assim, como exemplares de referência.

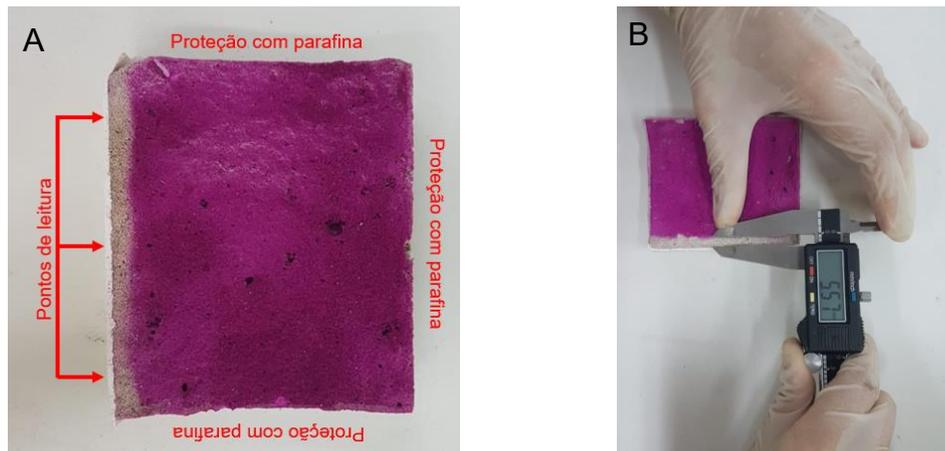
Para realizar a medição da profundidade de carbonatação, os corpos de prova foram fraturados em fatias de 30 mm com o auxílio de uma morsa e duas chaves de fenda e/ou Philips posicionadas em laterais opostas do corpo de prova, para formar uma zona preferencial para a propagação da fratura (Figura 22). Verificou-se, experimentalmente, que esse método de fratura pode danificar a integridade das camadas de parafina, sendo recomendada a reaplicação da parafina após a fratura.

Figura 22: Processo de fratura dos corpos de prova



Imediatamente após a execução da fratura, aspergiu-se sobre a superfície fraturada da amostra uma solução de 1% de fenolftaleína dissolvida em 70% de álcool etílico e 30% água destilada. Posteriormente, executou-se a leitura da profundidade de carbonatação com o auxílio de um paquímetro digital à 1 cm da borda esquerda, 1 cm da borda direita e no ponto central da amostra (Figura 23). A profundidade final da frente de carbonatação foi obtida realizando-se a média das 3 medições.

Figura 23: Processo de leitura da profundidade de carbonatação



Após as leituras de profundidade de carbonatação, os corpos de prova foram levados novamente aos seus respectivos ambientes de exposição sem a reposição da camada de parafina na face fraturada. Cabe ressaltar que o recomendado seria aplicar uma nova camada de parafina no topo fraturado do corpo de prova, tendo em vista que, a velocidade de difusão de  $\text{CO}_2$  é muito superior em argamassas de revestimento sem nenhum tipo de proteção superficial devido a sua maior porosidade, fazendo com que a taxa de captura de  $\text{CO}_2$  por carbonatação seja mais elevada pela face exposta.

### 3.5.2 Carbonatação em ambiente controlado

Para análise da profundidade de carbonatação em ambiente controlado (câmara de carbonatação) foram utilizados corpos de prova prismáticos de 75mm x 95mm x 150mm que estavam expostas em ambiente interno por 220 dias<sup>4</sup>, com proteção superficial (pintura) aplicada aos 30 dias e faces laterais e topos protegidos com parafina desde os 7 dias de idade. Ao todo foram utilizadas 9 amostras, onde todas possuíam proteção com parafina em 5 faces variando o tipo de proteção da sexta face, sendo que 2 possuíam proteção superficial com tinta PVA, 2 com tinta acrílica fosca, 2 com tinta acrílica acetinada, 2 com tinta acrílica semibrilho e 1 sem proteção superficial.

Antes de iniciar a exposição na câmara acelerada, realizou-se leituras da

<sup>4</sup> Ensaios realizados apenas nesta idade devido a pandemia de COVID-19 que interrompeu as atividades do laboratório onde eram conduzidos os ensaios.

profundidade de carbonatação das amostras para servir como leituras de referência. Após essa leitura as amostras seguiram para a câmara de carbonatação, as quais passaram por um processo de sazonalidade de dois dias, o qual consiste em regularizar a umidade e a temperatura dos corpos de prova (PAULETTI; POSSAN; DAL MOLIN, 2007). Após o sazonalidade, iniciou-se a exposição à 23°C, umidade de 60% e uma concentração de 5% de CO<sub>2</sub>.

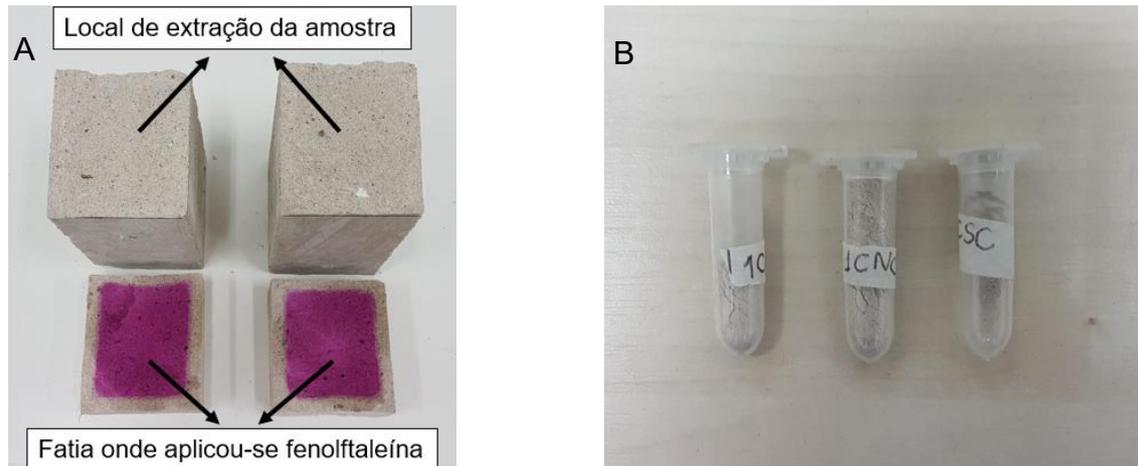
As leituras de profundidade de carbonatação ocorreram aos 0 e 10 dias seguindo o mesmo procedimento para as amostras expostas em ambientes naturais. Após cada leitura, as amostras receberam novamente uma proteção com parafina na face fraturada e foram reinseridas na câmara de carbonatação.

### 3.6 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TG/DTA)

Para o estudo da captura de CO<sub>2</sub> das argamassas realizou-se a análise termogravimétrica (TG) e da termogravimetria derivada (DTG). Estas análises fornecem um gráfico do percentual de massa da amostra em função da temperatura, sendo possível desta forma, determinar quais compostos estão presentes na amostra, assim como, sua massa (Li *et al*, 2011).

A coleta das amostras foi realizada aos 64 dias de exposição ao CO<sub>2</sub>, em apenas um corpo de prova de referência, exposto em ambiente interno. Extraiu-se deste corpo de prova pequenas quantidades (aproximadamente 50 miligramas) de material, das regiões carbonatada (RC), semicarbonatada (RSC) e não carbonatada (RNC). O processo de extração da amostra, ocorreu diretamente na face espelho da amostra de onde retirou-se uma fatia sobre a qual aplicou-se fenolftaleína para a análise da profundidade de carbonatação (Figura 24 A), pois assim, foi possível identificar as três regiões de interesse (RC, RSC e RNC). Após a extração, as amostras foram rapidamente armazenadas em eppendorfs (Figura 24 B) identificados e permaneceram no laboratório até a data de execução dos ensaios.

Figura 24: Amostra inteira (A) e fração de amostra para análise térmica TG/DTG (B)



Os ensaios foram realizados no Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais (LADEMA) da UNILA, no equipamento da marca Perking Elmer, modelo STA 8000, sob atmosfera de nitrogênio, com uma faixa de leitura entre 15 e 1600 °C e uma taxa de aquecimento do forno de 20°C.min<sup>-1</sup>. Antes da realização do ensaio, as amostras passaram por um processo de retirada de umidade seguindo os procedimentos prescritos por Scrivener, Snellings e Lothenbach (2016), recomendam que as amostras devem permanecer por 1 hora dentro do equipamento a uma temperatura de 35°C, levando a separação entre a água livre e combinada das amostras.

### 3.7 EMISSÕES E CAPTURA DE CO<sub>2</sub>

A estimativa da captura de CO<sub>2</sub> foi realizada por meio da profundidade de carbonatação e por meio de análise termogravimétrica (TG/DTA). Já a estimativa das emissões de CO<sub>2</sub> foi realizada com base na soma das emissões de cada material.

