

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS MEDIANEIRA**

MEIRE CLAUDIA BARBOSA

**EFEITO DA PROTEÇÃO SUPERFICIAL (PINTURA IMOBILIÁRIA)
NA DIFUSÃO E CAPTURA DE CO₂ EM ARGAMASSAS DE
REVESTIMENTO**

DISSERTAÇÃO

MEDIANEIRA

2021

MEIRE CLAUDIA BARBOSA

**EFEITO DA PROTEÇÃO SUPERFICIAL (PINTURA IMOBILIÁRIA)
NA DIFUSÃO E CAPTURA DE CO₂ EM ARGAMASSAS DE
REVESTIMENTO**

**Effect of surface protection (property painting) on the diffusion and capture
of CO₂ in coating mortars**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Tecnologias Ambientais, do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais – PPGTAMB – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR –, Campus Medianeira.

Discente: Meire Claudia Barbosa

Orientador: Prof. Dr. Paulo Rodrigo Stival Bittencourt

Coorientador (a): Prof^a. Dra. Edna Possan

MEDIANEIRA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos.

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Medianeira**



MEIRE CLAUDIA BARBOSA

EFEITO DA PROTEÇÃO SUPERFICIAL (PINTURA IMOBILIARIA) NA DIFUSÃO E CAPTURA DE CO2EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Tecnologias Ambientais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Tecnologias Ambientais.

Data de aprovação: 06 de Setembro de 2021

Prof Paulo Rodrigo Stival Bittencourt, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Alex Neves Junior, Doutorado - Universidade Federal de Mato Grosso (Ufmt)

Prof.a Katia Regina Garcia Punhagui, Doutorado - Universidade Federal da Integração Latino-Americana (Unila)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 06/09/2021.

Dedico este trabalho a minha família,
em especial a minha filha Maria Teresa,
luz que guia minha jornada.

AGRADECIMENTOS

Às Marias que compõe minha base, amada mãe (*in memorian*) que de onde estiver me guia e acompanha e me enche de forças para levantar e prosseguir, a minha Maria, motivo pelo qual tento todo dia me superar, filha meu coração e meus melhores sorrisos são sempre por ti. Minhas manas, que são a luz no meu caminho, eu as amo mais que a mim.

Aos meus Joãos, o meu amado pai que é que está sempre aí quando se necessita e é meu maior incentivador na vida e na engenharia, ao meu sobrinho querido que tanto amo.

Ao meu companheiro de vida Gerson Kaiser, quem me acompanha e incentiva e sem o qual as coisas tornar-se-iam mais difíceis, aos meus sogros que compartilham comigo a família.

A minha orientadora professora Edna Possan pelo carinho, ensinamentos e compreensão a mim dedicados, sempre auxiliando da maneira mais humana possível, professora muitíssimo obrigada!

Ao meu orientador professor Paulo pela atenção e ensinamentos a mim dedicado.

Aos amigos que entenderam as ausências.

Aos colegas de laboratório que me auxiliaram com dicas, atenção dedicada e que se tornaram essenciais ao desenvolvimento deste trabalho, Eduardo, Dalila, Ivan, todos que direta e indiretamente me auxiliaram nessa jornada o meu muito obrigada. Ao colega Gabriel Pedry que primeiro caminhou o caminho das pedras e me deu base para o desenvolvimento do trabalho.

E claro a Deus que me mantém de pé para vencer outro e outro dia mais.

A todos o meu muito obrigada!

RESUMO

À indústria da construção civil atribui-se grande parcela dos impactos ambientais devido a extração e consumo de recursos naturais em larga escala, modificações dos espaços construídos, consumo energético, geração de resíduos e emissões. No processo produtivo do cimento, tem-se a emissão de CO₂ pela descarbonatação da rocha calcária, queima de combustíveis fósseis e eletricidade nas fábricas, sendo a indústria cimenteira responsável por ~7% das emissões mundiais de CO₂ antropogênico. Entretanto, materiais à base de cimento, têm como possibilidade capturar CO₂ pelo processo de carbonatação, o qual ocorre por meio da reação do CO₂ atmosférico com hidróxidos presentes na matriz cimentícia, precipitando carbonato de cálcio. O potencial de captura por esta reação depende de fatores, como a difusibilidade do CO₂ através da matriz. Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo avaliar o efeito da proteção superficial do tipo pintura na difusão de CO₂ em argamassas de revestimento. Para tanto, foram produzidas argamassas (1:1:6 e 1:2:9 cimento:cal;areia), que após 28 dias de produzidas receberam acabamento do tipo pintura imobiliária, variando a proteção em função da base (PVA e acrílica), do acabamento (semibrilho, fosco) e da cor (branca e cinza). As argamassas (corpos de prova de 7x9x16cm e placas 40x40x2,5cm) sofreram carbonatação natural e acelerada, tendo a profundidade de carbonatação avaliada aos 28, 101, 127 e 164 dias. A fixação de carbono foi avaliada aos 28 dias através do ensaio de análise termogravimétrica. Por meio de teste estatístico evidenciou-se diferença significativa nos diferentes tratamentos, em que a difusão de CO₂ foi maior para a matriz de referência (sem proteção), seguida da matriz com proteção de base PVA, acrílico fosca, e acrílico semibrilho em razão de uma maior proteção atribuída ao substrato devido às tintas. Para um mesmo tempo de exposição (164 dias) as argamassas sofreram diminuição na velocidade de carbonatação quando comparadas com as de referência. A redução foi de até 3,6 vezes para argamassas com pintura acrílica standard semibrilho, de 2,5 a 2,0 vezes menores para argamassas com proteção acrílica de acabamento fosco, independentemente da cor. Na tinta PVA de menor redução, a velocidade de carbonatação foi 1,20 vezes menor que a de referência. Constatou-se, o efeito de redução da velocidade de carbonatação e fixação de carbono, devido a uma menor difusão de CO₂ em amostras com proteção superficial. Os sistemas de proteção de base PVA são mais permeáveis ao CO₂, cuja aplicação deve ser preferida para uma maior captura de carbono a curto prazo. Entretanto, se considerado o ciclo de vida dos revestimentos (20 a 40 anos) pode se afirmar que todos os sistemas podem carbonatar por completo ao logo do tempo, independente da proteção aplicada, considerando uma espessura média de 20 mm. Logo, os estudos de captura de carbono em argamassas de revestimento devem ser conduzidos considerando um menor coeficiente de difusão de CO₂ quando existir uma barreira de proteção aplicada à superfície do material.

PALAVRAS-CHAVE: sistema de pintura; sequestro de carbono; medidas mitigatórias; tintas imobiliárias.

ABSTRACT

The construction industry is responsible for a large part of the environmental impacts due to the extraction and consumption of natural resources on a large scale, changes in built spaces, energy consumption, waste generation and emissions. In the cement production process, CO₂ is emitted by decarbonating limestone, burning fossil fuels and electricity in factories, with the cement industry being responsible for ~7% of world emissions of anthropogenic CO₂. However, cement-based materials can capture CO₂ through the carbonation process, which occurs through the reaction of atmospheric CO₂ with hydroxides present in the matrix, precipitating calcium carbonate. The potential for capture by this reaction depends on factors, such as the diffusibility of CO₂ through the cement-based matrix. In this context, the present work aims to evaluate the effect of paint-type surface protection on CO₂ diffusion in coating mortars. For this purpose, mortars were produced (1:1:6 and 1:2:9 cement:lime:sand), which 28 days after production received a real estate painting type surface finish, varying the ink base type (PVA and acrylic), finish (semi-gloss, matte) and color (white and grey). Mortar samples (7x9x16 cm specimens and 40x40x2.5 cm boards) underwent natural and accelerated carbonation, with the carbonation depth evaluated at 28, 101, 127 and 164 days. Carbon fixation was evaluated at 28 days through the thermogravimetric analysis test. A statistical test showed a significant difference in the different treatments, in which the diffusion of CO₂ was greater for the reference matrix (without protection), followed by the matrix with protection type PVA, matte acrylic, and semi-gloss acrylic due to a greater protection given to the substrate due to inks. For the same exposure time (164 days) the mortars suffered a decrease in the carbonation rate when compared to the reference ones. The reduction was up to 3.6 times for mortars with standard acrylic paint with a semi-gloss finish, from 2.5 to 2.0 times less for mortars with acrylic protection with a matte finish, regardless of color. In the lowest reduction PVA paint, the carbonation speed was 1.20 times slower than the reference mortar. The effect of reducing the carbonation velocity and carbon fixation was verified, due to the lower diffusion of CO₂ in samples with surface protection. Protection systems based on PVA are more permeable to CO₂, which application should be preferred for greater carbon capture in the short term. However, considering the coating mortars life cycle (20 to 40 years), it can be stated that all systems can completely carbonate over time, regardless of the surface protection applied, considering an average thickness of 20 mm. Therefore, carbon capture studies in coating mortars should be carried out considering a lower CO₂ diffusion coefficient when there is a protective barrier applied to the surface of the material.

KEYWORDS: painting system; carbon sequestration; mitigation measures; architectural paints.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais países na produção de cimento de 2010 a 2020	22
Figura 2 – Emissões de CO ₂ (kg/t) em função das quantidades mínimas e máximas de clínquer contidos nos cimentos brasileiros NBR 16697:2018	24
Figura 3 – Diagrama sintético das etapas de produção da cal.....	25
Figura 4 – Distribuição das vendas de cal por segmento consumidor	26
Figura 5 – Ciclo global do cimento no ano de 2014	31
Figura 6 – Fatores que influenciam a captura de CO ₂ por carbonatação	36
Figura 7 – Indicador de pH e evidenciação das zonas carbonatada e não carbonatada	38
Figura 8 – Obtenção de profundidade carbonatada obtida através do software ImagemJ.....	39
Figura 9 – a) curva padrão TGA; b) Curva dTG	40
Figura 10 – TG e dTG de hidróxidos de cálcio e magnésio em argamassa mista	41
Figura 11 – Reboco estilo massa única	42
Figura 12 – Composição básica de tintas	44
Figura 13 – Fluxograma de trabalho	52
Figura 14 – Sistemas de proteção produzidos no estudo experimental.....	53
Figura 15 – Corpos de prova para análise das propriedades físicas e mecânicas das argamassas produzidas	54
Figura 16 – Placa de argamassa a) esquema de difusão do CO ₂ ; b) simulando revestimento em parede.....	55
Figura 17 – Camadas de parafina aplicadas para proteção dos CP	60
Figura 18 – Sistema de proteção do tipo pintura aplicado	61
Figura 19 – Avaliação da profundidade carbonatada aos 28 dias, anteriormente a aplicação do sistema de proteção amostra de referência	62
Figura 20 – Linha do tempo para produção das argamassas e sistemas de proteção	63
Figura 21 – Sistema para leitura da carbonatação no tempo dos CP prismáticos	65
Figura 22 – a) Processo de fratura de CP b) Medição da profundidade carbonatada após aspersão de fenolftaleína.....	65
Figura 23 – Retirada de alíquota para análise térmica das zonas carbonatada e não carbonatada	66
Figura 24 – TG e DTG dos materiais carbonatáveis, cimento e cal	74
Figura 25 – Curva granulométrica da areia	75
Figura 26 – Resultado de absorção de água por capilaridade em g/cm ²	75
Figura 27 – Profundidade carbonatada aos 164 dias de exposição natural ao CO ₂ em argamassas de referência (sem proteção superficial)	78
Figura 28 – Evolução da profundidade de carbonatação no tempo, em mm para argamassa com Traço 1:1:6.....	79
Figura 29 – Evolução da profundidade de carbonatação no tempo, em mm para argamassa com Traço 1:2:9.....	79
Figura 30 – Comparação entre tintas acrílicas em função da cor, traço 1:1:6 .	82
Figura 31 – Comparação entre tintas acrílicas em função da cor, traço 1:2:9 .	82
Figura 32 – Profundidade de carbonatação natural ao longo do tempo e projeção para alcance da profundidade alvo de 30 mm.....	84

Figura 33 – Porcentagem de redução na profundidade carbonatada em comparação a argamassa de referência aos 164 dias - Traço 1:1:6.....	85
Figura 34 – Porcentagem de redução da profundidade carbonatada em comparação a argamassa de referência aos 164 dias – Traço 1:2:9.....	86
Figura 35 – Profundidade de carbonatação em placas argamassadas, em mm	86
Figura 36 – Equações de projeção de tempo para profundidade máxima de carbonatação para os diferentes tratamentos, traço 1:1:6	91
Figura 37 – Equações de projeção de tempo para profundidade máxima de carbonatação para os diferentes tratamentos, traço 1:2:9	92
Figura 38 – TG e DTG de argamassa traço 1:2:9 a) Zona não carbonatada; b) Zona carbonatada	93
Figura 39 – TG e DTg de argamassa traço 1:1:6 a) Zona não carbonatada; b) Zona carbonatada	93
Figura 40 – Balanço das emissões aos 164 dias, traço 1:1:6	95
Figura 41 – Balanço das emissões aos 164 dias, traço 1:2:9	96
Figura 42 – Balanço de CO ₂ (%) para o traço 1:1:6, considerando 164 dias de carbonatação.....	97
Figura 43 – Balanço de CO ₂ (%), traço 1:2:9 considerando 164 dias de carbonatação.....	97

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 1 – Temperatura nos 10 anos mais quentes 1880 – 2018	19
Tabela 2 – Participação por setores nas emissões de GEE no Brasil (2019) ..	21
Tabela 3 – Espessuras indicadas para revestimentos em função do ambiente	43
Tabela 4 – Tipo de acabamento das tintas de acordo com o PVC.....	45
Tabela 5 – Requisito de desempenho das tintas látex semibrilho cores claras	46
Tabela 6 – Requisito de desempenho das tintas látex fosca cores claras	47
Tabela 7 – indicadores de GEE de tintas por tonelada produzida.....	51
Tabela 8 – Quantidade de corpos de prova produzidos para os ensaios físicos e mecânicos	55
Tabela 9 – Quantitativo de corpos de prova para os ensaios de carbonatação	56
Tabela 10 – Caracterização das matérias-primas	56
Tabela 11 – Consumo de materiais por m ³ de argamassa produzida	59
Tabela 12 – Quantidade de material necessário para revestimento dos CP....	61
Tabela 13 – Dados de emissão de CO ₂ referentes à produção do cimento Portland.....	67
Tabela 14 – Dados para determinação da captura por meio de equação BRE EM 15804 adaptada	70
Tabela 15 – Resultado das massas específicas e unitária.....	73
Tabela 16 – Tabela de FRX do cimento e da cal	74
Tabela 17 – Resultados de resistência à compressão, tração na flexão, em MPa.....	76
Tabela 18 – Nomenclatura adotada para apresentação das argamassas	77
Tabela 19 – Teste de Tukey de comparação de médias - TRAÇO 1:1:6	80
Tabela 20 – Teste de Tukey de comparação de médias - Traço 1:2:9	81
Tabela 21 – Teste de comparação de médias Placas – Traço 1:1:6.....	87
Tabela 22 – Comparação de médias CP prismáticos versus Placas – Traço 1:1:6	88
Tabela 23 – Emissões de CO ₂ para produção de 1m ³ de argamassa por traço	89
Tabela 24 – Estimativa de captura de CO ₂ (kg/m ³), por meio do método BRE, e=25mm – Traço 1:1:6	90
Tabela 25 – Estimativa de captura de CO ₂ (kgCO ₂ /m ³), por meio do método BRE, e=25mm – Traço 1:2:9.....	91
Tabela 26 – Valores de hidróxidos e carbonatos encontrados por TG.....	94