#### 3.7.1 Emissões de CO<sub>2</sub>

Para estimar a emissão final de CO<sub>2</sub> das argamassas, realizou-se a soma proporcional das emissões de cada material que constitui a argamassa. Ou seja, realizou-se o somatório das emissões típicas do cimento, da cal e do agregado natural multiplicado pelo consumo de cada material, conforme observa-se na Equação 11.

$$E_{arg} = E_{cim} \times C_{cim} + E_{cal} \times C_{cal} + E_{ag} \times C_{ag} \quad (11)$$

Onde:

$E_{arg}$ : Emissão total para produção da argamassa, em KgCO<sub>2</sub>/t;

$E_{cim}$ : Emissão para a produção do cimento, em KgCO<sub>2</sub>/t;

$E_{cal}$ : Emissão para a produção da cal, em KgCO<sub>2</sub>/t;

$E_{ag}$ : Emissão para a produção do agregado natural, em KgCO<sub>2</sub>/t;

$C_{cim}$ : Consumo de cimento para produzir 1 m<sup>3</sup>, em Kg;

$C_{cal}$ : Consumo de cal para produzir 1 m<sup>3</sup>, em Kg;

$C_{ag}$ : Consumo de agregado natural para produzir 1 m<sup>3</sup>, em Kg.

#### A) Emissões do cimento

Conforme destacado no SNIC (2019), as emissões para a produção de cimento ocorrem de duas formas principais. A primeira é durante a produção do clínquer (pela queima de combustíveis para aquecimento dos fornos e pela reação química de descarbonatação do calcário durante o processo de calcinação) e a segunda forma de emissão é pelo do consumo da energia elétrica usada na planta industrial. Com isso para determinar as emissões decorrentes da produção do cimento, deve-se multiplicar as emissões para a produção do clínquer ( $E_{clín}$ ) pela sua porcentagem presente no cimento usado ( $\%C_{cim}$ ) e somar a este valor a emissão provinda do consumo de energia elétrica ( $E_{e.e.}$ ) multiplicada pelo seu fator de emissão (FE), como observa-se na Equação 12.

$$E_{cim} = E_{clín} \times \%C_{cim} + E_{e.e.} \times FE \quad (12)$$

Na Tabela 7 pode-se observar os valores adotados para cada variável apresentada.

Tabela 7: Emissões referente a produção do cimento

Variável	Descrição	Emissão	Referências
Clínquer	Emissões por calcinação e queima de combustíveis (Kg CO <sub>2</sub> /t clínquer)	866	GNR Project (2016)
	Porcentagem no CP IV-32 RS (%)	45 a 85	ABNT NBR 16697 (2018)
Energia elétrica	Consumo na planta (kWh/t)	109	GNR Project (2016)
	Fator de Emissão (Kg CO <sub>2</sub> /kWh)	0,08	MCTIC (2016)

Os valores de emissão referentes à produção do clínquer e consumo de energia elétrica, foram obtidos através do GNR Project (WCBSD, 2016). A porcentagem de clínquer presente no cimento foi obtida através da NBR 16697 (ABNT, 2018) e, por último o fator de emissão foi obtido através do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicação (MCTIC, 2016).

### B) Emissões da Cal

A estimativa das emissões de CO<sub>2</sub> devido a produção da cal ( $E_{cal}$ ) foi tomada com base no valor médio dos resultados obtidos por John, Punhagui e Cincotto (2015), apresentados para a Economia de Baixo Carbono para o cenário base (business as usual) conforme pode-se observar na Tabela 8.

Tabela 8: Emissões referentes a produção de cal ( $E_{cal}$ )

Variável	Emissão (KgCO <sub>2</sub> /t)	
	Mínimo	Máximo
Cal	466	766

Cabe ressaltar que a estimativa das emissões considerou apenas duas fontes principais: (1) O processo de descarbonatação do calcário, responsável por 70% do total, e (2) a queima dos combustíveis no processo, responsável por 30% do total de CO<sub>2</sub> liberado. Sendo assim, as emissões devido ao consumo de energia elétrica pela planta industrial foram descartadas por serem uma parcela pequena e de menor impacto.

### C) Emissões do agregado natural

Os valores referentes a emissão de CO<sub>2</sub> pela produção do agregado miúdo natural para a região de Foz do Iguaçu são extremamente escassos. Sendo assim, adotou-se o valor apresentado por Rigo (2019), o qual realizou um compilado de trabalhos brasileiros que estudaram este tema e obteve um resultado de 47,84 KgCO<sub>2</sub>/t de agregado miúdo produzido.

### 3.7.2 Captura de CO<sub>2</sub> devido à carbonatação

A estimativa da captura de CO<sub>2</sub> nas argamassas, com base na profundidade de carbonatação foi realizada através da Equação 13, a qual baseou-se na normativa BRE EM 15804 (BRE, 2014).

$$Cap_{CO_2} = e_c \cdot A \cdot [(M_1 \cdot CaO_{cim} \cdot C_{cim} \cdot \%CaO_{cim}) + (M_1 \cdot CaO_{cal} \cdot C_{cal} \cdot \%CaO_{cal}) + (M_2 \cdot MgO_{cal} \cdot C_{cal} \cdot \%MgO_{cal})] \quad (13)$$

Onde:

Cap<sub>CO<sub>2</sub></sub>: Estimativa da captura de CO<sub>2</sub>;

e<sub>c</sub>: Profundidade de carbonatação (mm);

A: Área da seção transversal exposta ao CO<sub>2</sub> (m<sup>2</sup>);

M<sub>1</sub>: Fração molar entre CO<sub>2</sub> e CaO (0,786);

M<sub>2</sub>: Fração molar entre CO<sub>2</sub> e MgO (1,1);

CaO<sub>cim</sub>: Quantidade de óxido de cálcio presente no cimento usado (%);

%CaO<sub>cim</sub>: Proporção de CaO totalmente carbonatável no cimento (%);

CaO<sub>cal</sub>: Quantidade de óxido de cálcio presente na cal usada (%);

%CaO<sub>cal</sub>: Proporção de CaO totalmente carbonatável na cal (%);

A definição da porcentagem de óxido de cálcio totalmente carbonatável presente na cal e no cimento, assim como da porcentagem de óxido de magnésio totalmente carbonatável na cal, ocorreu através de um levantamento bibliográfico chegando nos valores da Tabela 9.

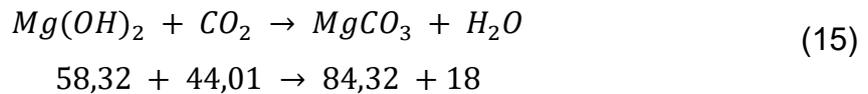
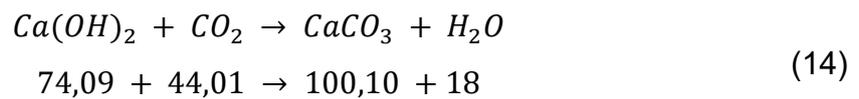
Tabela 9: Porcentagem de óxido de cálcio e de magnésio totalmente carbonatável presente na cal e no cimento

Variável	Valor adotado	Fonte
%CaO <sub>cim</sub>	80%	Xi et al. (2016)
%CaO <sub>cal</sub>	60% (mínimo)	STANMORE e GILOT (2005) <sup>5</sup>
	80% (médio)	
	100% (máximo)	
%MgO <sub>cal</sub>	60% (mínimo)	Valores não encontrados <sup>6</sup>
	80% (médio)	
	100% (máximo)	

<sup>5</sup> STANMORE e GILOT (2005) definem como limite mínimo de 60% e limite máximo de 100%.

<sup>6</sup> Valores não encontrados na bibliografia, utilizando-se então os mesmos valores encontrados para o CaO.

As estimativas do potencial de captura de CO<sub>2</sub> com base na análise termogravimétrica, foram calculadas pelo método das tangentes conforme descrito por Scrivener, Snellings e Lothenbach (2016). Neste método retas tangentes são traçadas nos pontos de inflexão dos picos das DTGs, de modo que as porcentagens iniciais e finais nas TGs referentes às temperaturas de início e fim do pico, correspondem às perdas volatilizadas dos compostos. Deve-se considerar também a massa molar dos compostos formados, sendo eles, o carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) e o carbonato de magnésio (MgCO<sub>3</sub>) conforme as Equações 14 e 15 respectivamente.



### 3.7.3 Balanço de emissões

O balanço de emissões é obtido através da relação entre a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida para produzir as argamassas (levando em conta as emissões de todos os seus materiais constituintes) e a quantidade de CO<sub>2</sub> absorvida pela argamassa ao decorrer do tempo, como pode-se observar na Equação 16.

$$BE = E_{arg} - Cap_{arg} \quad (16)$$

O balanço de emissões pode também, ser expresso em função do percentual de CO<sub>2</sub> capturado pela argamassa ao longo do tempo em relação ao total de CO<sub>2</sub> emitido para a produção da mesma, como observa-se na Equação 17.

$$BE(\%) = \left( \frac{Cap_{arg}}{E_{arg}} \right) \cdot 100 \quad (17)$$

Onde:

BE: Balanço de emissões (Kg);

BE(%): Balanço de emissões relativo (%)

E<sub>arg</sub>: Emissões provindas da argamassa (Kg);

Cap<sub>arg</sub>: Captura de CO<sub>2</sub> ao longo do tempo (Kg);

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

#### 4.1.1 Exposição em ambiente natural

Os resultados de profundidade de carbonatação obtidos para as amostras expostas nos diferentes ambientes de exposição, estão apresentados na Tabela 10 e na Figura 25. As leituras da profundidade de carbonatação para as amostras que possuíam proteção superficial ocorreram aos 64, 100 e 190 dias. Já para as amostras de referência (sem proteção superficial) as leituras ocorreram aos 28, 64, 100 e 190 dias. Optou-se por realizar a leitura aos 28 dias nas amostras de referência, pois assim, seria possível estimar qual a profundidade de carbonatação das amostras no dia da aplicação do sistema de proteção superficial.

Tabela 10: Profundidade de carbonatação nas amostras em ambiente natural de exposição

Ambiente	Dias	Profundidade de carbonatação (mm)				
		Tipo de proteção				
		Sem proteção	PVA	Acrílica		
Fosca	Acetinada			Semibrilho		
Interno	28	4,62	-	-	-	-
	64	9,78	5,38	4,84	4,65	4,36
	100	13,92	6,45	4,86	4,19	4,69
	190	20,61	6,24	5,48	4,72	4,63
Externo protegido	28	7,97	-	-	-	-
	64	13,52	8,88	7,81	6,97	6,61
	100	18,78	11,02	8,25	7,95	8,54
	190	27,28	12,49	7,31	7,12	7,46
Externo desprotegido	28	7,33	-	-	-	-
	64	10,59	6,76	5,93	5,24	5,79
	100	16,52	6,75	5,52	5,72	4,81
	190	21,51	6,97	6,38	5,57	6,24

Analisando a influência dos diferentes ambientes de exposição, os resultados indicam que a velocidade de carbonatação é maior no ambiente externo protegido, seguido pelo ambiente externo desprotegido. Sendo assim, o ambiente interno é o que apresentou as menores velocidades de carbonatação. Esta relação pode ser melhor observada na Figura 26.

Figura 25: Resultados de profundidade de carbonatação

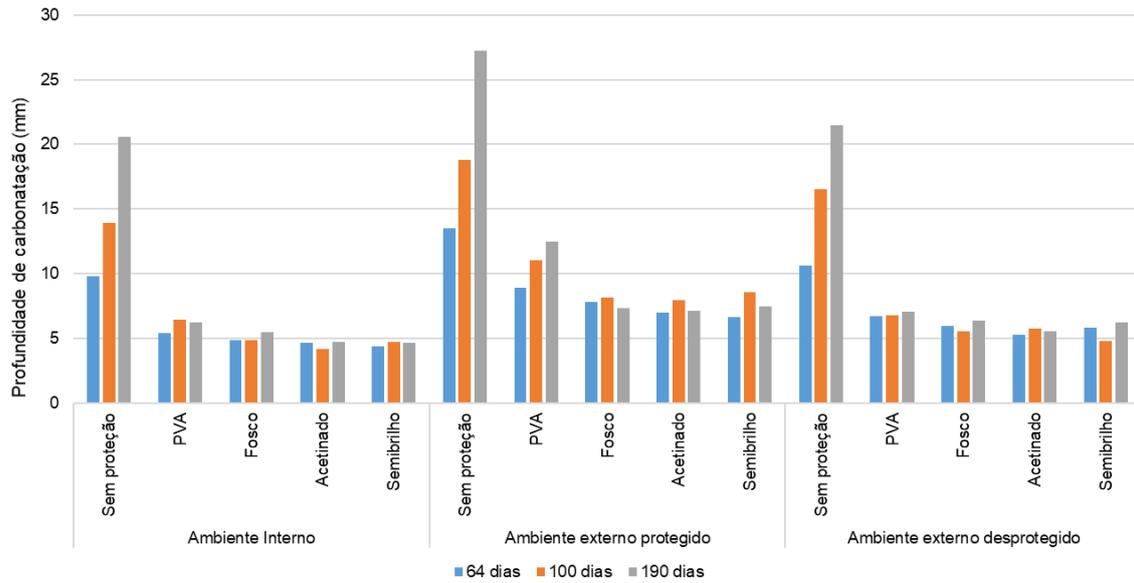
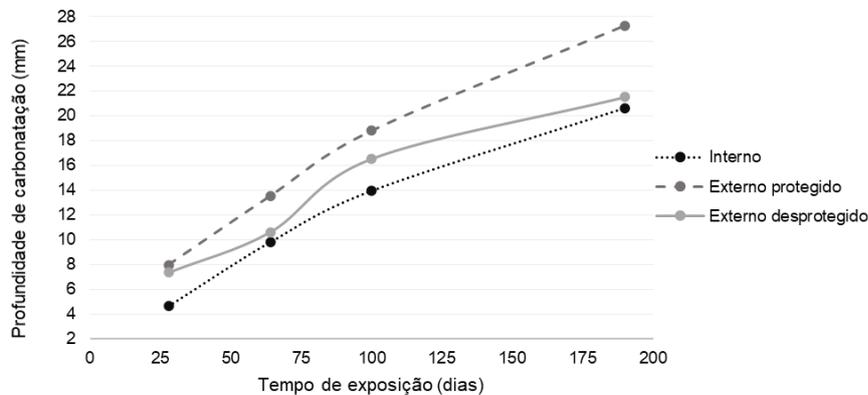


Figura 26: Profundidade de carbonatação para os corpos de prova de referência (sem proteção superficial) x ambiente de exposição



A tendência dos ambientes externo protegido da chuva e externo desprotegido da chuva possuírem maior velocidade de avanço da frente de carbonatação é citada por Rufatto (2019). Porém, como visto na seção 3.1.2, difere de outros trabalhos como Ortolan, Squiavon e Andrade (2015), Antônio (2018) e Mazurana (2019). Esta diferença encontrada nos resultados ocorre pelas distintas condições ambientais em cada ambiente de exposição dos diferentes trabalhos, pois, como visto na seção 2.1.1, a velocidade de carbonatação é diretamente afetada pela concentração de  $\text{CO}_2$ , pela umidade relativa do local de exposição e pela umidade interna do material ensaiado, que é influenciada pelo regime de chuva durante a época de exposição das amostras. Em períodos de estiagem, a umidade interna das amostras tende a ser mais estável, contribuindo para a difusão do  $\text{CO}_2$  na matriz a base de cimento.

Geralmente o ambiente interno possui maiores concentrações de CO<sub>2</sub>, devido a um grande fluxo de pessoas e a umidade menos variável que os demais ambientes, o que propicia uma maior velocidade da frente de carbonatação. Entretanto, neste trabalho os corpos de prova ficaram expostos numa parte do laboratório com pouco fluxo de pessoas, destinada ao armazenamento de amostras de solo, muitas das quais passaram por retirada de sua umidade em estufa, tornando-se assim, um ambiente com pouca concentração de CO<sub>2</sub> e baixa umidade relativa do ar. Também durante o período de exposição (de janeiro a julho de 2020), ocorreram as férias acadêmicas (janeiro a março de 2020), seguido do período de quarentena<sup>7</sup> (março a julho de 2020), o que tornou o fluxo de pessoas praticamente inexistente no laboratório. Portanto, constata-se que estes fatores colaboraram para uma baixa velocidade na taxa de carbonatação dos corpos de prova expostos em ambiente interno.

Já ao comparar as amostras em relação as diferentes variações de proteção superficial, nota-se que as amostras de referência apresentam as maiores velocidades de carbonatação, seguido pelas amostras com proteção superficial do tipo látex PVA e por fim as amostras com proteções superficiais acrílicas. A Tabela 11 mostra esta relação e apresenta também a porcentagem de carbonatação em relação à proteção acrílica das demais variações.

Tabela 11: Profundidade de carbonatação das diferentes proteções superficiais aos 64 e 190 dias de exposição ao CO<sub>2</sub> em ambiente natural

Ambiente	Proteção	64 dias		190 dias	
		Profundidade (mm)	% em relação à acrílica*	Profundidade (mm)	% em relação à acrílica*
Interno	Sem proteção	9,78	111,93	20,61	316,74
	PVA	5,38	16,54	6,25	26,35
	Acrílica*	4,61	-	4,95	-
Externo protegido	Sem proteção	13,52	89,58	27,28	273,89
	PVA	8,88	24,60	12,49	71,24
	Acrílica*	7,13	-	7,30	-
Externo desprotegido	Sem proteção	10,59	87,25	21,51	254,76
	PVA	6,76	19,08	7,04	16,12
	Acrílica*	5,65	-	6,06	-

\* Refere-se à média dos valores dos 3 tipos de proteção empregados no estudo (tabela 12).