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	16
1.2	Estrutura do trabalho	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1	Emissões de CO ₂	18
2.2	Produção e emissão de CO ₂ do cimento	21
2.3	Produção e emissão de CO ₂ da cal	24
2.4	Carbonatação e captura de CO ₂	27
2.4.1	Carbonatação em materiais a base de cimento	28
2.4.2	Carbonatação de materiais a base de cal	31
2.4.3	Variáveis que influenciam a velocidade de carbonatação	33
2.4.4	Variáveis que influenciam a captura de CO ₂	36
2.4.5	Medição da carbonatação	37
2.4.6	Medição da carbonatação por indicador de pH	37
2.5	Sistema de revestimento em argamassas	41
2.5.1	Argamassas de revestimento	42
2.5.2	Sistema de pintura	43
2.5.3	Componentes das tintas	48
2.5.4	Emissões das tintas	50
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	52
3.1	Delineamento experimental	53
3.1.1	Amostras.....	54
3.2	Caracterização dos materiais	56
3.2.1	Cal.....	57
3.2.2	Cimento	57
3.2.3	Agregado	58
3.3	Produção e proteção das argamassas.....	59
3.4	Caracterização das argamassas	63
3.4.1	Ensaio Físicos	63
3.4.2	Ensaio Mecânicos	63
3.4.3	Ensaio de Carbonatação	64
3.4.4	Análise de carbonatação	64
3.5	Emissões e captura de CO ₂	66
3.5.1	Estimativa das emissões	67
3.5.2	Estimativa das capturas	69
3.5.3	Balço das emissões	72
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
4.1	Caracterização	73
4.2	Profundidade carbonatada	76
4.2.1	Efeito do sistema de proteção na profundidade carbonatada	76
4.2.2	Avaliação da profundidade de carbonatação natural	83
4.3	Estimativa e captura de CO ₂	88
4.3.1	Profundidade carbonatada – método BRE.....	88
4.3.2	Análise termogravimétrica	92
4.4	Balço das emissões	94
5	CONCLUSÕES.....	99
	REFERÊNCIAS	102

APÊNDICE A – Tintas empregadas.....	112
APÊNDICE B – Dados de absorção de água por capilaridade.....	114
APÊNDICE C – Profundidade de carbonatação nos distintos tempos.....	116
APÊNDICE D – Balanço de CO₂ para os diferentes traços.....	118

1 INTRODUÇÃO

Sabe-se que a indústria da construção contribui significativamente para o Produto interno brasileiro (PIB), entretanto, a ela também é atribuída grande parcela dos impactos ambientais gerados, devido ao elevado consumo dos recursos naturais, à modificação dos espaços, geração de resíduos sólidos e poluição (AGOPYAN; JOHN, 2011). Tendo em vista que estes impactos estão diretamente relacionados ao aquecimento global, nas últimas décadas tem-se estudado o aprimoramento/desenvolvimento de materiais e tecnologias que busquem o consumo sustentável dos recursos naturais, maior eficiência energética, com menor agressividade ambiental, visando a redução da poluição (CNI, 2012), sobretudo as emissões antropogênicas.

No setor da construção o material produzido pelo homem empregado em maior escala é o cimento, insumo essencial à produção de concretos e argamassas (ROADMAP, 2019). No Brasil esse consumo se justifica quando analisado o sistema construtivo empregado em larga escala – alvenaria convencional – que consiste basicamente em uma estrutura reticulada em concreto armado (vigas, lajes e pilares), com fechamento/vedação em alvenaria de blocos de concreto ou cerâmico envoltos em ambas as faces (interna e externa) por revestimentos argamassados (GOMES; LACERDA, 2014).

Para a produção do cimento tem-se a liberação de elevados volumes de dióxido de carbono (CO_2), uma vez que para sua fabricação são empregadas rochas calcárias (CaCO_3) que descarbonatam no processo de clinquerização (temperatura de até $1450\text{ }^\circ\text{C}$). Com base em estequiometria, tem-se que 65% das emissões de CO_2 são decorrentes deste processo. O restante advém da queima de combustíveis fósseis para aquecimento dos fornos, eletricidade nas fábricas e transporte (CARVALHO, 2010; GUO et al., 2020; POSSAN, 2019; TAVARES; BRAGANÇA, 2016). Em termos globais, a indústria do cimento é responsável por 5 a 7% das emissões antropogênicas de CO_2 (ZHANG et al., 2014; ANDREW, 2018; POSSAN, 2019).

Segundo Caldas e Sposto (2017) quando se deseja mensurar o impacto que determinado material causa ao meio ambiente, pode-se quantificar as

emissões atribuídas ao seu processo produtivo, incluindo as etapas de transporte, e também as emissões associadas aos demais processos/materiais necessários a obtenção do produto final. Dados divulgados pelo MCTIC (2016), em sua estimativa anual para os gases de efeito estufa (GEE) no Brasil, dão conta que dentre as atividades industriais (setor onde estão inseridos a produção de materiais essenciais a indústria da construção (IC), como cal, cimento e aço) o cimento figura como segundo maior emissor, com aproximadamente 29% das emissões deste setor para o ano de 2014, ficando atrás apenas da indústria do aço e ferro gusa. Neste ranking a indústria da cal aparece como terceiro colocado com quase 7% das emissões.

A cal, assim como o cimento também é oriunda do processo de descarbonatação de rochas calcárias a temperaturas mais moderadas (até 1200°C). Segundo estudo de John et al., (2014) as emissões associadas à produção da cal apresentam valores variados, isso se dá principalmente devido as diferentes tecnologias e materiais de combustão empregados, sendo encontrados valores máximos e mínimos de 868 e 464 kgCO₂/t para produção de cal virgem e 694 a 419 kgCO₂/t de cal hidratada produzidas, respectivamente.

Entretanto, materiais a base de cimento e/ou de cal (concretos, pastas, argamassas) têm a potencialidade de aprisionar o CO₂ presente na atmosfera através de um processo inverso ao da produção (carbonatação), que ocorre durante a vida útil da estrutura, inclusive após sua demolição (STRIPPLE et al., 2018). Nas duas últimas décadas pesquisadores (PADE; GUIMARAES, 2007; EL-HASSAN; SHAO, 2014; YANG; SEO; TAE, 2014; POSSAN; FELIX; THOMAZ, 2016; STRIPPLE et al., 2018; ANDERSSON et al., 2019; CAO et al., 2020) têm concentrado esforços no entendimento dos aspectos envolvidos na captura de CO₂ em materiais de base cimentícia devido à carbonatação, como forma de mitigar as concentrações de CO₂ advindas da indústria cimenteira. De acordo com Sanjuán et al., (2020) aproximadamente 50% da capacidade de captura por carbonatação é atingida nos primeiros 20 a 25 anos da estrutura, podendo atingir 90% desta capacidade até os 80 anos.

Estudo publicado por Xi et al., (2016) no qual foi avaliado a potencialidade de captura de CO₂ de materiais cimentícios analisando a vida útil, demolição e reuso, concluiu que o cimento contido em argamassas possui maior

potencialidade de captura em relação aos demais componentes que contém cimento (concreto, por exemplo), apesar de apenas 30% do cimento mundial ser utilizado em argamassas. Essa maior captura é decorrente de maiores áreas de exposição, finas camadas em que as argamassas são aplicadas, além de sofrerem carbonatação a uma taxa mais rápida do que concretos, pois têm menor teor de cimento, maiores razões água/cimento e agregados de tamanho de grão mais finos. No Brasil cerca de 90% do cimento Portland produzido é destinado a produção de concretos e argamassas, destes 55% são empregados na produção de argamassas (JOHN et al., 2018).

No sistema construtivo brasileiro (alvenaria convencional), as superfícies (paredes e teto) recebem camadas de revestimento argamassados a base de cimento e/ou cal, ambos materiais quando em contato com ar sofrem carbonatação, podendo capturar CO₂ da atmosfera. Ainda como são aplicadas em camadas de baixa espessura, um metro cúbico de material pode cobrir grandes áreas de substrato, o que é muito favorável do ponto de vista da captura de CO₂, já que é função da área exposta à ação deste gás.

No Brasil, os primeiros estudos de captura de CO₂ em argamassas de revestimento ou assentamento foram conduzidos por Antônio (2018), Mazurana (2019), Rufatto (2019) e Silva (2019), que avaliaram o efeito da difusibilidade de CO₂ em argamassas de cimento e mistas, com e sem agregado miúdo reciclado de resíduo de construção e demolição (RCD), sem nenhuma proteção superficial. Rufatto (2019) constatou um potencial de captura de CO₂ de 29 a 44% das emissões atribuídas a produção das argamassas, variando esse potencial a depender do teor de cal empregado, argamassas com maior quantidade de cal apresentaram maior captura devido a maior quantidade de materiais carbonatáveis Ca(OH)₂ e Mg(OH)₂. Esse potencial de captura em argamassas mistas pode ser elevado se considerada a substituição parcial ou total da areia natural por areia reciclada de RCD, devido a maior porosidade inerente ao resíduo, facilitando a difusão de CO₂. Mazurana (2019) e Antônio (2018) encontraram valores de captura potencial da ordem de 47% (aos 202 dias) e 59% (aos 266 dias), respectivamente, para teores de substituição de areia reciclada de RCD de 100%. Segundo Silva (2019), para teores de substituição de areia reciclada de RCD de 50% o potencial de captura é de 35,4%.

Geralmente sobre o sistema de revestimento em argamassa faz-se um acabamento com a função de proteger e decorar a edificação. Os principais sistemas empregados para esta finalidade são as pinturas. Até o momento, as pesquisas realizadas sobre a potencialidade de carbonatação em argamassas a base de cimento e/ou de cal foram desenvolvidas em amostras sem proteção superficial (ANTONIO, 2018; MAZURANA, 2019), sendo desconhecido o efeito da proteção superficial tipo pintura imobiliária na difusibilidade e, conseqüentemente, captura de CO₂. Haja visto que as obras e/ou elementos em concretos/argamassas no Brasil em sua maioria apresentam acabamento final do tipo pintura, faz-se necessário compreender como se dá o processo de difusão de CO₂ e a conseqüente captura deste gás nestas superfícies quando protegidas.

Pensando nisso, o presente trabalho tem por pretensão colaborar com a investigação de captura de CO₂ em argamassas de revestimento, analisando a influência da proteção superficial do tipo pintura no processo de difusão de CO₂ ao longo do tempo, e conseqüentemente, no mecanismo de captura de CO₂ pelo processo de carbonatação.

1.1 Objetivos

Esta dissertação tem por objetivo principal avaliar a influência do sistema de proteção (pintura) como barreira à penetração de CO₂ em argamassas de revestimento submetidas à carbonatação, e sua influência na captura de dióxido de carbono.

Os objetivos específicos são:

- a) Avaliar a influência da composição química (PVA e Acrílica) da tinta imobiliária na difusão e captura de CO₂ ao longo do tempo;
- b) Avaliar a influência da qualidade da tinta imobiliária (Econômica, Standart, Premium) na difusão e fixação de CO₂ em matrizes a base de cimento e cal;

- c) Avaliar a influência do tipo de acabamento da tinta imobiliária (Semibrilho e fosco) e da pigmentação (branca e cinza) no ingresso e captura de CO₂ em argamassas de revestimento;
- d) Analisar diferentes cenários para o potencial de fixação de CO₂ ao longo da vida útil da edificação com superfícies cimentícias protegidas com pintura imobiliária;
- e) Avaliar o balanço das emissões de CO₂ em superfícies protegidas com pintura.

1.2 Estrutura do trabalho

A presente dissertação está dividida em 5 capítulos. No capítulo 1, tem-se a introdução do trabalho, onde ao leitor é apresentado a importância e justificativa do estudo realizado, além dos objetivos geral e específicos que se buscou alcançar com o desenvolvimento da pesquisa.

No decorrer do capítulo 2 apresentam-se aspectos relacionados à emissão de CO₂ decorrentes da produção de cimento e da cal, bem como o processo de carbonatação desses materiais, quais os fatores que influenciam a velocidade da propagação e a captura de CO₂ em função desta reação. Apresenta-se ainda a configuração de sistemas de revestimento argamassados assim como a composição de diferentes sistemas de proteção (pintura) e a sua relação com a permeabilidade final do filme formado.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia e os materiais empregados na parte experimental da pesquisa. Ao longo do capítulo 4 são apresentadas as discussões acerca dos resultados fornecidos pelos experimentos, seguido pelas conclusões baseadas no entendimento dos resultados da pesquisa experimental conduzida.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Emissões de CO₂

O termo efeito estufa foi empregado pela primeira vez no fim dos anos 1800 como designação ao comportamento que os gases atmosféricos exercem sobre a superfície terrestre, em especial o CO₂, CH₄, NO₂, CFCs. A partir do ano de 1950 essa designação passou a ser atrelada às alterações climáticas (KWEKU et al., 2018) tornando-se uma questão mundial, ao passo que as suas consequências não se limitam às fronteiras dos países e afetam a nível global a economia, a saúde da população e o meio ambiente (GONZALEZ, 2014).

Dados da UNFCCC (2007) apontaram um aumento de mais de 36% nas concentrações de GEE na atmosfera no último século, passando de 278 ppm na era pré-industrial para 379 no ano de 2005. Esse aumento na concentração acarretou uma elevação de aproximadamente 0,74°C na temperatura média da Terra. Para o Nacional Center for Environmental Information (NOAA, 2020) a temperatura média da superfície terrestre e dos oceanos vêm aumentando a uma taxa de 0,07°C por década desde 1880, entretanto a partir dos anos 1990 essa taxa mais que dobrou, passando a figurar os 0,17°C/década. Dentre as dez maiores temperaturas já registradas desde 1880 pelo NOAA, nove datam das duas últimas décadas (Tabela 1).

De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) (2019) o aquecimento global por ações antropogênicas aumenta a uma taxa média de 0,2°C por década. A estimativa é que nesse ritmo, entre os anos de 2030 e 2052, a temperatura média da Terra atinja uma elevação de 1,5°C, com consequências danosas a vida na terra de várias espécies animais e vegetais. Em 2019 o IPCC afirmou ser necessário limitar o aumento da temperatura média da Terra em menos de 2°C para este século. Para tanto, seria necessário o controle das emissões totais acumuladas de CO₂ desde a era pré-industrial, com vistas de redução de 20% dessas emissões para o último ano (2020) objetivando o alcance do valor líquido zero¹ para o ano de 2075.

¹ Emissões líquidas zero de dióxido de carbono referem-se ao equilíbrio existente entre as emissões antrópicas de CO₂ são equilibradas globalmente pelas remoções antrópicas de CO₂ durante um período específico.

Tabela 1 – Temperatura nos 10 anos mais quentes 1880 – 2018

ORDEM	Ano	Varição °C	Varição °F
1	2016	0,95	1.71
2	2015	0,91	1.64
3	2017	0,85	1.53
4	2018	0,79	1.42
5	2014	0,79	1.35
6	2010	0,75	1.26
7	2013	0,67	1.21
8	2005	0,66	1.19
9	2009	0,64	1.15
9	1998	0,64	1.15

Fonte: Adaptado de (NOAA, 2020²)

O aumento descomedido das concentrações de GEE na atmosfera, fez com que se tornasse imprescindível mitigar o problema das emissões, principalmente do CO₂, trazendo esta concentração a níveis aceitáveis (379 ppm). Em 2015 na 21ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima (UNFCCC) diferentes nações, inclusive o Brasil, aprovaram o Acordo de Paris (maior tratado internacional sobre as mudanças no clima desde o protocolo de Kyoto assinado em 1992) no qual os países signatários comprometeram-se a elaborar suas contribuições nacionalmente determinadas (*NDC*), indicando em quais atividades e setores estariam concentrados os esforços de redução das emissões, no intuito de limitar o aumento das temperaturas neste século em menos de 2°C (VITAL, 2018).

Dentre as metas apresentadas na *NDC* brasileira, há previsão de redução de 37% das emissões de CO₂ com relação as emissões de 2005 (ano de referência), já para o ano de 2025. Para 2030 o intuito é que haja uma redução adicional de 5% com relação à meta inicial, ou seja, uma redução total de 43% das emissões com relação às de referência. Com fins de alcançar o objetivo o Brasil se comprometeu a adotar medidas efetivas em todos os setores da economia, sendo elas: aumento da participação de biocombustíveis na matriz energética, bem como a eficiência energética; o fortalecimento das políticas e medidas que visem conter o desmatamento, além da promoção do reparo e reflorestamento de 12 milhões de

² <https://www.climate.gov/maps-data/global-climate-dashboard>

hectares de floresta amazônica; inserção de novos padrões de tecnologias nas indústrias brasileiras, entre outros (BRASIL, 2016).

Segundo dados do CO₂ Earth no ano de 2021 a concentração de CO₂ na atmosfera é de aproximadamente 419.05 ppm, o que nos coloca neste momento na contramão da direção no que diz respeito ao contingenciamento das alterações climáticas em decorrência do efeito estufa, já que com relação a 2016³ – ano em que fora apresentada a *NDC* brasileira –, apresentamos um aumento de 16.17 ppm, ou seja, mais de 1% nas concentrações, nos distanciando ainda mais da meta de redução inicialmente proposta.

O Brasil é o 6º país que mais emite GEE a atmosfera, entretanto diferentemente dos maiores emissores a parcela com maior representatividade nas emissões brasileiras correspondem ao uso da terra (mudança de uso da terra e florestas e agropecuária com 44,5 e 27,5% das emissões totais brasileiras no ano de 2019, respectivamente), enquanto que dentre as emissões globais de GEE, 2/3 delas correspondem a queima de combustíveis fósseis (SEEG, 2020).

No ano de 2019 o Brasil emitiu aproximadamente 2.175 Mt toneladas brutas de GEE medidos em CO_{2e}⁴, a participação por setores da economia pode ser vista na Tabela 2. Apesar de o setor das atividades industriais ocupar a penúltima posição dentre os setores que contribuem com as emissões de GEE, a quantidade de 101,2Mt emitidas é expressiva. Destas 99,1 Mt CO_{2e} emitidas, 32,9 Mt são atribuídas a indústria do cimento, inerentes ao seu processo produtivo (ALBUQUERQUE et al., 2020). Das etapas produtivas de ambos os materiais, a maior parcela de emissão é correspondente a descarbonatação do calcário (CARVALHO, 2010; JOHN; PUNHAGUI; CINCOTO, 2014). De acordo com (ANDREW, 2018) a descarbonatação da rocha calcária está entre as três principais causa de emissões antrópicas de gases de efeito estufa.

³ No ano de 2016 a concentração dos GEE na atmosfera eram de 402,88 ppm (CO₂ Earth; 2021).

⁴ CO_{2e} significa “equivalente de dióxido de carbono” é uma medida internacionalmente padronizada de quantidade de gases de efeito estufa. A equivalência leva em conta o potencial de aquecimento global dos gases envolvidos e calcula quanto de CO₂ seria emitido se todos os GEE fossem emitidos como esse gás.

Tabela 2 – Participação por setores nas emissões de GEE no Brasil (2019)

Setor	Emissões (tCO₂e GWR-AR5) _2019	% do total das Emissões (2018)
Energia	413.673.635	19,0
Processos industriais	598.672.055	27,5
Agropecuária	99.074.468	4,6
Resíduos	96.155.226	4,4
Mudanças de uso da Terra	968.055.554	44,5
Total Geral	2.175.630.938	

Fonte: Adaptado de SEEG (2020)

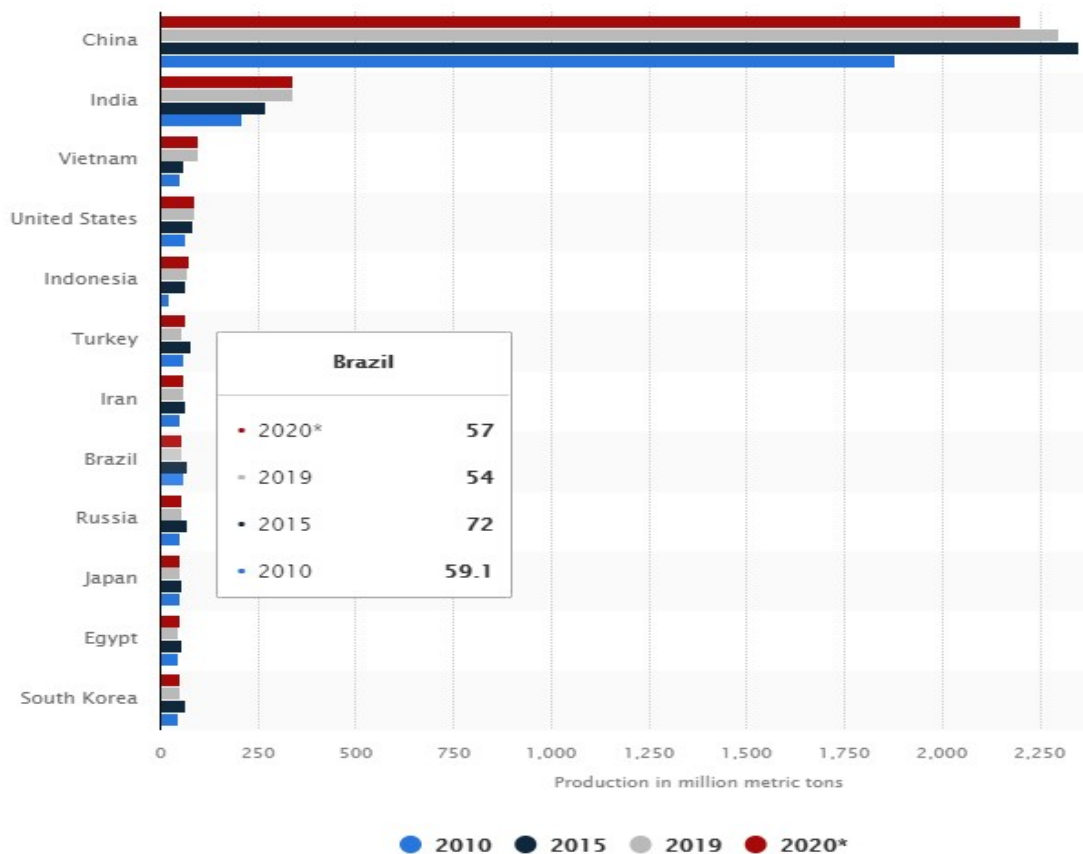
2.2 Produção e emissão de CO₂ do cimento

O cimento é um material de construção essencial a indústria da construção civil. Atualmente o Brasil conta com um parque industrial moderno, constituído por aproximadamente 100 fábricas distribuídas por 88 municípios (SNIC, 2016). No ano de 2020 o Brasil figurou entre os 10 maiores produtores de cimento do mundo (Figura 1), ocupando a 8ª posição com uma produção de 57 milhões de toneladas de cimento (STATISTA, 2021) com um consumo de aproximadamente 44,7 Mt no mesmo ano, segundo dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2020).

O Cimento Portland enquanto aglomerante hidráulico, tem por função formar uma pasta aglutinando os demais materiais constituintes da mistura, culminando no produto final (argamassas, concretos). O cimento Portland é composto essencialmente por clínquer, uma pequena quantidade de sulfato de cálcio e de adições. As matérias-primas empregadas para sua produção são a rocha calcária, argila e minério de ferro, essencialmente. Os principais compostos químicos presentes nessa mistura são, portanto, o CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, conhecidos quimicamente neste contexto como C, S, A e F, respectivamente. Dentro dos fornos a altas temperaturas (até 1450°C) estes compostos interagem entre si formando uma série de produtos mais complexos – silicatos e os aluminatos –, sendo considerados os principais compostos do clínquer com as siglas C₃A, C₄AF, C₃S e C₂S. Quando em contato com a água estes compostos anidros reagem quimicamente formando compostos hidratados

numa reação exotérmica chamada de reação de hidratação (NIGRI; ROCHA; FILHO, 2010; NEVILLE; BROOKS, 2013; METHA; MONTEIRO, 2014).

Figura 1 – Principais países na produção de cimento de 2010 a 2020



Fonte: Statista (2021)

A produção do clínquer Portland consiste basicamente na moagem das matérias-primas cruas, misturadas em proporções predeterminadas até que seja obtido um pó muito fino, posteriormente este pó é queimado nos fornos a altas temperaturas e a sinterização destes compostos resulta no clínquer. Com finalidade de retardar a pega do cimento após iniciado seu processo de hidratação, no processo de moagem o clínquer recebe de 3 a 5% de gipsita (sulfato de cálcio dihidratado), tornando-se o cimento Portland (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Ao cimento Portland são acrescentadas adições como cinza volante, escória de alto forno ou filler calcário, culminando então nos variados tipos de cimentos comercializados. O emprego destas adições visa melhorar aspectos de

aplicação dos cimentos, como exemplo elevar a resistência ao ataque por sulfatos e resistência mecânica. Também visa reduzir as emissões associadas à sua produção, uma vez que as adições geralmente são resíduos de outras indústrias, entrando no processo como zero carbono⁵ (CNI, 2017; GOBBI, 2014; POSSAN, 2019).

A descarbonatação do CaCO_3 , ocorre a temperaturas aproximadas de 700 a 800 °C e está diretamente relacionada à produção do cimento e das cales (AGOPYAN; JOHN, 2011; ANDREW, 2018; POSSAN, 2019). Por cálculo estequiométrico, tem-se que para cada tonelada de calcário calcinado 440 kg de CO_2 são liberados, restando 560 kg de material (óxido de cálcio), considerando 100% de descarbonatação. Sendo assim, para a produção de uma tonelada de clínquer são gerados de 700 a 1000kg de CO_2 (FELIX; POSSAN, 2018).

As emissões de CO_2 advindas do processo produtivo do cimento resultam essencialmente da descarbonatação da rocha calcária e da queima de combustíveis fósseis nos fornos (TORGAL et al., 2012; DAMIN, 2013; NAQI; JANG, 2019). Quando consideradas todas as etapas do processo, a produção do clínquer emite de 0,84 (GNR, 2016) a 0,92kg/ CO_2 (HABERT et al., 2010) por tonelada produzida. Destas emissões aproximadamente 90% podem ser associadas às etapas de descarbonatação e queima de combustíveis fósseis nos fornos, os 10% restantes advém da exploração e transporte da matéria-prima, além de consumo de energia elétrica nas dependências das fábricas (CARVALHO, 2010; CNI, 2017).

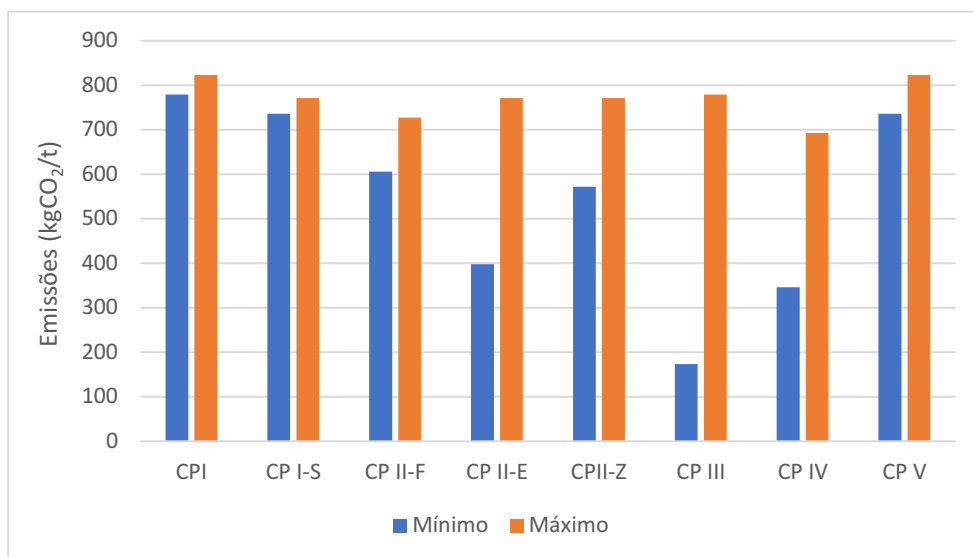
No Brasil a produção do cimento apresentou um crescimento de mais de 273% nas últimas duas décadas, entretanto as emissões associadas ao seu processo apresentaram um crescimento inferior, de 223%. Esta melhoria é creditada a aperfeiçoamentos no processo produtivo aliado a redução na proporção do clínquer empregado nos cimentos comerciais⁶ (ROADMAP, 2019). De acordo com Possan (2019), as emissões do cimento podem ser bastante variadas em função do tipo de cimento produzido, uma vez que a emissão é proporcional ao teor de clínquer contido no cimento, podendo ser por exemplo,

⁵ Refere-se a zero de dióxido de carbono emitido associado aquele processo.

⁶ Após alteração normativa são empregados como valores máximos e mínimos de clínquer + sulfato de cálcio (%) para os cimentos comerciais, os valores a seguir: Cimento CPI 95-100; CPI-S 90-94; CII F 75-8 9; CII E 51-94; CII Z 71-94; CIII 25-65; CP IV 45-85; CPV 90-100.

da ordem de 173 kgCO₂/t produzida para o cimento CPIII com o mínimo teor de clínquer e um máximo de 823 kgCO₂/t de cimento se empregado o cimento CPI com o máximo de clínquer (Figura 2).