Observa-se na Tabela 12 que os resultados de profundidade de carbonatação, entre as tintas acrílicas apresentaram valores muito próximos entre si.

<sup>7</sup> Quarentena ocorrida devido a pandemia do COVID-19.

Tabela 12: Profundidade de carbonatação das proteções superficiais acrílicas aos 64 dias

Ambiente de exposição	Tipo de Proteção	Profundidade de Carbonatação (mm)			
		Média	$\sigma$	Média	$\sigma$
Interno	Fosco	4,84	0,01	4,61	0,11
	Acetinado	4,65	0,07		
	Semibrilho	4,36	0,15		
Externo protegido	Fosco	7,81	0,12	7,13	0,28
	Acetinado	6,97	0,33		
	Semibrilho	6,61	0,09		
Externo desprotegido	Fosco	5,93	0,11	5,65	0,17
	Acetinado	5,24	0,15		
	Semibrilho	5,79	0,29		

Sabe-se que a profundidade de carbonatação tende a aumentar ao passar do tempo em todos os ambientes de exposição. Porém, ao analisar a Figura 25, observa-se que a profundidade de carbonatação diminuiu ou manteve-se praticamente constante em algumas leituras, em especial no ambiente externo desprotegido.

Isso pode ter ocorrido devido à falta de aplicação de uma camada confinante de parafina na face em que os corpos de prova foram fraturados após a leitura da profundidade de carbonatação em cada idade, fazendo assim com que a umidade do corpo de prova variasse ao longo de sua extensão, além de alterar suas condições de exposição.

Outro fator que pode ter causado essa diminuição da profundidade de carbonatação ao decorrer do tempo são os erros do equipamento, uma vez que o paquímetro digital foi trocado entre as leituras. Também se citam os erros do operador, tendo em vista a mínima variação da profundidade de carbonatação entre as leituras.

Em especial no ambiente externo desprotegido, as amostras expostas ficaram sobre ação direta dos raios solares, o que causou o derretimento e a fratura da parafina nesses corpos de prova. Para evitar a perda da proteção contra a entrada de CO<sub>2</sub> oferecida pela parafina, optou-se por envolver as faces do corpo de prova com uma película de filme PVC, conforme mostrado na Figura 27 (A e B).

Porém, a película de PVC fez com que a água da chuva adentrasse no seu interior e ficasse armazenada por longos períodos, mantendo assim, as amostras saturadas e impedindo a entrada de CO<sub>2</sub> pelos seus poros e, conseqüentemente, a reação de carbonatação. Logo, para exposição natural ao CO<sub>2</sub>, não se recomenda o uso de parafina como material de impermeabilização da amostra.

Figura 27: Deslocamento da parafina (A) e proteção com película de filme PVC(B)



Tomando-se em conta que a leitura ao 28 dias da amostra sem proteção é a leitura inicial do experimento, comparando os resultados da profundidade de carbonatação aos 28 dias nas amostras de referência, e aos 64 dias nas amostras com sistema de proteção superficial, é possível perceber que as amostras que possuíam proteção superficial, em especial, com tinta acrílica acetinada e semibrilho aos 64 dias possuíam uma profundidade de carbonatação inferior as das amostras de referência (Tabela 13), o que não deveria acontecer, tendo em vista o notável espaçamento de tempo entre a leitura dos dados.

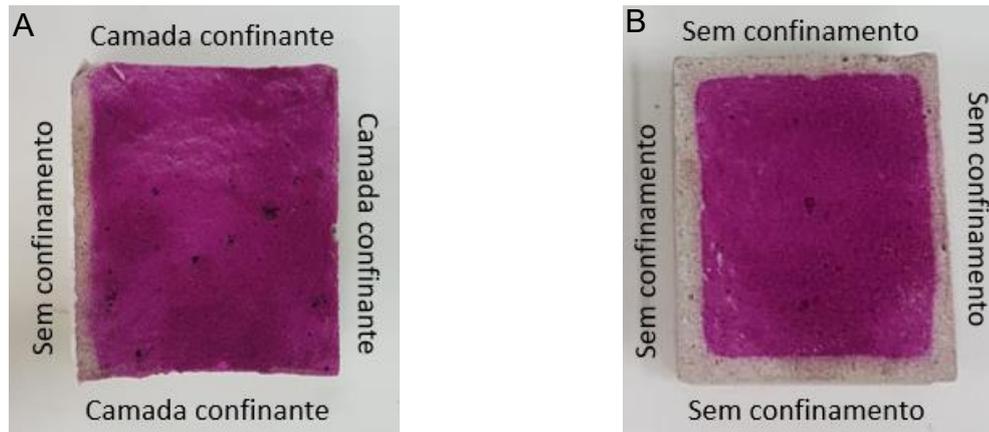
Tabela 13: Profundidade de carbonatação aos 28 e 64 dias para amostras de referência e com proteção superficial respectivamente

Ambiente de exposição	Dias	Profundidade de carbonatação (mm)			
		LI	Tipo de proteção		
			Sem proteção	Acetinada	Semibrilho
Interno	28	4,62	4,62	-	-
	64	-	9,78	4,65	4,36
Externo protegido	28	7,97	7,97	-	-
	64	-	13,52	6,97	6,61
Externo desprotegido	28	7,33	7,33	-	-
	64	-	10,59	5,24	5,79

LI- Leitura inicial, em amostra sem proteção superficial e sem proteção lateral com parafina.

A explicação para essa inconsistência nos resultados, é o confinamento devido a aplicação de parafina que as amostras com proteção superficial receberam aos 7 dias, enquanto as de referência não receberam proteção em nenhuma face, tornando assim, essas amostras muito mais suscetíveis aos fatores ambientais e, desta forma, acelerando sua velocidade de carbonatação quando comparadas às que possuíam proteção com parafina (Figura 28 A e B). Sendo assim, recomenda-se que em estudos futuros essa questão de preparo de amostra seja considerada.

Figura 28: Carbonatação em amostra com (A) e sem proteção de parafina (B)



Também, como em superfícies protegidas com pintura imobiliária a difusão de  $\text{CO}_2$  é muito lenta, tem-se a demanda de tempos elevados de exposição, na escala de anos, para se verificar os efeitos deste tratamento quando em ambiente natural (não acelerado).

Tendo em vista os resultados não conclusivos do estudo de exposição natural ao  $\text{CO}_2$  das amostras com proteção superficial, fez o ensaio acelerado de carbonatação, cujos resultados são apresentados e discutidos na sequência.

#### 4.1.2 Exposição em câmara acelerada

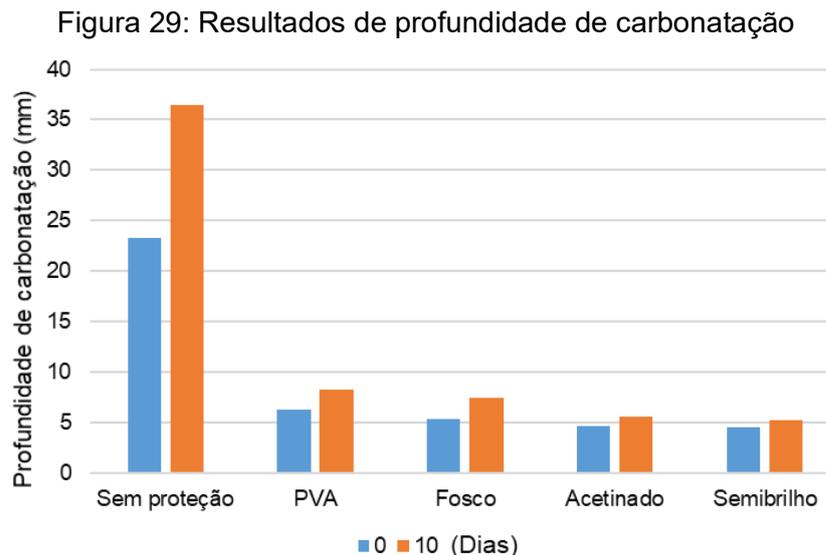
As leituras de profundidade de carbonatação das amostras expostas em ambiente controlado, foram realizadas no momento antes de iniciar a exposição (LI) e aos  $10^8$  dias após o início da exposição. Os resultados podem ser observados na Tabela 14 e na Figura 29.

Tabela 14: Profundidade de carbonatação em ambiente acelerado

Ambiente	Proteção	Idade (dias)	
		LI*	10
Câmara de carbonatação	Sem proteção	23,28	36,46
	PVA	6,29	8,20
	Fosco	5,32	7,40
	Acetinado	4,63	5,60
	Semibrilho	4,52	5,27

\* Após 220 dias da execução dos corpos de prova.

<sup>8</sup> Não foi possível realizar demais leituras devido a pandemia de COVID-19.



Ao analisar os resultados de profundidade de carbonatação em ambiente acelerado, observa-se que em apenas 10 dias as amostras sem proteção superficial apresentaram um avanço da profundidade de carbonatação de 13,18 mm, resultado muito superior as demais amostras com proteção superficial do tipo pintura látex PVA, acrílica fosca, acetina e semibrilho que apresentaram uma evolução da profundidade de carbonatação de 1,92 mm, 2,09 mm, 0,97 mm e 0,75 mm respectivamente.

Estes resultados, com exceção das amostras com proteção superficial do tipo acrílica fosca, condizem com os encontrados em ensaios no ambiente natural, onde as amostras sem proteção superficial apresentam uma maior velocidade de carbonatação, seguida pelas amostras com proteção do tipo látex PVA, e pelas amostras com proteção do tipo acrílica. Esta tendência da proteção superficial do tipo látex PVA permitir uma maior difusão de  $\text{CO}_2$  quando comparada com as tintas acrílicas pode ser explicada através do ensaio de TG/DTG realizado (Figura 11), o qual mostra que as tintas látex PVA apresentam uma menor quantidade de base polimérica em sua constituição, enquanto as tintas acrílicas apresentam quantidades próximas entre si, sendo que a tinta acrílica semibrilho é a que apresenta as maiores quantidades de base polimérica.

A explicação para as amostras com proteção superficial do tipo pintura acrílica fosca, apresentarem uma profundidade de carbonatação acima da esperada, se deve ao fato de fissuras observadas na parafina causadas pelo faturamento dos corpos de prova durante a leitura de referência, e desta forma comprometendo a proteção frente a difusão de  $\text{CO}_2$  nessas áreas.

## 4.2 ESTIMATIVA DA CAPTURA DE CO<sub>2</sub>

### 4.2.1 Por meio da profundidade de carbonatação

Para realizar a estimativa da captura de CO<sub>2</sub> por meio da profundidade de carbonatação, primeiramente necessita-se determinar qual a área superficial de alvenaria pode ser revestida com 1 m<sup>3</sup> de argamassa. Para isso foram elaborados dois cenários, o primeiro considerando uma espessura de 37,5 mm<sup>9</sup> para o revestimento e o segundo considerando uma espessura de 20mm<sup>10</sup> conforme recomendações da NBR 13749 (ABNT, 2013). Levando em consideração a espessura de 37,5 mm chegou-se a uma relação de 26,67 m<sup>2</sup>/ m<sup>3</sup>, já para a espessura de 20 mm chegou-se a uma relação de 50 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>.

Com a definição da área superficial exposta à presença de CO<sub>2</sub>, do consumo de materiais para 1 m<sup>3</sup> de argamassa (Tabela 6), das composições químicas da cal e do cimento obtidas conforme o trabalho de (ANTONIO, 2018)<sup>11</sup> e da porcentagem de óxido de cálcio e magnésio totalmente carbonatáveis presente na cal e no cimento (tabela 9) é possível estimar através da Equação 12 a captura mínima, média e máxima de CO<sub>2</sub> para as argamassas com as variadas proteções superficiais, expostas nos diferentes ambientes naturais de exposição (64 e 190 dias) conforme observa-se nas Tabelas 15 e 16 e nas Figuras 30 e 31.

Tabela 15: Estimativa da captura de CO<sub>2</sub> em ambientes naturais (KgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>) e=37,5mm

Ambiente	Proteção*	64 dias			190 dias		
		Min.	Med.	Máx.	Min.	Med.	Máx.
Interno	Sem proteção	14,29	19,63	24,97	30,11	41,37	52,63
	PVA	7,86	10,79	13,73	9,11	12,52	15,93
	Fosco	7,07	9,71	12,35	8,01	11,00	14,00
	Acetinado	6,79	9,33	11,87	6,90	9,48	12,06
	Semibrilho	6,37	8,75	11,13	6,77	9,30	11,83
Externo protegido	Sem proteção	19,75	27,13	34,52	39,86	54,76	69,66
	PVA	12,98	17,83	22,69	18,26	25,08	31,90
	Fosco	11,61	15,96	20,30	10,68	14,67	18,66
	Acetinado	10,19	14,00	17,80	10,40	14,29	18,18
	Semibrilho	9,66	13,27	16,88	10,90	14,98	19,05

<sup>9</sup> Espessura equivalente a máxima profundidade de carbonatação para os corpos de prova adotados.

<sup>10</sup> A qual considera que a espessura admissível para o revestimento em paredes internas varia de 5 a 20 mm e para paredes externas de 20 a 30 mm.

<sup>11</sup> Devido a pandemia de COVID-19 não foi possível realizar o ensaio de composição química por espectrometria de fluorescência de Raios-X (FRX).

Ambiente	Proteção*	64 dias			190 dias		
		Min.	Med.	Máx.	Min.	Med.	Máx.
Externo desprotegido	Sem proteção	15,47	21,25	27,03	31,42	43,17	54,91
	PVA	9,88	13,57	17,26	10,18	13,99	17,79
	Fosco	8,67	11,91	15,15	9,32	12,80	16,29
	Acetinado	7,65	10,52	13,38	8,13	11,17	14,21
	Semibrilho	8,46	11,62	14,78	9,12	12,53	15,94

\* as amostras com proteção superficial ficaram em contato com o CO<sub>2</sub> até 28 dias

Tabela 16: Estimativa da captura de CO<sub>2</sub> em ambientes naturais (KgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>) e=20mm

Ambiente	Proteção*	64 dias			190 dias		
		Min.	Med.	Máx.	Min.	Med.	Máx.
Interno	Sem proteção	26,79	36,80	46,81	54,79	75,27	95,76
	PVA	14,73	20,24	25,74	17,12	23,52	29,92
	Fosco	13,25	18,20	23,15	15,02	20,63	26,24
	Acetinado	12,73	17,49	22,25	12,93	17,77	22,60
	Semibrilho	11,94	16,41	20,87	12,70	17,44	22,19
Externo protegido	Sem proteção	37,03	50,88	64,72	54,79	75,27	95,76
	PVA	24,34	33,44	42,54	34,23	47,03	59,82
	Fosco	21,39	29,39	37,39	20,02	27,50	34,99
	Acetinado	19,10	26,24	33,38	19,50	26,79	34,08
	Semibrilho	18,11	24,88	31,65	20,44	28,09	35,73
Externo desprotegido	Sem proteção	29,00	39,84	50,69	54,79	75,27	95,76
	PVA	18,44	25,34	32,23	19,28	26,49	33,70
	Fosco	16,25	22,33	28,40	17,48	24,01	30,54
	Acetinado	14,35	19,72	25,08	15,25	20,95	26,65
	Semibrilho	15,86	21,79	27,72	17,10	23,49	29,88

\* as amostras com proteção superficial ficaram em contato com o CO<sub>2</sub> até 28 dias

Figura 30: Estimativa da captura média de CO<sub>2</sub> aos 64 e 190 dias (e=37,5mm)

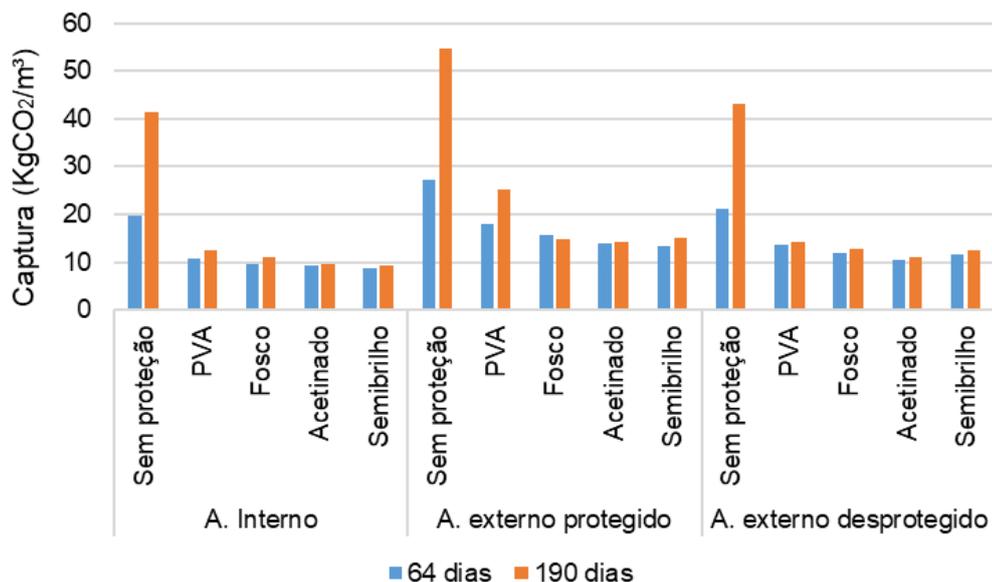
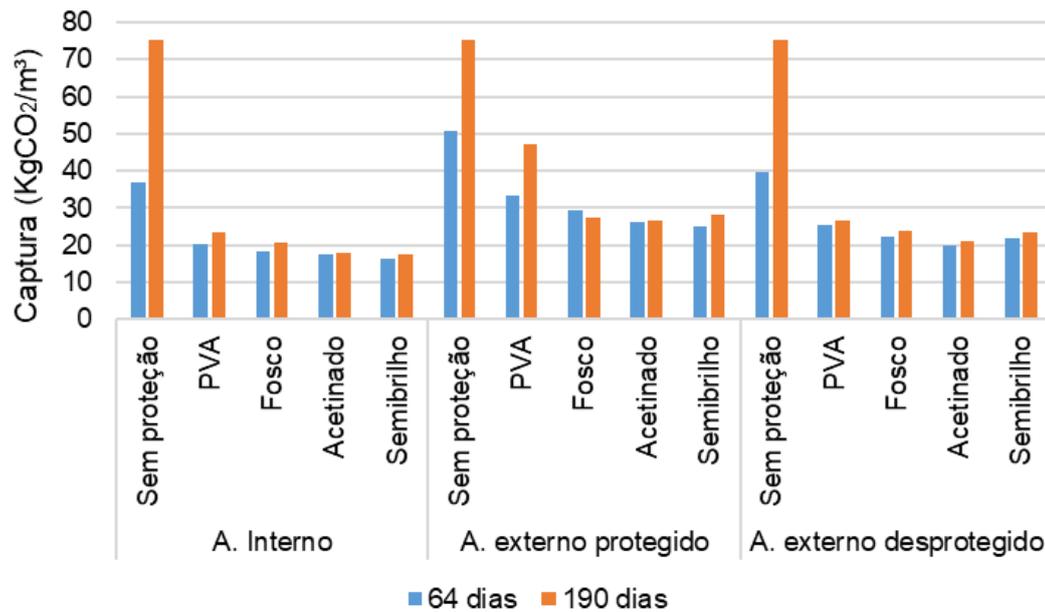