Figura 2 – Emissões de CO₂ (kg/t) em função das quantidades mínimas e máximas de clínquer contidos nos cimentos brasileiros NBR 16697:2018



Fonte: Adaptado de Possan (2019)

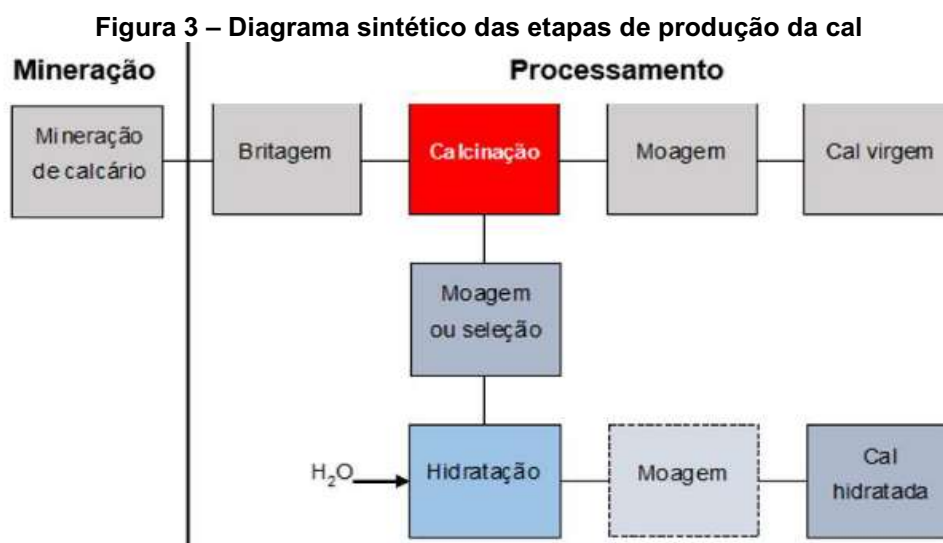
Apesar de contribuir com as emissões de GEE, quando comparado a outros países, o Brasil é um dos que menos emite CO₂ por tonelada de cimento produzida. Segundo o Roadmap Tecnológico do cimento (2019), algumas medidas estão sendo e/ou foram implementadas com o intuito de reduzir ainda mais as emissões decorrentes da produção, entre elas têm-se: a substituição na proporção de clínquer nos cimentos comerciais devido as adições empregadas; emprego de combustíveis alternativos (menos poluentes); e, captura e sequestro de CO₂.

2.3 Produção e emissão de CO₂ da cal

A cal (CaO) é um dos produtos derivados da calcinação da rocha calcárea ou dolomítica (CAMPOS et al., 2018). O termo cal é empregado na literatura para designar o material rico em óxido de cálcio (CaO) ou óxido de cálcio e magnésio, podendo ser classificada de acordo com o percentual de óxidos totais que a

compõe, em cal calcítica, magnesiana ou dolomítica, com as porcentagens de óxido de cálcio de 90-100, 65-90 e 58-65% do peso total, respectivamente (FERREIRA; PEREIRA, 2009; MCT, 2010).

A produção da cal virgem engloba essencialmente as etapas de extração da matéria-prima base (rocha calcária ou dolomítica), britagem, calcinação e moagem, já a produção da cal hidratada requer as etapas adicionais de separação, hidratação e posterior moagem (Figura 3) (JOHN; PUNHAGUI; CINCOTTO, 2014; CETESB, 2017). A temperatura de calcinação (~900°C) das cales é influenciada por sua composição, o produto final da calcinação – cal, cal viva ou cal virgem –, quando entra em contato com a água dá origem a uma reação exotérmica de hidratação, gerando produtos compostos hidratados – os hidróxidos de cálcio e de magnésio – nas proporções da matéria-prima que a originou, passando a designar assim cal hidratada (JOHN; PUNHAGUI; CINCOTTO, 2014; COSTA; PACHECO, 2018).

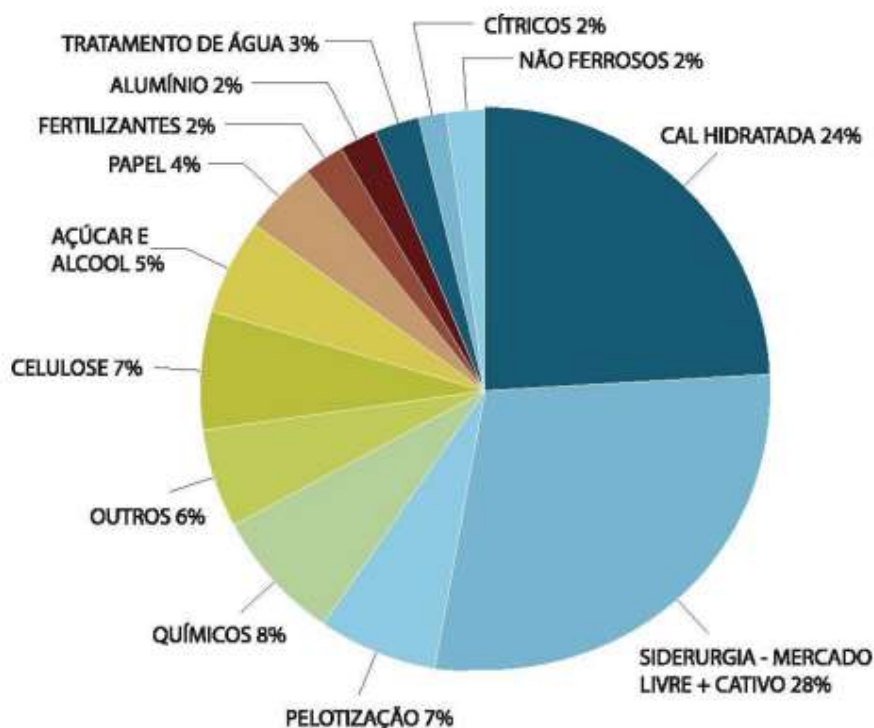


Fonte: JOHN; PUNHAGUI; CINCOTTO (2014)

Em termos físico-químicos a produção da cal virgem se processa de maneira análoga a do cimento, entretanto, devido ao fato de se ter um menor rigor e controle nas normativas referentes a indústria da cal, faz com que ela seja produzida com menor rigor tecnológico e que haja diferença entre as cales encontradas comercialmente. O setor da cal brasileiro é composto por 185 empresas aproximadamente, destas de 10 a 15 são consideradas de porte

médio a grande, e produzem ambos os tipos de cal (virgem e hidratada). O setor da cal está dividido em dois principais mercados consumidores: a construção civil relacionada ao consumo da cal hidratada; e, o setor industrial atrelado ao consumo de cal virgem. Da produção brasileira, em 2014, 76% era destinada a produção da cal virgem e os 24% restantes à produção da cal hidratada, cuja distribuição por seguimento consumidor é apresentada na Figura 4 (JOHN; PUNHAGUI; CINCOTTO, 2014).

Figura 4 – Distribuição das vendas de cal por segmento consumidor



Fonte: CETESB (2017)

O Brasil é 5º maior produtor mundial de cal, responsável por 2,41% do total produzido, das emissões de CO₂ decorrentes da sua produção, 68% ocorrem durante o processo de transformação da rocha calcária em cal virgem, estando as demais emissões relacionadas ao consumo de eletricidade nas fábricas (CETESB, 2008). Segundo Ferreira e Pereira (2009), a etapa de descarbonatação do calcário emite aproximadamente 770 kgCO₂ por tonelada de cal virgem produzida, de maneira geral para produção de 1 tonelada de cal, faz-se necessário 1,7-1,8 tonelada de matéria-prima, ao passo que 1 tonelada de cal virgem quando hidratada gera 1,3 tonelada de cal hidratada.

Dentro da indústria da cal pode-se encontrar desde produtores cujo processo produtivo é considerado de ponta até aqueles produtores no qual o processo é considerado rudimentar empregando portanto, diferentes tecnologias, o que torna as emissões associadas ao processo de fabricação da cal bastante variáveis, sendo emitidos algo entre 464-868 e 419-694 kgCO₂/t por tonelada de cal virgem e cal hidratada produzida, respectivamente (JOHN; PUNHAGUI; CINCOTTO, 2014).

Essa quantidade emitida depende de fatores como: temperatura de calcinação, tempo de permanência do material no forno, teor de calcário da matéria-prima, além da tecnologia empregada para a combustão (JOHN; PUNHAGUI; CINCOTTO, 2014; SEEG, 2019). Quando comparados, por exemplo, o forno do tipo vertical metálico de tanques múltiplos e eixos paralelos, consome até três vezes menos energia (considerando o mesmo combustível) do que um forno do tipo barranco, se considerado óleo combustível, o primeiro forno emitiria cerca de 262 kgCO₂/t de cal virgem produzida, ao passo que o segundo emitiria aproximadamente 823 kgCO₂/t, isto considerando apenas a queima do combustível (JOHN; PUNHAGUI; CINCOTTO, 2014).

2.4 Carbonatação e captura de CO₂

Como relatado o cimento e a cal emitem CO₂ durante seu processo produtivo, entretanto materiais a base de cimento e/ou de cal têm a potencialidade de capturar CO₂ indiretamente por meio do processo de carbonatação, devido a reação físico-química entre o CO₂ e os produtos hidratados (do cimento e da cal), cujo produto final é um carbonato e água (NEVES; BRANCO; DE BRITO, 2013; MARTINEZ, 2017). Esta reação tem potencialidade de acontecer naturalmente durante toda a vida útil do elemento/estrutura e após a sua demolição (POSSAN, 2019). Também pode ocorrer no processo de cura carbônica⁷ (EL-HASSAN; SHAO, 2014; SEO et al., 2018; NEVES JUNIOR et al., 2019). Ainda segundo Neves Junior (2014) o potencial de captura de CO₂ por carbonatação acelerada tende a ser maior do

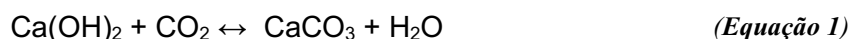
⁷ Cura carbônica: O CO₂ emitido na produção do clínquer é coletado e posteriormente injetado em materiais a base de cimento, durante o processo de cura.

que a captura natural por carbonatação já que todo o potencial de captura pode ser alcançado rapidamente.

2.4.1 Carbonatação em materiais a base de cimento

A reatividade e o ganho de resistência a longo prazo de materiais de base cimentícia tem relação direta com a quantidade de C_3S e C_2S contidas no cimento (geralmente de 65 a 85 % da proporção) dada a sua influência no desenvolvimento de produtos de hidratação (HOLMES, 2018). De acordo com Martinez (2017), quando em contato com a água os silicatos – C_3S e C_2S – reagem culminando em duas fases distintas, de silicato de cálcio hidratado (CSH) e hidróxido de cálcio (CH) – (este principal responsável pela geração do ambiente alcalino).

A carbonatação em concretos e/ou argamassas de cimento se processa através do ingresso de CO_2 na matriz e reação do mesmo com os hidróxidos aí presentes. A reação de carbonatação pode ser simplificada considerando-se a reação principal decorrente da reação físico-química entre o CO_2 e o hidróxido de cálcio (em maior quantidade), (*Equação 1*) (POSSAN, 2004). Entretanto, outros compostos como o hidróxido de sódio (NaOH), hidróxido de potássio (KOH) assim como o próprio silicato de cálcio hidratado (CSH) também podem ser carbonatados (em menor escala) (PETER et al., 2008; WANG; LEE, 2009; GALAN et al., 2010; MEGGI, 2012). Em decorrência das reações de carbonatação há uma redução da concentração de $Ca(OH)_2$, influenciando diretamente o seu valor de pH.



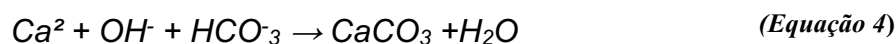
Entretanto, ao desencadeamento da reação alguns acontecimentos no interior da matriz se fazem necessário, são eles: a difusão e dissolução do CO_2 atmosférico; a reação do CO_2 dissolvido com os demais produtos de hidratação do cimento (álcalis); a dissolução do hidróxido de cálcio, e pôr fim a reação do

CO₂ com o Ca(OH)₂ dissolvido culminando na precipitação do CaCO₃ (NUNES; HELENE, 1998; WANG; LEE, 2009).

O CO₂ atmosférico está presente no ambiente em sua forma gasosa e não consegue reagir diretamente com os produtos de hidratação do cimento, devendo primeiramente se dissolver em água formando o íon carbonato (*Equação 2*). Portanto, a água é condição essencial para que a reação de carbonatação aconteça (LAGERBLAD, 2005; ANDERSSON et al., 2019).



O CO₂ uma vez dissolvido agora reage com os álcalis também dissolvidos nos poros dos materiais a base de cimento, essas reações devido à redução de pH que provocam criam ambiente propício a dissolução do hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) (*Equação 3*), que por sua vez reage com o CO₂ precipitando o carbonato de cálcio (*Equação 4*), acarretando em redução do volume dos poros (NUNES; HELENE, 1998).



O processo de carbonatação se inicia de fora para dentro em elementos de concreto e argamassas e move-se progressivamente ao seu interior, formando uma “frente de carbonatação” com separação de duas zonas de pH distintos, com valores de pH de 8 e 13 aproximadamente em cada uma das regiões, carbonatada e não carbonatada, respectivamente (LAGERBLAD, 2005; XI et al., 2016). O avanço da frente de carbonatação está atrelado a facilidade da difusão do CO₂, condições de exposição e propriedades inerentes da matriz (PAULETTI; POSSAN; DAL MOLIN, 2007).

A profundidade que a carbonatação atinge nos elementos está relacionada também ao tempo de exposição. Na existência de H₂O (em quantidade suficiente) e CO₂ essa superfície irá carbonatar mais rapidamente, ao passo que essa camada, à medida que for sendo carbonatada dificultará o avanço da

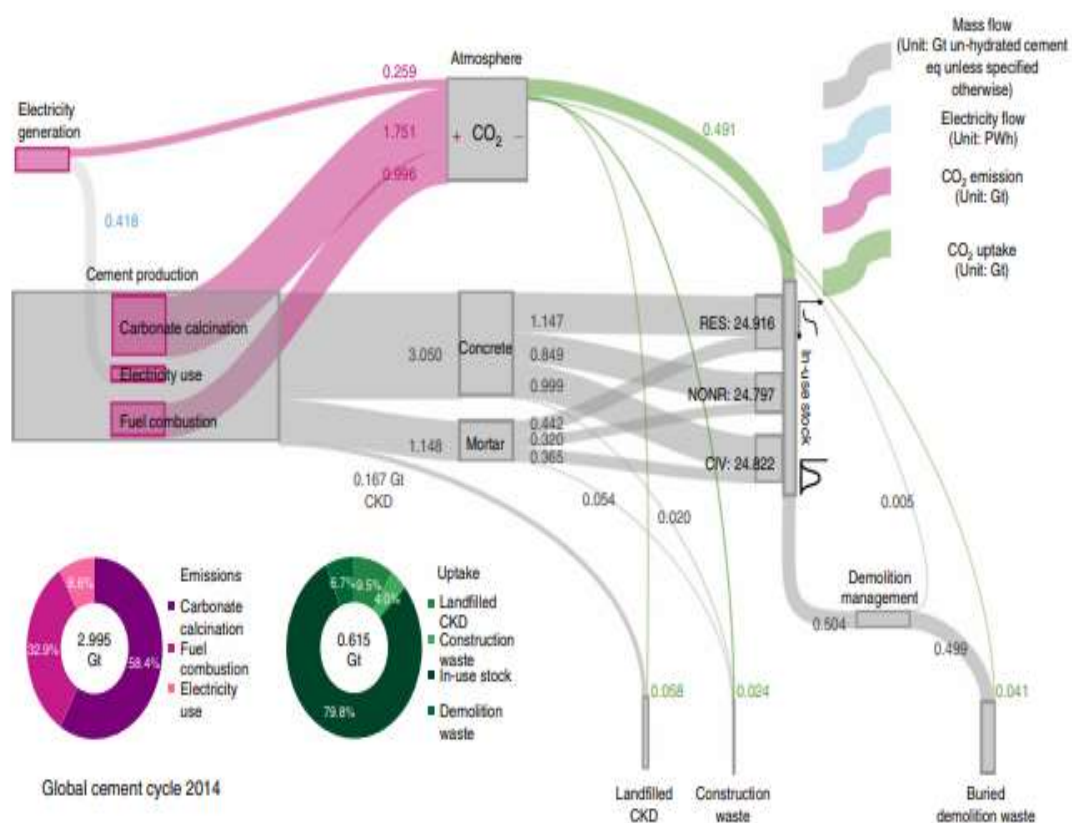
carbonatação ao seu interior, sendo a absorção do CO₂ através do processo de carbonatação de materiais cimentícios proporcional ao tempo integral do consumo de materiais carbonatáveis presentes no cimento (XI et al., 2016).

A presença de água e CO₂ são condições essenciais para que se desencadeie a reação de carbonatação em materiais cimentícios, entretanto, existem condições que aceleram ou retardam a velocidade de propagação dessas reações (EKOLU, 2016; LU et al., 2018) como por exemplo, a relação a/c das misturas, concentração de CO₂ e umidade do ambiente, reserva alcalina, entre outros, os quais serão discutidos nos capítulos que se seguem.

Nas duas últimas décadas a captura de CO₂ por carbonatação tem sido avaliada como uma medida de compensação às emissões de CO₂ atribuídas a indústria do cimento. De acordo com a Associação Europeia do cimento (CEMBUREAU), (2018) 25% das emissões de CO₂ decorrentes da produção do cimento podem ser reabsorvidos durante a vida útil de uma construção pelo processo de carbonatação. A CEMBUREAU já enviou um projeto ao IPCC com o intuito de que essa captura seja considerada e creditada a indústria do cimento.

Cao et al., (2020) analisaram o papel duplo da indústria do cimento nas relações de carbono (emissão/captura) avaliando a relação entre o potencial da captura por carbonatação no ciclo de vida dos materiais cimentícios em relação a sua demanda, e chegaram à conclusão que 30% das emissões cumulativas de 2015 a 2100 podem ser reabsorvidas por carbonatação. Quando analisado o ciclo global para o ano de 2014, constataram que 20% das emissões puderam ser “recuperadas” no mesmo ano, destes 80% correspondem a infraestrutura e edifícios, considerados como estoques em uso, enquanto o restante das capturas é atribuído as modalidades de demolição, resíduos de construção entre outros (Figura 5).

Figura 5 – Ciclo global do cimento no ano de 2014



Fonte: Cao Zhi et al. (2020)

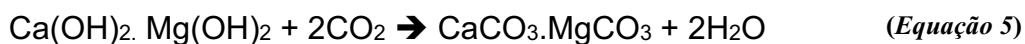
2.4.2 Carbonatação de materiais a base de cal

A cal é um aglomerante aéreo, ou seja, tem como característica aglutinar os materiais da mistura entre si através da sua reação com o ar. Portanto, seu processo de “endurecimento” se dá através da reação de carbonatação dos hidróxidos – de cálcio e de magnésio – com o CO₂ atmosférico formando carbonatos, produtos sólidos e rígidos (COSTA; PACHECO, 2018). A carbonatação da cal, assim como a do cimento, tem como equação principal a *equação 1*, entretanto a cal possui hidróxido de magnésio que também participa da reação de carbonatação, *equação 5* (PAIVA; GOMES; OLIVEIRA, 2007).

De acordo com Bauer (2012) nas argamassas simples de cal espera-se que a reação de carbonatação ocorra em temperatura ambiente e de forma lenta, pois quando acelerada afeta a quantidade de cristais de carbonatos formado, influenciando diretamente a durabilidade da argamassa final. O processo da

reação de carbonatação da cal se dá de maneira análoga a carbonatação do cimento, no que diz respeito as etapas de difusão e dissolução dos hidróxidos e do CO₂ na fase aquosa da pasta, bem como a reação destes compostos dissolvidos, precipitando o carbonato de cálcio e magnésio (HARRISON, 2005).

A carbonatação da cal tem os mesmos parâmetros essenciais envolvidos, como a presença em quantidade suficiente de umidade e concentração de CO₂, sendo sensível aos fatores do ambiente de exposição. O processo de carbonatação é controlado pela difusão de CO₂ na matriz e reação com os hidróxidos dissolvidos. Porém ao passo que a reação vai ocorrendo, o fato de o produto da reação, o carbonato, possuir maior volume que o que o originou vai diminuindo os poros (por meio do qual o CO₂ se difunde) diminuindo a propagação da carbonatação em seu interior (COSTA; PACHECO, 2018). Ainda segundo os autores apesar de o hidróxido de magnésio também participar da reação de carbonatação as cales que apresentam grande concentração deste óxido apresentam menor ganho de massa devido a carbonatação, quando comparados ao ganho de massa conferido pela carbonatação do hidróxido de cálcio.



Cultrone et al., (2005) produziu diferentes argamassas a base de cal, variando a presença de aditivo incorporador de ar ou adição de pozzolana, com o intuito de comparar o processo de carbonatação em argamassas expostas em ambiente rico em CO₂ em confronto com argamassas carbonatadas naturalmente. Para os autores altas concentrações de CO₂ favorecem o processo de carbonatação, tornando-o mais rápido e completo, evidenciando a influência da concentração de CO₂ no processo. Entretanto, a taxa de carbonatação depende de fatores como a área superficial (reatividade da cal) e teor de água na mistura. No caso de uma taxa constante de carbonatação quanto maior a concentração de CO₂ maior será a carbonatação. Constatou-se também neste estudo que o processo de carbonatação não fora afetado pela adição pozzolanica ou agentes incorporadores de ar, apesar de haver sido evidenciado a existência de uma reação cal-pozzolana a quantidade de fases de CSH era pequena e de difícil detecção.

As cales quando inseridas em argamassas juntamente ao cimento, tem como intuito melhorar as propriedades de retenção de água, trabalhabilidade entre outras. Nessas argamassas o endurecimento decorre tanto da reação de carbonatação da cal, quanto da reação de hidratação do cimento – principal responsável pelo endurecimento da mistura – havendo uma alteração (aceleração) da cinética de hidratação do cimento em decorrência da utilização da cal (QUARCIONI, 2008). Segundo o autor na presença de cal há formação dos mesmos produtos de reação característicos da hidratação do cimento, entretanto, em diferentes concentrações e com aumento do calor de hidratação.

2.4.3 Variáveis que influenciam a velocidade de carbonatação

Para Lagerblad (2005), a carbonatação de concretos e/ou argamassas ocorrerá sempre que houver dióxido de carbono e água disponíveis para o desencadeamento da reação química. Entretanto, a velocidade com que a reação ocorrerá vai depender da rapidez com que o CO₂ se move matriz a dentro, sendo influenciada por fatores internos e externos como: tipo de cimento; reserva alcalina; grau de saturação; relação água/cimento; porosidade das argamassas/concretos e concentração de CO₂ (SAVIJA; LUKOVIC, 2016; WOLIŃSKI et al., 2018; MARANGU; THIONG'O; WACHIRA, 2019).

Em diferentes condições de exposição a concentração de CO₂ e a umidade interna dos materiais são fatores decisivos na difusão e conseqüente captura de CO₂ pela reação de carbonatação. Quanto maior a concentração de CO₂ na atmosfera maior será a velocidade de penetração deste gás, já que essa penetração é função do gradiente de concentrações, ou seja, a diferença entre a concentração externa e interna da matriz (MEGGI, 2012). Para Mazzurana (2019) existem diferenças significativas na captura de CO₂ quando comparados diferentes ambientes de exposição, encontrando uma maior profundidade de carbonatação em ambiente interno, que entende-se com maior concentração de CO₂, seguido do externo protegido e externo desprotegido quando analisados argamassas de mesmas características (tipo de cimento, relação a/c, entre outros).

Assim como a concentração CO₂ a água também é fator primordial para que haja o desencadeamento da reação de carbonatação. A umidade interna da

matriz é quem determinará a disponibilidade ou não de água em longo prazo na argamassa endurecida. Em quantidades de baixa umidade (menores que 50 % UR) ambos CO_2 e CH não conseguem ser totalmente ionizados (PAULETTI; POSSAN; DAL MOLIN, 2007). Em contrapartida, em quantidade além da suficiente (acima de 70 % UR), ocorre a desaceleração da carbonatação dada a menor difusibilidade do CO_2 na água com relação a sua difusibilidade no ar, haja vista que os poros estarão mais preenchidos de água (LAGERBLAD, 2005; MARANGU; THIONG'O; WACHIRA, 2019). Estudos realizados por Chen e Ho (2013) reiteraram a já constatada influência da umidade e dos ciclos de umidade no processo de carbonatação, apresentando um valor ótimo para UR em torno de 70 %. Dito isso infere-se que a análise da velocidade de carbonatação deve levar em consideração o local em que ela é conduzida, haja visto que países com grandes dimensões como o Brasil a umidade relativa é bastante variável, a depender da região e da estação ano.

Outro fator importante é a relação água cimento das misturas e consequentemente sua porosidade. Rao e Meena, (2017) em seu estudo de revisão concluíram que a profundidade carbonatada e a relação água cimento são diretamente proporcionais, havendo um aumento na profundidade carbonatada à medida que a relação a/c aumenta e vice-versa. Segundo Kulakowski et al., (2009) a reação de carbonatação para argamassas que tenham relação a/c menor que 0,45-0,5 (valor limite/crítico) é determinada pela porosidade da matriz, tendo a quantidade de CO_2 e hidróxido de cálcio papéis secundários na profundidade carbonatada. Já para argamassas cuja relação a/c apresenta valores maiores que o crítico, as quantidades de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ passam a desempenhar papel mais importante na profundidade carbonatada.

A quantidade de materiais carbonatáveis também influencia diretamente a velocidade de carbonatação de materiais cimentícios. A norma brasileira NBR 16.697 (ABNT, 2018) trouxe como novidade a integração das normas existentes aplicadas aos diferentes tipos de cimento produzidos⁸ e redução na proporção de clínquer em todos os cimentos comerciais. A substituição de parte do clínquer

⁸ Antes de 2018, havia uma norma para cada tipo de cimento Portland brasileiro, a saber: NBR 5732: 1991– Cimento Portland Comum; NBR 11578: 1991– Cimento Portland Composto; NBR 5735:1991– Cimento Portland de Alto-forno; NBR 5736:1999 – Cimento Portland Pozolânico; NBR 5733:1991– Cimento Portland de alta resistência; NBR 12989:1993 – Cimento Portland Branco.

de Cimento Portland por uma adição mineral pozolânica retira potencialmente a reserva alcalina⁹ destes cimentos, dada primeiro a uma menor quantidade de produtos carbonatáveis que possam resultar da hidratação destes cimentos, aliado ao consumo de hidróxidos de cálcio devido a atividade pozolânica da adição, que culmina num produto muito similar ao gel de CSH (FILHO et al., 2013; GOBBI, 2014).

Medeiros et al., (2017) em sua investigação sobre a implicação do emprego de sílica ativa e metacaulim como acréscimo e substituição ao cimento na carbonatação de concretos, observaram que quando empregada como acréscimo (100% cimento + sílica) a sílica ativa reduz a velocidade de carbonatação, ao passo que, quando utilizada como substituição parcial – 10% em massa referente ao consumo do cimento (90% cimento + 10% sílica) –, há um aumento da velocidade de carbonatação (32%). A substituição parcial de cimento por metacaulim apresentou aumento da velocidade de carbonatação com mesma intensidade da sílica ativa. Entretanto, quando utilizado como adição o metacaulim apresentou redução de 8,0% na velocidade de carbonatação, eficiência muito inferior quando comparado a sílica ativa, de 69%. Segundo os autores a utilização de adições pozolânicas apesar de diminuírem a reserva alcalina da matriz provocam o refinamento e redução dos poros, dificultando o ingresso de CO₂, entretanto, nas amostras com adição de metacaulim o efeito do refinamento dos poros foi predominante em comparação a redução da reserva alcalina.

A frente de carbonatação é afetada portanto, pela reserva alcalina (BUCHER, R CYR; M ESCADEILLAS, 2015) quanto maior a reserva, menor a velocidade de propagação, haja vista que o CO₂ precisa reagir com todo o hidróxido disponível antes de avançar matriz a dentro (NUNES; HELENE, 1998; DE MEDEIROS et al., 2017). Contudo, uma maior frente de carbonatação não está necessariamente relacionada a uma maior captura de CO₂. Em seu estudo Mazurana (2019) constatou que argamassas de cimento possuíam maior profundidade de carbonatação que argamassas mistas, porém as argamassas mistas capturaram até 42,35 kgCO₂/m³ a mais que argamassas cimentícias.

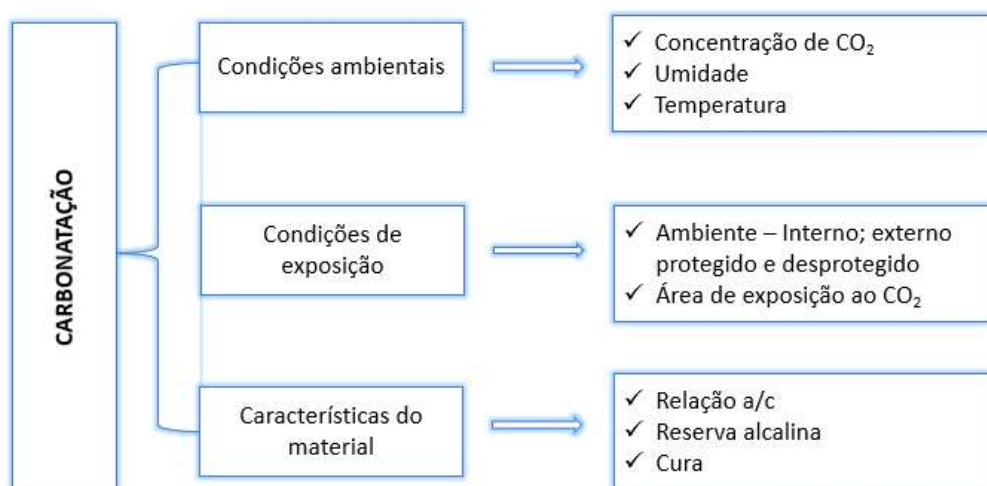
⁹ Reserva alcalina é a quantidade de Ca(OH)₂ que pode ser formada na reação de hidratação do cimento dada a proporção de clínquer na mistura cimentícia.