Figura 31: Estimativa da captura média de CO<sub>2</sub> aos 64 e 190 dias (e=20mm)

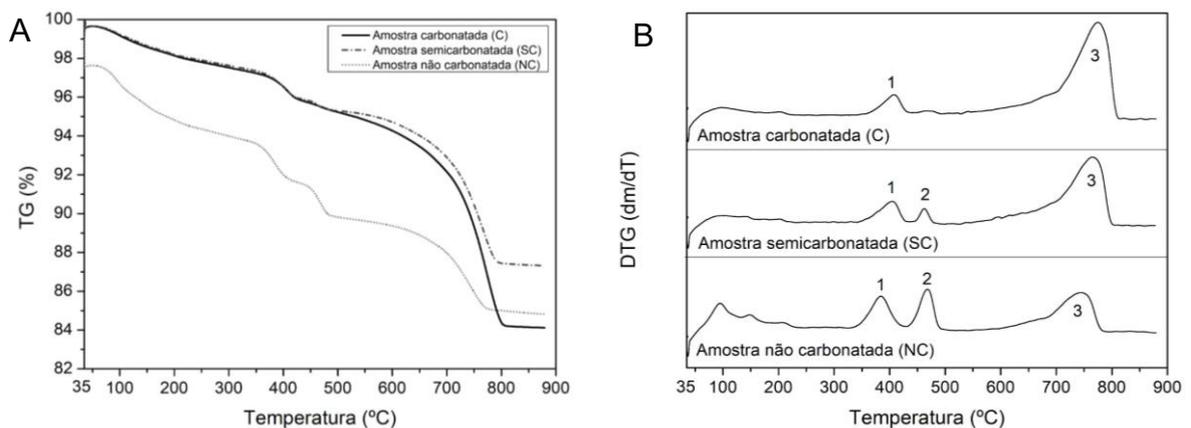


Considerando carbonatação ao longo do tempo, ou seja, carbonatação completa das amostras, tem-se uma estimativa de captura de CO<sub>2</sub> de 54,79 KgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> (mínima), 75,27 KgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> (média) e 95,75 KgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> (máxima).

#### 4.2.2 Por análise termogravimétrica (TG) e termogravimétrica derivada (DTG)

Os resultados da análise térmica podem ser observados na Figura 32 (A e B).

Figura 32: Curvas TG (A) e DTG (B) da argamassa referência (1:1:6) submetida à carbonatação natural



Analisando os resultados da Figura 32 pode-se observar que para as amostras retiradas das regiões não carbonatadas, existem 3 momentos em que a perda de massa é mais acentuada. O primeiro momento (ponto 1) ocorre para temperaturas entre 350°C e 420°C e corresponde a decomposição do hidróxido de magnésio ( $Mg(OH)_2$ ). O segundo momento (ponto 2) ocorre para temperaturas entre 420°C e 470°C e corresponde a decomposição do hidróxido de cálcio ( $Ca(OH)_2$ ) (MAZURANA, 2019). Já o terceiro momento (ponto 3) ocorre para temperaturas entre 650°C e 800°C e corresponde a decomposição do carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ) presente na argamassa (SCRIVENER; SNELLINGS; LOTHENBACH, 2016).

Para as amostras retiradas das regiões semicarbonatadas também pode-se observar 3 momentos em que a perda de massa é mais acentuada. Eles ocorrem nas mesmas faixas de temperatura (350°C a 420°C, 420°C a 470°C e 650°C a 800°C) para os encontrados nas amostras não carbonatadas, porém cabe ressaltar que para temperaturas de 350°C e 420°C, além da decomposição do hidróxido de magnésio ( $Mg(OH)_2$ ), ocorre também a decomposição do carbonato de magnésio ( $MgCO_3$ ) (MO; PANESAR, 2013).

Para as amostras retiradas da região carbonatada é possível observar 2 momentos em que a perda de massa é mais acentuada. O primeiro momento (ponto 1) ocorre para temperaturas entre 350°C e 420°C e corresponde a decomposição do carbonato de magnésio ( $MgCO_3$ ) e o segundo momento ocorre para temperaturas entre 650°C e 800°C e corresponde a decomposição do carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ). Os resultados obtidos em porcentagem e em  $KgCO_2/m^3$  podem ser observados na Tabela 17.

Tabela 17: Potenciais de captura de  $CO_2$  das argamassas avaliadas

Massa inicial (g)	$CaCO_3$ capturado (%)	$MgCO_3$ capturado (%)	Captura total de $CO_2$	
			(%)	( $KgCO_2/m^3$ )
50,08	14,30	3,39	8,05	70,61

Comparando os resultados do potencial de captura de  $CO_2$  pelo método da normativa BRE EM 15804 (BRE, 2014) considerando o cenário médio e por análise térmica constata-se que ambos os métodos apresentam valores muito próximos 75,27  $KgCO_2/m^3$  e 70,61  $KgCO_2/m^3$ , respectivamente.

#### 4.3 EMISSÕES DE CO<sub>2</sub>

Para estimar a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida para a produção das argamassas, primeiramente necessitou-se estimar as emissões máximas, médias e mínimas decorrentes da produção do cimento e da cal.

Para o cimento, a NBR 16697 (ABNT, 2018) estabelece que a porcentagem de clínquer presente no cimento CP IV-32 RS varia entre 45% (caso de emissões mínimas) a 85% (caso de emissões máximas). Considerando tais extremos, adotou-se 65% de clínquer como o caso de emissões médias provindas do cimento. De posse dessas informações e dos dados de emissões para a produção do clínquer (Tabela 7), foi possível estimar as emissões para a produção de 1 tonelada de cimento, como pode-se observar na Tabela 18.

Tabela 18: Emissões de CO<sub>2</sub> devido a produção de 1 tonelada de cimento CP IV-32 RS

Emissões do clínquer (KgCO <sub>2</sub> /t <sub>clínquer</sub> )	Emissões para o cimento conforme o teor de clínquer (KgCO <sub>2</sub> /t <sub>cimento</sub> )	
	866	Máximas (85%)
Médias (65%)		571,62
Mínimas (45%)		398,42

Já para a produção da cal, tem-se conforme a Tabela 10 que são emitidos de 766 KgCO<sub>2</sub>/t<sub>cal</sub> (caso de emissões máximas) a 466 KgCO<sub>2</sub>/t<sub>cal</sub> (caso de emissões mínimas). Sendo assim, adotou-se um valor de 616 KgCO<sub>2</sub>/t<sub>cal</sub> para o caso de emissões médias provindas da produção de 1 tonelada de cal.

Com posse dos valores acima apresentados, dos valores de emissões devido a produção do agregado natural, da quantidade necessária de cada material para a produção de 1m<sup>3</sup> de argamassa (Tabela 6) é possível estimar as emissões de CO<sub>2</sub> para a produção de 1m<sup>3</sup> de argamassa conforme observa-se na Tabela 19.