Assim sendo, para uma mesma profundidade carbonatada as argamassas mistas podem aprisionar mais CO₂ do que argamassas simples de cimento.

2.4.4 Variáveis que influenciam a captura de CO₂

Como visto existem fatores que influenciam a velocidade da reação de carbonatação, que estão relacionados ao ambiente, condições de exposição e características da matriz (Figura 6). Assim como a velocidade de carbonatação estes fatores influenciam potencialmente a captura de CO₂. No que diz respeito a concentração de CO₂ sabe-se que a captura por carbonatação ocorre mesmo em baixas concentrações do gás e se eleva a medida que essa concentração aumenta (FELIX, CARRAZEDO, POSSAN, 2017; ANTONIO, 2018). Outro aspecto que possui influência sobre a captura é a área superficial do elemento, sendo que quanto maior a área exposta, maior a capacidade de captura, parâmetro este analisado pela relação m²/m³ de material (POSSAN, 2019).

Figura 6 – Fatores que influenciam a captura de CO₂ por carbonatação



Fonte: Autoria própria (2021)

A reserva alcalina também possui influência na captura. De acordo com Antônio (2018) argamassas de cal possuem potencialmente maior capacidade de captura de CO₂, devido a uma maior quantidade/disponibilidade de produtos suscetíveis a carbonatação, podendo capturar até 79% CO₂ do que argamassas a base de cimento.

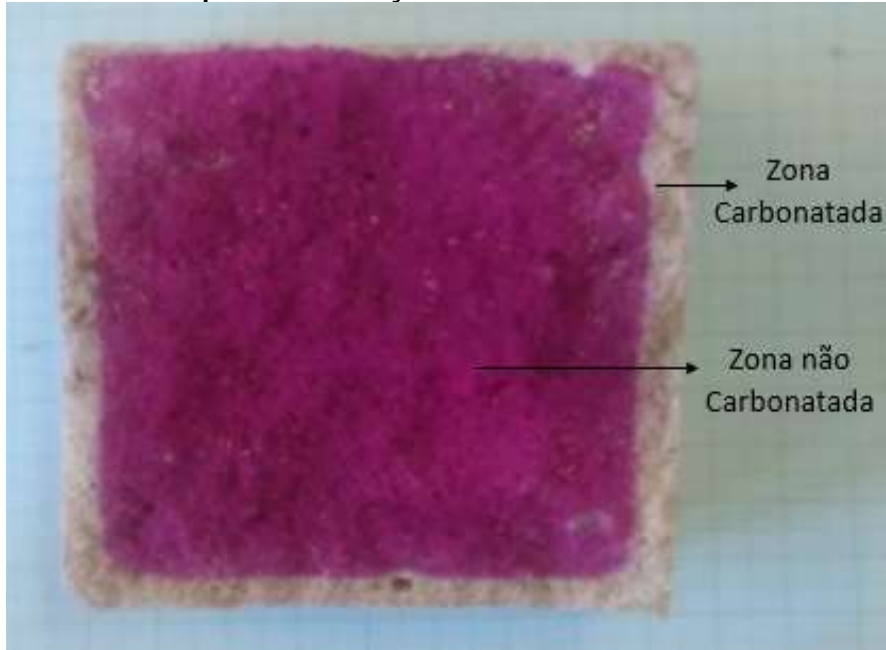
2.4.5 Medição da carbonatação

Existem vários métodos para medição da carbonatação em corpos de prova que sofreram carbonatação. Um dos métodos mais empregados devido a sua facilidade consiste na análise da profundidade carbonatada, evidenciada por meio da aspersão de indicadores de pH, feito por meio de paquímetro digital ou softwares de análise de imagem (RUFATTO, 2019). Outro método bastante atual consiste na medição do CO₂ absorvido por meio de análise termogravimétrica (ANDRADE; SANJUÁN, 2018). Ambos os métodos foram empregados para avaliação da carbonatação no presente trabalho.

2.4.6 Medição da carbonatação por indicador de pH

Indicadores visuais são substâncias capazes de mudar sua coloração a depender das características físico-químicas do substrato onde são aspergidos, como por exemplo o pH (TERCI; ROSSI, 2002). A carbonatação provoca redução do pH de materiais de base cimentícias – de 13,5 para 8,5 aproximadamente – decorrente principalmente do consumo de hidróxido de cálcio. A fenolftaleína – indicador de pH – possui faixa de viragem de 8,3 a 10,0, quando aspergida em argamassas evidenciam a diferenciação entre as zonas carbonatadas e não carbonatadas (RUFATTO, 2019). A solução empregada “é geralmente 1% de fenolftaleína em etanol ou em uma mistura de 70% de etanol e 30% de água” (CHINCHÓN-PAYÁ; ANDRADE; CHINCHÓN, 2016, p. 87). Após a aspersão a coloração da superfície tende-se a manter inalterada caso o pH seja menor que 9 (zona carbonatada), e para valores maiores que 10,5 a superfície tende-se a tornar-se de coloração vermelha carmim (zona não carbonatada) (Figura 7).

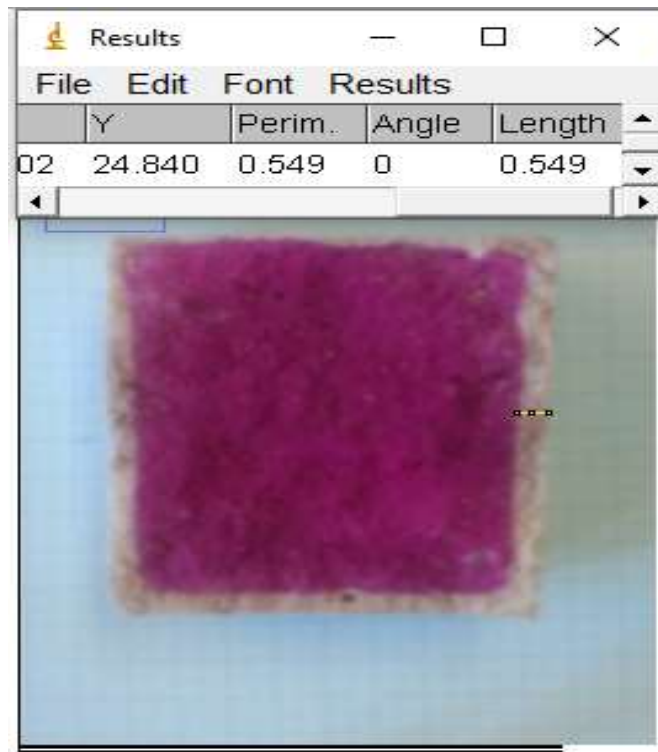
Figura 7 – Indicador de pH e evidenciação das zonas carbonatada e não carbonatada



Fonte: Aatoria própria (2021)

A profundidade carbonatada, o que se deseja conhecer, pode ser avaliada através da leitura por paquímetro ou por análise de imagem. O método da medição com utilização do paquímetro consiste basicamente na tomada de diferentes medidas de profundidade carbonatada em ao menos uma de cada uma das faces do corpo de prova fraturado (MAZURANA, 2019). Já pelo uso de imagem, pode-se utilizar o software imagem J, que consiste na utilização de imagens para obtenção de medidas como área e perímetro utilizando-se de ferramentas de ajuste de contraste, brilho e nitidez (Figura 8). Entre os métodos apresentados o segundo, com base na análise da imagem do corpo de prova, possui maior eficácia devido ao fato dessa imagem ser digitalizada o que confere a mesma grande agilidade no processo eliminando o fator erro humano, além do fato de a imagem poder ser armazenada para análises posteriores (DILONARDO et al., 2015).

Figura 8 – Obtenção de profundidade carbonatada obtida através do software ImagemJ



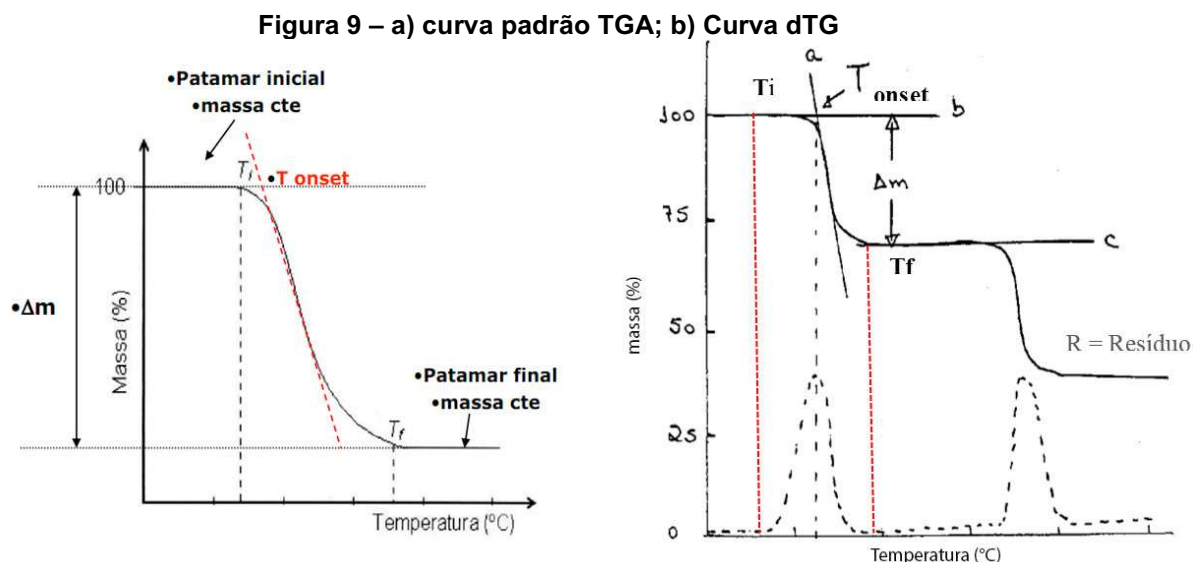
Fonte: Autoria própria (2021)

2.4.6.1 Medição da carbonatação por análise termogravimétrica

A análise térmica é um conjunto de técnicas que consistem no acompanhamento de uma propriedade física específica de dada substância em função da variação controlada da temperatura. A análise termogravimétrica (TGA) e a Termogravimetria derivada (dTG) – técnicas mais conhecidas –, têm como finalidade por meio da variação da massa da amostra sob influência de um programa de aquecimento controlado quantificar componentes presentes em uma amostra à partir de suas reações de decomposição ou oxidação (DENARI; CAVALHEIRO, 2012; NEVES JUNIOR, 2014).

A Figura 9a abaixo apresenta uma curva padrão de análise termogravimétrica (TG), onde é possível visualizar a ocorrência de variação da massa em função do aumento da temperatura. De acordo com a ASTM E 2550-11 a temperatura inicial T_i é a menor temperatura em que pode ser detectado o início da variação de massa para determinado conjunto de condições experimentais e T_f é a temperatura final onde o processo que propiciou a perda

de massa é dado como concluído. O pico da dTG gerada, por meio de seus pontos de inflexão auxiliam na identificação das temperaturas de início e de fim de cada evento térmica (Figura 9b).

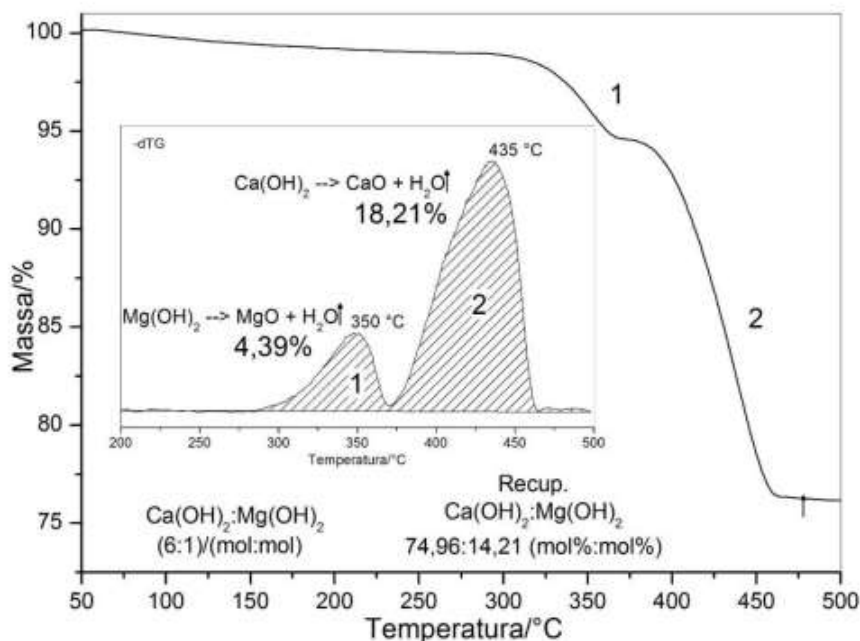


Fonte: Análises térmicas (2017)

No estudo de carbonatação em argamassas o uso da análise térmica pode fornecer o grau de carbonatação das amostras, por meio da avaliação do potencial de captura de CO₂, mediante a comparação entre a quantidade de massa perdida em uma amostra carbonatada e outra não carbonatada (GALAN et al., 2010). Em argamassas mistas as perdas de massa acontecem em três etapas principais distintas (

Figura 10), a primeira perda de massa ocorre a temperaturas próximas a 350°C com a decomposição do hidróxido de magnésio, seguido pela decomposição do hidróxido de cálcio nas faixas de temperatura de 400 e 450°C, e por fim, a decomposição do carbonato entre 650 a 800°C (ZHANG; YE, 2012). Conhecendo-se a quantidade de H₂O e CO₂ liberados pela decomposição dos hidróxidos e carbonatos, respectivamente, pode-se determinar a porcentagem de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio, carbonato de cálcio e magnésio constantes em cada amostra (GALAN et al., 2010).

Figura 10 – TG e dTG de hidróxidos de cálcio e magnésio em argamassa mista



Fonte: Mazzurana (2019)

2.5 Sistema de revestimento em argamassas

De acordo com a NBR 13529 (ABNT, 2013a, p.1) um sistema de revestimento é o “conjunto formado por revestimento de argamassa e acabamento decorativo, compatível com a natureza da base”. Já revestimento em argamassa é o cobrimento do substrato com a finalidade de propiciar o recebimento de um acabamento do tipo pintura, ou configurar-se um acabamento.

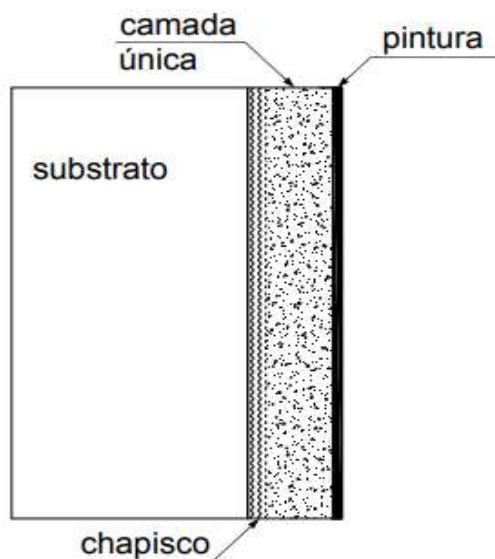
Para Carasek (2010), as argamassas de modo geral, enquanto materiais de construção possuem como propriedades principais endurecimento, retenção de água e aderência, sendo obtidas a partir da mistura de um ou mais aglomerantes, agregado miúdo (geralmente areia), água, aditivos e/ou adições. As mesmas podem ser empregadas na construção civil em diversas etapas da obra e com diferentes finalidades, a saber: assentamento de alvenarias; sistema de revestimento interno e externo; argamassa colante ou de rejuntamento de cerâmicas; regularização de contrapisos, entre tantas outras.

2.5.1 Argamassas de revestimento

Quando empregadas como revestimento as argamassas têm por função criar uma camada superficial que propicie ao substrato um acabamento regular, proteção e embelezamento. Em geral há diferentes requisitos para argamassas aplicadas em ambientes interno e externo. No primeiro os aspectos estéticos, higiênicos e de segurança tem papel determinante, ao passo que em ambientes externos a função protetora se sobressai, embora continue importante a função decorativa (BERTOLINI, 2010).

Dentro do sistema construtivo brasileiro o método de revestimento argamassado empregado em maior escala consiste basicamente na aplicação de uma única camada de argamassa, conhecido popularmente como camada única ou reboco paulista, sobre a qual pode ainda ser aplicado o acabamento final do tipo pintura (Figura 11) (CARASEK, 2010).

Figura 11 – Reboco estilo massa única



Fonte: Carasek (2010)

Para a NBR 13749 (ABNT, 2013b) a espessura do revestimento argamassado é função do ambiente ao qual é aplicado (interno e externo), as espessuras limites podem ser vistas na Tabela 3, e recomenda-se uma espessura de revestimento maior para ambientes externos do que ambientes internos em função da agressividade/intempéries que o ambiente externo está mais propício a receber.

Tabela 3 – Espessuras indicadas para revestimentos em função do ambiente

Revestimento	Espessura (e) mm
Interno	$5 \leq e \leq 20$
Externo	$20 \leq e \leq 30$

Fonte: Adaptado de NBR 13749 (2013)

As argamassas enquanto materiais de construção devem atender diferentes propriedades, requeridas em ambos os estados, fresco e endurecido, sendo elas: trabalhabilidade, consistência e plasticidade, retenção de água, adesão, resistência de aderência na tração, resistência à compressão e a flexão, capacidade de absorver pequenas deformações, entre outras (PCIZIECZEK, 2017).

No que diz respeito a reação de carbonatação, sabe-se que quanto maior a porosidade das argamassas, maior a facilidade que o CO₂ vai encontrar para “penetrar” no meio, em condições iguais de umidade. Em argamassas simples a porosidade está associada a quantidade de água na mistura além da necessária para as reações de hidratação. Sendo, portanto, a relação água/aglomerante diretamente proporcional a porosidade dessas argamassas. Nas argamassas mistas devido a presença de cal, de maior massa específica que o cimento, há necessidade de aumento na demanda de água da mistura para se manter uma mesma consistência, essa água quando não consumida (combinada quimicamente) pela reação de hidratação do cimento culmina no aumento da porosidade dessas argamassas (QUARCIONI et al., 2009).

De maneira geral sobre as alvenarias depois de revestidas por argamassas aplica-se um acabamento. O presente trabalho pretende avaliar o efeito de diferentes configurações de sistema de pintura no que diz respeito a difusão de CO₂, sendo, portanto, necessário conhecer alguns conceitos relativos a esses sistemas de pintura.

2.5.2 Sistema de pintura

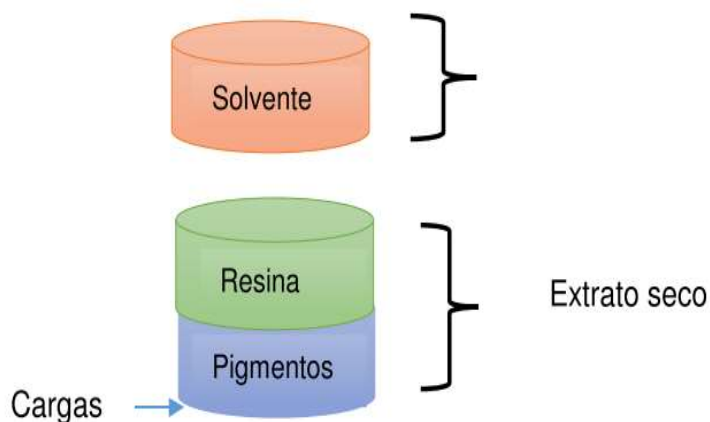
Para Souza et al., (2018, p. 4439) “O Brasil é atualmente um dos principais produtores e igualmente um dos principais mercados consumidores de tintas e revestimentos do mundo”, figurando na 5º posição entre os maiores mercados mundiais. O setor das tintas no Brasil deve essa importância a indústria da

construção civil. No ano de 2020 o setor de tintas produziu mais de 1,6 Bilhão de litros de tinta, destes, 1,36 bilhão corresponde as tintas imobiliárias, ou seja, 83,4% das tintas produzidas naquele ano tem como destino final utilização na construção civil.

Materiais de construção como a madeira, aço e concreto devem sua durabilidade a um tratamento superficial a eles aplicado, que tem por objetivo protegê-los contra o ataque de agentes agressivos presentes no ambiente. Este tratamento na maior parte dos casos consiste na aplicação de camadas sucessivas de uma substância polimérica sobre a superfície, cujo objetivo é a formação de uma película protetora (BERTOLINI, 2010). A tinta portanto, é um material que possui funções de estética e proteção (UEMOTO, 2002).

De acordo com a NBR 13245 (ABNT, 2011, p. 1) sistema de pintura é a “adequada combinação entre fundo, massa e acabamento”, formulados a partir de uma mesma resina. Não se deve, portanto, ser considerado pintura apenas a tinta de acabamento, tendo cada um dos produtos necessários ao sistema de pintura uma função específica. Tinta de acordo com a NBR 12554 (ABNT, 2013c, p. 2) é formada a partir da dispersão de pigmentos em uma solução de pelo menos um polímero, que ao ser aplicado sobre uma superfície adere-se a mesma, formando um filme com funções diversas (colorir, proteger ou embelezar). De modo geral as tintas são constituídas por três componentes básicos: a resina/veículo ou polímero, o pigmento e o solvente (Figura 12) (UEMOTO, 1998).

Figura 12 – Composição básica de tintas



Fonte: Santos (2015)

A proteção do substrato atribuído às tintas, ou seja, a barreira contra o ingresso/penetração dos agentes agressivos está associada à sua microestrutura e porosidade. Estas duas características dependem da formulação dos componentes dessas misturas, principalmente da estrutura química dos polímeros e morfologia dos pigmentos empregados (LOH, 2017).

As características e propriedades requeridas por cada tipo de tinta resultam essencialmente do proporcionamento dos seus constituintes. Um parâmetro corriqueiramente empregado na indústria para apresentar a composição das tintas é a fração volumétrica do pigmento, denominada por PVC (Pigment Volumen Concentration, da sigla em inglês). PVC é o valor correspondente ao volume ocupado pelo pigmento na formulação das tintas dividido pelo volume do filme da tinta (inclusive a resina) (Equação 6). O PVC de uma tinta tem influência direta na porosidade do filme que se formará, resultando em diferenças em sua permeabilidade, e conseqüentemente no grau de proteção conferido ao substrato, na aderência e acabamento, entre outras propriedades das tintas. Na prática os dados de PVC dão uma noção da permeabilidade do filme de tinta, além de permitir distinguir os tipos de acabamentos (brilhante, semibrilho e fosco) conforme Tabela 4 (LOH, 2017).

$$PVC = \frac{V_p}{V_p + V_v} \quad (\text{Equação 6})$$

V_p = Volume de pigmento

V_v = Volume de veículo não volátil (resina)

Tabela 4 – Tipo de acabamento das tintas de acordo com o PVC

Acabamento	PVC (%)
Alto brilho	10 – 15
Semibrilho	15 – 30
Acetinado	30 – 35
Fosco	35 – 45

Fonte: LOH (2017)

Em suma, quando uma tinta possui alto valor de PVC significa que possui alto teor de pigmento e conseqüentemente baixo teor de resina. Sendo a resina responsável pela permeabilidade da película, quanto maior o teor de pigmento presente na composição maior também será a porosidade do produto seco, tornando-se menos eficiente quanto a proteção, por essa lógica as tintas foscas

conferem menor proteção que as tintas semibrilho (destinadas a alvenarias). Para Tracton (2006), há um ponto em que o teor de pigmento em um sistema é alto o suficiente para causar o deterioramento do filme produzido, havendo, portanto, um limite para o teor de pigmento. Este ponto é chamado de CPVC, conteúdo crítico de volume de pigmento.

Dentre as tintas encontradas no setor da construção civil – tintas imobiliárias – as de acabamento em alto brilho, conhecidas como esmaltes sintéticos tem sua aplicação destinada a cobertura de materiais como madeira, metal e vini, não sendo empregadas em alvenarias. As tintas imobiliárias são divididas em dois grupos de produtos: aquosos (látex) e base de solvente orgânico. Do primeiro grupo fazem parte às tintas látex acrílica, látex vinílica, látex vinil-acrílico, entre outras, do segundo grupo fazem parte as tintas a óleo, esmaltes sintéticos, entre outras (CETESB, 2008). Comercialmente as tintas látex são classificadas de acordo com o seu desempenho, classificadas pela a NBR 11702 (ABNT, 2019) em Econômica, Standard, Premium e Superpremium¹⁰. Os limites mínimos e métodos de ensaio para as tintas, acabamento semibrilho e fosco de cores claras podem ser visualizados na Tabela 5 e Tabela 6, respectivamente.

Tabela 5 – Requisito de desempenho das tintas látex semibrilho cores claras

Requisitos	Método de ensaio	Unidade	Limites mínimos do requisito de desempenho - Tinta Látex			
			Standard	Premium	Super Premium	
Poder de cobertura de tinta seca	ABNT NBR 14942	m ² /L	4,0	5,0	7,0	
Rendimento	ABNT NBR 14942	m ² /embalagem acabado	18La	70	90	90
			3,6La	14	18	18
			0,6La	3,5	4,5	4,5
Poder de cobertura de tinta úmida	ABNT NBR 14943	%	85,0	90,0	90,0	
Resistencia a abrasão úmida com pasta abrasiva	ABNT NBR 14940	Ciclos	100	150	200	
Determinação de brilho	ABNT NBR 15299	UB	18 ≤ Brilho < 40 a 60°			

Fonte: Adaptado de NBR 15079 – 2 (ABNT, 2019)

¹⁰ A referida norma passou a ter obrigatoriedade em março 2021, portanto muitas empresas ainda não haviam se regularizado, não sendo considerado esta qualidade de tinta na realização do presente trabalho.

Tabela 6 – Requisito de desempenho das tintas látex fosca cores claras

Requisitos	Método de ensaio	Unidade	Limites mínimos - Tinta Látex				
			Econômica	Standard	Premium	Super Premium	
Poder de cobertura de tinta seca	ABNT NBR 14942	m ² /L	4,0	5,0	6,0	7,0	
Rendimento	ABNT NBR 14942	m ² /bem.	18La	70	90	110	150
			3,6La	14	18	22	30
			0,6La	3,5	4,5	5,5	7,5
Poder de cobertura de tinta úmida	ABNT NBR 14943	%	55,0	85,0	90,0	90,0	
Resistencia a abrasão úmida sem pasta abrasiva	ABNT NBR 15078	Ciclos	100	-	-	-	
Resistencia a abrasão úmida com pasta abrasiva	ABNT NBR 14940	Ciclos	10	40	100	200	

Fonte: Adaptado de NBR 15079 – 2 (ABNT, 2019)

De acordo com Polito (2006), ao se variar aspectos como resina, pigmento, porção líquida e aditivos, consegue-se construir distintas variedades de tintas. Sendo o teor de sólidos, conteúdo de pigmentos e a quantidade de óxidos de titânio alguns indicadores da qualidade de tintas. Em termos gerais quanto maior a porcentagem de sólidos em volume na composição da tinta, maior será a espessura da película formada, o que se traduz em maior cobertura e proteção da superfície, implicando maior durabilidade da tinta.

Conforme NBR 15079 (ABNT, 2019) ambos os tipos de tinta látex podem ser aplicadas em ambiente interno. Entretanto, em ambiente externo devem ser utilizadas obrigatoriamente as tintas designadas como Standard, Premium e Superpremium. Com relação ao tipo de resina empregada na composição das tintas, ainda há quem acredite que tintas acrílicas sejam destinadas para uso externo, enquanto as PVA estariam reservadas a espaços internos. Bonfim (2013) faz ressalvas quanto a essa ideia equivocada, haja vista que existem tintas acrílicas econômicas indicadas apenas para uso interno, ao passo que existem tintas látex PVA Standard e Premium que podem ser aplicadas também em ambiente externo.

A designação tinta látex deriva da forma com que ela se apresenta similarmente ao líquido látex das seringueiras. As tintas látex comercializadas consistem em uma forma de emulsão aquosa contendo copolímeros de acetato de vinila, fumurato de butila entre outros (látex PVA) ou ainda constituída de copolímeros acrílicos como o metacrilato de metila copolimerizado com acrilato de etila ou butila (Látex Acrílico). As tintas látex são consideradas uma alternativa menos agressiva ao meio ambiente por se tratar de tintas à base de água, relação às tintas de base solvente (UEMOTO, 2006).

2.5.3 Componentes das tintas

2.5.3.1 Resina

Para Santos (2015) o veículo fixo ou resina, como também é conhecida é o componente não volátil das tintas, tem como função principal aglutinar as partículas do pigmento, sendo o agente formador do filme e, portanto, o composto de maior importância dentro da mistura. As resinas possuem grande importância nas propriedades da película, haja vista que na sua ausência os demais componentes das tintas não teriam sequer aderência ao substrato. À resina também é creditada a resistência das tintas quando expostas a intempéries. Essa resistência da tinta portanto, é função da resistência da própria resina e devido ao proporcionamento entre os componentes presentes na formulação das mesmas (POLITO, 2006; LOH, 2017).

Uma formulação de tinta com pouca resina terá desempenho deficiente, uma vez que terá durabilidade extremamente baixa. Embora saibamos que as propriedades das tintas resultam da sinergia dos seus componentes, “a resina atribui à tinta a maior gama de características e propriedades, tais como brilho, dureza, flexibilidade, adesão, resistência mecânica e química” (PILZ, 2004, p. 3). A resina é tão importante na formulação de tintas que serve para caracterizá-la. Com relação a sua formulação, as tintas à base de solvente podem e são formuladas a partir de resinas sintéticas ou naturais. Dentre as tintas imobiliárias a base de água, a resina utilizada é essencialmente sintética, podendo ser empregada a resina 100% acrílica (conhecida como acrílica) ou ainda a vinil

acrílica (conhecida como acetato de polivinil ou PVA). Sendo que as primeiras apresentam melhor adesão a superfície – conferindo, portanto, maior durabilidade – quando comparadas as tintas de base PVA aplicadas em superfícies alcalinas, como é o caso dos substratos argamassados (POLITO, 2006).