Tabela 19: Emissões de CO<sub>2</sub> devido a produção da argamassa

Quantidade	Emissão (KgCO <sub>2</sub> )	
	1m <sup>3</sup> de argamassa	Máxima
Média		208,7
Mínima		170,3

#### 4.4 BALANÇO DE EMISSÕES DE CO<sub>2</sub>

O balanço de emissões foi calculado para 190 dias (exposição em ambiente natural) levando em consideração a espessura de 37,5 mm, as emissões médias para a produção das argamassas, assim como, a estimativa de captura média para cada ambiente de exposição como pode-se observar na Tabela 20.

Tabela 20: Balanço de emissões para as amostras expostas em ambientes naturais

Ambiente	Proteção	Balanço de emissões (BE)	Balanço percentual (BE%)
Interno	Sem proteção	167,33	19,82
	PVA	196,18	6,00
	Fosco	197,70	5,27
	Acetinado	199,23	4,54
	Semibrilho	199,40	4,46
Externo protegido	Sem proteção	153,95	26,24
	PVA	183,62	12,02
	Fosco	194,04	7,03
	Acetinado	194,41	6,85
	Semibrilho	193,73	7,18
Externo desprotegido	Sem proteção	165,54	20,68
	PVA	194,58	6,70
	Fosco	195,90	6,14
	Acetinado	197,53	5,35
	Semibrilho	196,18	6,00

Analisando a Tabela 20, pode-se constatar que, aos 190 dias, as argamassas sem nenhum tipo de proteção superficial apresentam um balanço de emissões muito superior as argamassas que possuem algum tipo de proteção para ambientes naturais.

Já as amostras com proteção superficial possuem um balanço de emissões muito próximo numa mesma data, sendo que as amostras proteção de tinta PVA apresentam um balanço levemente superior em relação as amostras com proteção de tinta acrílica.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista o objetivo de avaliar a influência da proteção superficial do tipo pintura imobiliária na captura de CO<sub>2</sub> devido à carbonatação de argamassas de revestimento e analisando os resultados obtidos, tem-se as seguintes conclusões.

- a) A proteção superficial do tipo pintura imobiliária representa uma barreira para a difusão do CO<sub>2</sub> e, conseqüentemente para a carbonatação. Aos 190 dias de exposição no ambiente externo protegido, as amostras com proteção acrílica apresentaram uma redução média de 71,24% e 273,89% em relação as amostras com proteção superficial latéx PVA e sem proteção superficial respectivamente.
- b) A difusão de CO<sub>2</sub> foi afetada conforme a qualidade da tinta. A tinta latéx PVA permitiu maior difusão de CO<sub>2</sub> quando comparada com as diferentes qualidades de tinta acrílica.
- c) A velocidade de propagação da frente de carbonatação foi maior na carbonatação acelerada, seguido pelo ambiente externo protegido, externo desprotegido e interno. Isso porque ao variar os ambientes, alteram-se as condições de exposição que as amostras estão submetidas, em especial, umidade relativa, exposição à chuva e concentração de CO<sub>2</sub>, que são fatores que influenciam no fenômeno de carbonatação.
- d) A difusão de CO<sub>2</sub> nas argamassas expostas na câmara de carbonatação foi maior nas amostras sem proteção superficial, seguida pelas amostras com proteção superficial do tipo latéx PVA e acrílicas respectivamente. Aos 10 dias de exposição as amostras com proteção acrílica apresentaram uma redução média de 34,7% e 498,5% em relação às amostras com proteção superficial latéx PVA e sem proteção superficial respectivamente.
- e) Ao avaliar a estimativa do potencial de captura de CO<sub>2</sub> obtida através do método proposto na normativa BRE EM 15804 (BRE, 2014) considerando o cenário médio e da análise termogravimétrica (TG/DTG)

conclui-se que os valores são muito próximos 75,27 KgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> e 70,61 KgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> respectivamente.

- f) Por representar uma barreira para a propagação da frente de carbonatação, a presença de proteção superficial do tipo pintura imobiliária faz com que numa mesma idade o balanço de emissões seja inferior. Como por exemplo, no ambiente externo protegido aos 190 dias as amostras sem proteção superficial já haviam reabsorvido cerca de 26,24% do CO<sub>2</sub> emitido para sua produção, enquanto as amostras com pintura PVA haviam reabsorvido cerca de 12,02% e as amostras com pintura acrílica haviam reabsorvido cerca de 7,01%.

O sistema desenvolvido para avaliar a influência da proteção superficial do tipo pintura imobiliária, com exceção do ambiente externo desprotegido foi, de maneira geral, eficiente, uma vez que as faces protegidas com parafina não sofreram o fenômeno da carbonatação. Cabe ressaltar, que a realização de nova impermeabilização com parafina das faces fraturadas após cada leitura é fundamental.

Sugere-se para futuros trabalhos, realizar as leituras de profundidade de carbonatação com imagens através do contorno de áreas como forma de buscar uma maior precisão e evitar erros do equipamento e do operador, recomenda-se também realizar a aplicação de parafina entre cada leitura para que não se altere as condições do ensaio, desenvolver corpos de prova maiores permitindo um maior número de leituras e por fim acompanhar a variação da umidade, da temperatura e da concentração de CO<sub>2</sub> no ambiente de exposição ao decorrer do ensaio.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 2550: Standard Test Method for Thermal Stability by Thermogravimetry**. West Conshohocken (EUA), 2017.

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 11702: Tintas para construção civil — Tintas, vernizes, texturas e complementos para edificações não industriais — Classificação e requisitos**. Rio de Janeiro. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13245: Tintas para construção civil — Execução de pinturas em edificações não industriais — Preparação de superfície**. Rio de Janeiro. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13277: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água**. Rio de Janeiro. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado**. Rio de Janeiro. 2005.

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 13749: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Especificação**. Rio de Janeiro. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15079-1: Tintas para construção civil - Requisitos mínimos de desempenho. Parte 1: Tinta látex fosca nas cores claras**. Rio de Janeiro. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15079-2: Tintas para construção civil - Requisitos mínimos de desempenho. Parte 2: Tintas látex semiacetinada, acetinada e semibrilho nas cores claras**. Rio de Janeiro. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento**

**Portland – Requisitos.** Rio de Janeiro. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7200: Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Procedimento.** Rio de Janeiro. 1998.

ANDRADE, C.; SANJUÁN, M. A. **Updating Carbon Storage Capacity of Spanish Cements.** *Sustainability*, Basileia, V.10, 2018.

ANTONIO, I. O. **Avaliação da Captura de CO<sub>2</sub> Devido À Carbonatação de Argamassas de Revestimento Produzidas com RCD.** 2018. 59f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2018.

BARY, B.; SELIER, A. Coupled moisture – carbon dioxide – calcium transfer model for carbonation of concrete. **Cement and Concrete Research.** V.34, p. 1859-1872, 2004.

BAUTISTA, A.; VELASCO, F.; TORRES-CARRASCO, M. Influence of the Alkaline Reserve of Chloride-Contaminated Mortars on the 6-Year Corrosion Behavior of Corrugated UNS S32304 and S32001 Stainless Steels. **Metals.** V. 9, n. 6, p. 19, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/met9060686>.

BRE. **Global, Product Category Rules for Type III environmental product declaration of construction products.** EN 15804:2012+A1:2013. PN514. 2014

CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE, CSI. 2014. Disponível em: < <https://www.wbcsd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative> >. Acesso em: 17 junho de 2019.

CHINCHÓN-PAYÁ, S.; ANDRADE, C.; CHINCHÓN, S. Indicator of carbonation front in concrete as substitute to phenolphthalein. **Cement and Concrete Research.** V.82, p. 87–91, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.12.010>.

COSTA, M. R. M. M.; PACHECO, A. P. G. Avaliação do potencial de carbonatação de cales hidratadas em pasta. **Revista Matéria.** v.23, n.01, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620170001.0286>.

CULTRONE, G.; SEBASTIÁN, E.; HUERTAS, M. Ortega. Forced and natural carbonation of lime-based mortars with and without additives: Mineralogical and textural changes. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 35, n. 12, p. 2278–2289, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.12.012>

CUNHA, A. C. Q.; HELENE, P. R. L. **Despassivação das armaduras de concreto por ação da carbonatação.** 2001. Boletim Técnico - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

DESPOTOU, E.; SHTIZA, A.; SCHLEGEL, T.; VERHELST, F. Literature study on the rate and mechanism of carbonation of lime in mortars. **Mauerwerk**, [s. l.], v. 20, n. 2, pp. 124–137, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/dama.201500674>

FURCAS, C.; BALLETO, G.; NAITZA, S.; MAZZELLA, A. Evaluation of CO<sub>2</sub> uptake under mild accelerated carbonation conditions in cement-based and lime-based mortars. **Advanced Materials research**, pp. 57-61, jun 2014. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.980.57>

GALAN, I.; ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M.. Thermogravimetric analysis for monitoring carbonation of cementitious materials. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**. V. 110, pp. 309-319, 2012. DOI: 10.1007/s10973-012-2466-4.

GASPAR, H. A. C. **Captura e armazenamento de CO<sub>2</sub>**. Dissertação (Mestrado em Energia e Bioenergia), 2014. 178f. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2014.

HELENE, P. R. do. L. **Contribuição ao estudo de corrosão em armaduras de concreto armado**. Tese (Doutorado em Engenharia), 1993, 242f. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13320**: Particle size analysis - Laser diffraction methods. Genebra, 2009.

IPCC, 2007: **Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribuição dos Grupos de Trabalho I, II e III para o Quarto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima**. IPCC, Genebra, Suíça, 104 pp.

JOHN, V. M. Materiais de Construção e o Meio Ambiente. In: ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2017.

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. 499p. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/283274115\\_ECONOMIA\\_DE\\_BAIXO\\_CAR\\_BONO\\_Impactos\\_de\\_Novos\\_Marcos\\_Regulatorios\\_e\\_Tecnologias\\_Sobre\\_a\\_Economia\\_Brasileira/link/5ea8b41392851cb26762de5a/download](https://www.researchgate.net/publication/283274115_ECONOMIA_DE_BAIXO_CAR_BONO_Impactos_de_Novos_Marcos_Regulatorios_e_Tecnologias_Sobre_a_Economia_Brasileira/link/5ea8b41392851cb26762de5a/download). Acesso em: 20 junho 2019

JUNGES, A. L.; SANTOS, V. Y.; MASSONI, N. T. Efeito estufa e aquecimento global: Uma abordagem Conceitual a partir da Física para Educação Básica. **Experiências em Ensino de Ciências**. V.13, n.5, 2018.

KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao Estudo da Carbonatação em Concretos e Argamassas Compostas com Adição de Sílica Ativa**. 2002, 199f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

LI, P. S.; WANG, Q.; XU, Q.; YU, W.; YUE, N.; LIANG, Z.; DONG, X.; HU, S. Combustion reaction mechanism of four typical Chinese biomass by TG and DTG. **Asia-Pacific journal of chemical engineering**. V. 7, pp. 209-215, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1002/apj.616>.

LO, T. Y.; LIAO, W.; WONG, C. K.; TANG, W. Evaluation of carbonation resistance of paint coated concrete for buildings. **Construction and Building Materials**. V. 107, pp. 299-306, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.026>.

LO, T. Y.; LEE, H. M. Curing effects on carbonation of concrete using a phenolphthalein indicator and Fourier-transform infrared spectroscopy. **Building and Environment**. V. 37(5), pp. 507–514, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00052-X](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00052-X).

MATTANA, A. J. **Estudos de cales hidratadas de mercado – caracterização química, física e comportamento reológico da pasta**. Dissertação (Mestrado em engenharia da construção civil) 2013, 146f. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

MAZURANA, L. **Captura de CO<sub>2</sub> em argamassas de revestimento através da carbonatação natural**. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais), 2019, 120f. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2019.

MAZURANA, L.; POSSAN, E.; BITTENCOURT, P. R. S. **Carbonation and CO<sub>2</sub> uptake in rendering mortars produced with recycled construction and demolition waste**. [S. l.: s. n.], 2019. DOI: <https://doi.org/10.21041/conpat2019/v1cc336>.

MEDEIROS, M. H. F.; RAISDORFER, J. W.; HOPPE FILHO, J.; MEDEIROS-JUNIOR, R. A. Partial replacement and addition of fly ash in Portland cement: influences on carbonation and alkaline reserve. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, [s. l.], V. 2, n. 1, pp. 1–9, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41024-017-0023-z>.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÃO E COMUNICAÇÕES - MCTIC. Secretaria e Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. **3ª Comunicação nacional do Brasil à convenção-quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima**. Brasília, 2016.

MO, L.; PANESAR, D. K. Accelerated carbonation - A potential approach to sequester CO<sub>2</sub> in cement paste containing slag and reactive MgO. **Cement and Concrete Composites**. V. 43, pp. 69-77, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.07.001>

NEVES JUNIOR, A.; DWECK, J.; FILHO, R. D. T.; ELLIS, B.; LI, V. Determination of CO<sub>2</sub> capture during accelerated carbonation of engineered cementitious composite pastes by thermogravimetry. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**. V. 138, n. 1, pp. 97-109, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08210-y>

ORTOLAN, T.L.P.; SQUIAVON, J. Z.; ANDRADE, J. J. de. O. Análise Da Carbonatação de Argamassas de Cimento Portland Produzidas com Agregados Miúdos Reciclados de Construção e Demolição (Rcd) Através de Ensaios de Exposição Natural. **Anais... 57º Congresso Brasileiro de Concreto - IBRACON**, Bonito, 2015.

OTANI, L.B.; PEREIRA, A.H.A. Estimativa do módulo de elasticidade estático de

concretos utilizando a Técnica de Excitação por Impulso. **Informativo técnico-científico ITC-07 / ATCP Engenharia Física (Divisão Sonelastic)**, v. 1.2, p. 38, 2017.

PADE, C.; GUIMARAES, M. The CO<sub>2</sub> uptake of concrete in a 100 year perspective. **Cement and Concrete Research**. V. 37, pp. 1384-1356, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.06.009>.

PAULETTI, C.; POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. C. Carbonatação acelerada : estado da arte das pesquisas no Brasil. **Ambiente Construído**. V. 7, n. 4, pp. 7-20, 2007.

POPESCU, C. M.; TIBIRNA, C. M.; VASILE, C. Thermogravimetric analysis of photodegraded acrylic coated lime wood. **Photochemistry and Photobiology**. V. 87, n. 4, pp. 779–785, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.2011.00924.x>.

POSSAN, E.; THOMAZ, W. A.; ALEANDRI, G. A.; FELIX, E. F.; SANTOS, A. C. P. Co<sub>2</sub> uptake potential due to concrete carbonation: A case study. **Case studies in construction materials, Elsevier**. V. 6, p. 147–161, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.01.007>.

RESTREPO, I.; MEDINA, C.; MERUANE, V.; AKBARI-FAKHRABADI, A.; FLORES, P.; RODRÍGUEZ-LLAMAZARES, S. The effect of molecular weight and hydrolysis degree of poly(vinyl alcohol)(PVA) on the thermal and mechanical properties of poly(lactic acid)/PVA blends. **Polímeros**. V. 28, n. 2, p. 169–177, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/0104-1428.03117>

RIGO, E. **Avaliação da captura de CO<sub>2</sub> devido à carbonatação de concretos com resíduos de construção de demolição**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal da Integração Latino Americana, Foz do Iguaçu, 2019.

ROCHA, J. C.; XAVIER, L. L. **Materiais de Construção Civil**. Apostila do curso de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.

RUFATTO, M. E. **Estimativa da captura de CO<sub>2</sub> devido à carbonatação natural de argamassas de revestimento**. Trabalho de Conclusão de Curso, 2019, 89 f. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2019.

SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. **A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials**. Boca Raton, FL. Broken Sound Parkway NW. CRC Press. 2016.

Sindicato Nacional da Indústria da Construção - SNIC. **ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono na indústria do cimento brasileira até 2050**. Rio de Janeiro, 2019.

Sindicato Nacional da Indústria do Cimento - SNIC. Disponível em: <<http://snic.org.br/numeros-industria.php>>. Acesso em: 07 junho de 2019.

STANMORE, B. R.; GILOT, P. Review - Calcination and Carbonation of limestone during thermal cycling for CO<sub>2</sub> sequestration. **Fuel Processing Technology**. V. 86, n. 16, pp. 1708-1743, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2005.01.023>.

TAO, L.; ZHAO, G.; QIAN, J.; QIN, Y. TG-FTIR characterization of pyrolysis of waste mixtures of paint and tar slag. **Journal of Hazardous Materials**. V. 175, n. 1-3, pp. 754-761, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.10.073>.

THIERY, M.; VILÃO, G.; DANGLA, P.; PLATRET, G. Investigation of the carbonation front shape on cementitious materials: Effects of the chemical kinetics. **Cement and Concrete Research**. V. 37, p. 1047-1058, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.04.002>.

WBCDS. **GNR Project**. Weighted average excluding CO<sub>2</sub> from on-site power generation Grey clinker, 2016b. Disponível em: < <https://www.wbcdcement.org/GNR-2016/>>. Acesso em: 29 junho 2019

WERLE, A. P.; KAZMIERCZAK, C. S.; KULAKOWSKI, M. P. Carbonatação em concretos com agregados reciclados de concreto. **Ambiente construído**. Porto Alegre, 2011, v. 11, n. 2, p. 213-228. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-86212011000200015>.

XI, F. *et al.* Substantial Global Carbon Uptake by Cement Carbonation. **Nature Geoscience**, 2016, V. 9, pp. 880-883. DOI: 10.1038/NGEO2840.

ZORNOZA, E.; PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V.; GARCÉS, P. The carbonation of OPC mortars partially substituted with spent fluid catalytic catalyst (FC3R) and its influence on their mechanical properties. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 23, n. 3, p. 1323-1328, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.07.024>