2.5.3.2 Pigmentos e aditivos

“Os pigmentos são substâncias insolúveis no meio em que são utilizados (orgânico ou aquoso) e têm como finalidade principal conferir cor ou cobertura às tintas” (CETESB, 2008). Em resumo, os pigmentos são utilizados para dar cor e opacidade à película seca, além de reforçar características protetoras (aparência estética, resistência à corrosão; ação retardadora ao fogo; dureza, etc.) através de suas características físicas e/ou químicas (DORNELES, 2008). Em tintas os aditivos são adicionados com propósitos variados, e não constituem um grupo homogêneo. Os aditivos diferem entre si pela composição química e funções, tendo como fator comum a pequena quantidade na qual são adicionados (BIELEMAN, 2000).

2.5.3.3 Solvente

O solvente em composição de tintas é o agente que permite que ela seja aplicada às superfícies. O termo solvente é utilizado para incluir líquidos que não dissolvam o aglutinante polimérico. Vários são os parâmetros para a escolha do material solvente, e é raro que um único solvente seja aceitável na maioria das situações, os fatores que influenciam são: solvência, taxa de evaporação, odor, toxicidade, inflamabilidade e claro o custo. Estes fatores assumem diferentes graus de importância, a depender do emprego da tinta (LAMBOURNE; STRIVENS, 1999).

As tintas imobiliárias destinadas à construção civil de modo geral se apresentam como produtos aquosos ou de base solvente orgânica, no primeiro enquadram-se as tintas conhecidas como látex e no segundo as tintas a óleo, esmaltes sintéticos. Atualmente existe um esforço mundial para que haja a

redução do uso de tintas à base de solventes orgânicos haja vista maior liberação de compostos orgânicos voláteis, pois são compostos que podem acarretar riscos à saúde (CETESB, 2008).

2.5.4 Emissões das tintas

De acordo com Merten et al., (2016) as tintas principalmente as de base solvente emitem compostos orgânicos voláteis (COV's) que contribuem com a formação da camada de ozônio e podem agredir a saúde humana causando problemas como vertigens, náuseas, irritações em olhos, garganta entre outros inconvenientes. A emissão dos COV's de tintas inicia-se na fase de pintura em obra e nas primeiras idades de ocupação. Ao solvente, por ser a parte volátil de tintas, é atribuída a maior parcela de contribuição das emissões de COV's (SANTOS, 2015). As emissões orgânicas podem ocorrer em decorrência de diversos processos, como combustão incompleta, emissões diretas durante a produção, principalmente em recipientes abertos, emissões fugitivas de silos onde a matéria prima é armazenada e devido a limpeza dos equipamentos, entre outros (CETESB, 2006).

Hammond e Jones (2008) analisando as emissões e energia dos materiais da indústria da construção, afirmam que as emissões de CO₂ por parte das tintas são da ordem de 1,06 kgCO₂/m² considerando-se a pintura de duas demãos no processo, assumindo que 3,33 m² puderam ser cobertos por cada kg de tinta. E para uma única demão emite-se 0,53 kgCO₂/m², pintando então 6,66m² por kg de tinta.

Buchmann (2018) em seu estudo no qual fora analisado o ciclo de vida de duas tintas imobiliárias, ambas a base d'água e de coloração clara (a tinta de referência, tinta A, produzida com matérias-primas de uso convencional por parte da indústria, e a tinta B produzida com matérias-primas alternativas visando um melhor desempenho ambiental do produto final), constatou que quando analisado o fator mudanças climáticas, medidos em kgCO_{2e}, a proporção de emissão de ambas as tintas se mostrou equivalente, sendo em média: 93,5% de dióxido de carbono (CO₂), 5,5% metano (CH₄) e 1,1% de óxido nitroso (N₂O). Entretanto, a tinta formulada a partir de materiais alternativos emitiu menos GEE

do que a tinta formulada com parâmetros usuais da indústria. Os valores em kgCO₂eq/t de tinta produzida podem ser vistos na Tabela 7.

Tabela 7 – indicadores de GEE de tintas por tonelada produzida

Indicadores da categoria	Ciclo de vida Tinta A	Ciclo de vida tinta B	Unidade
CO ₂	262.186,00	213.355,40	kgCO ₂ eq
CH ₄	15.302,70	12.433,70	kgCO ₂ eq
N ₂ O	2.956,60	2.424,40	kgCO ₂ eq
Total	280.478,80	228.241,90	kgCO₂ eq

Fonte: Adaptado de Buchmann (2018)

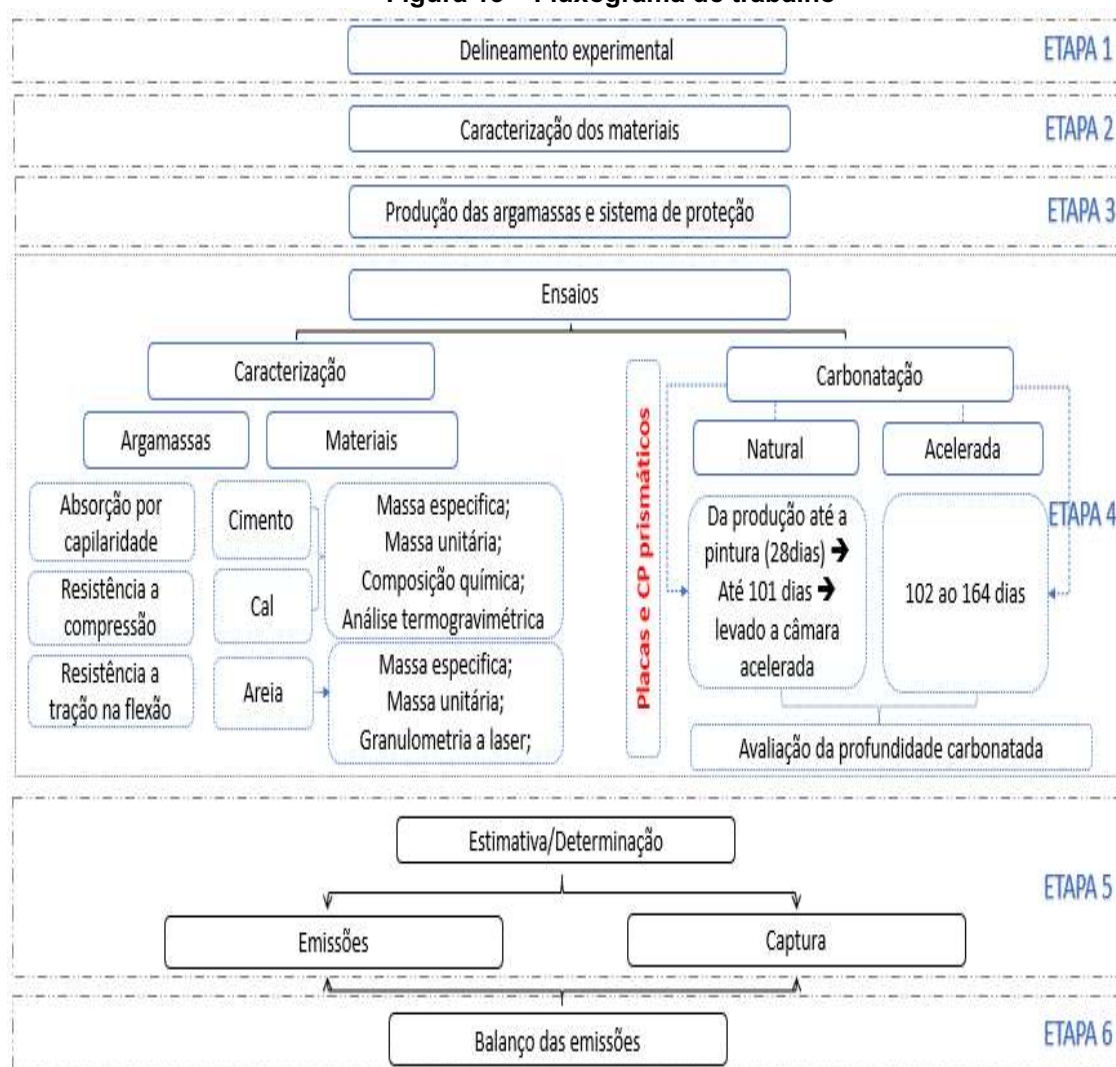
Dentro do processo produtivo de ambas as tintas o processo referente a etapa de carbonato de cálcio precipitado¹¹, responsável por 94,3% das emissões (2,65x10⁵ kgCO₂eq no ciclo de vida das tintas A e 2,15x10⁵ kgCO₂eq para a tinta B) 4,55% aproximadamente é atribuída ao fornecimento de energia elétrica, e 0,05% advêm do processo de produção do estireno, utilizado na fabricação das resinas.

¹¹ O carbonato de cálcio precipitado é uma carga mineral muito utilizada na indústria de tintas imobiliárias devido ao alto poder de cobertura seca que confere a tinta.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Com a intenção de avaliar a influência de diferentes configurações de sistema de proteção superficial do tipo pintura imobiliária no ingresso e consequente captura de CO₂ por carbonatação em argamassas de revestimento, o presente estudo foi dividido em 6 etapas principais: 1) Delineamento experimental; 2) Caracterização dos materiais; 3) Produção das argamassas e sistema de proteção; 4) Ensaios de caracterização e carbonatação das argamassas; 5) Estimativas de emissões e captura de CO₂, 6) balanço das emissões, conforme Figura 13.

Figura 13 – Fluxograma de trabalho



Nota 1: Aos 28 dias foram retiradas amostras dos CP para posterior análise térmica

Fonte: Autoria própria (2021)

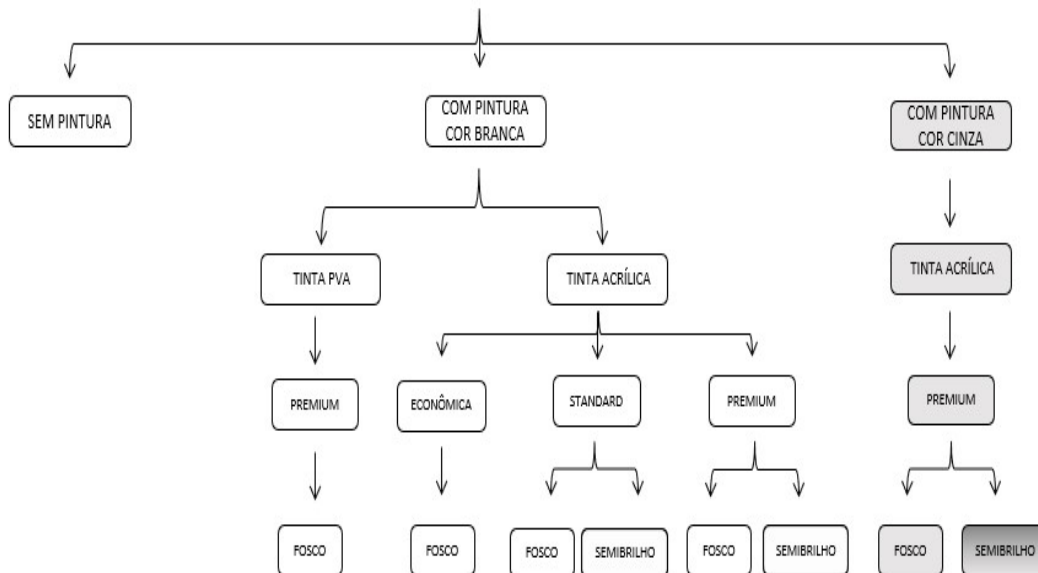
3.1 Delineamento experimental

Para alcançar o objetivo do estudo fez-se necessário o controle das seguintes variáveis:

- a) Tipo de cimento: CP II – Z 32, por ser o mais empregado na indústria da construção para produção e argamassas;
- b) Traço das argamassas: 1:2:9 e 1:1:6;
- c) Exposição ao CO₂ natural e acelerado (concentração de CO₂ de 5%);
- d) Tipos de tinta de acordo com:
 - I. O acabamento (semibrilho e fosco);
 - II. A qualidade (Econômica, Standard ou Premium);
 - III. Composição química da resina (PVA; Acrílica);
 - IV. Cor da tinta/pigmentação (Branca; cinza), a coloração cinza foi escolhida de maneira aleatória para contrapor a cor branca.

Desta forma, o delineamento experimental da composição dos sistemas de proteção produzidos, para os dois traços produzidos é apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Sistemas de proteção produzidos no estudo experimental
TRAÇO (1:1:6 e 1:2:9)



Foram utilizados selador em ambas as amostras produzidas + massa acrílica para tintas acrílicas e massa corrida para tintas PVA, conforme indicação dos fabricantes.

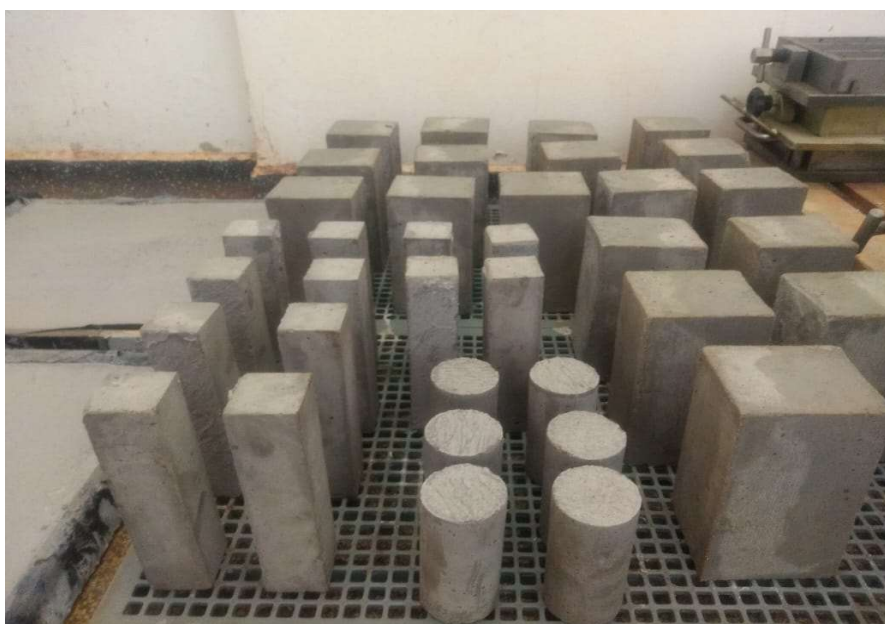
Fonte: Autoria própria (2021)

Para caracterização das argamassas foram realizados ensaios de absorção por capilaridade, resistência à tração na flexão e resistência à compressão. Os corpos de prova submetidos ao ensaio de carbonatação possuíam o sistema convencional de pintura constituído de selador, massa (acrílica ou PVA, conforme especificação do fabricante) e tinta de acabamento.

3.1.1 Amostras

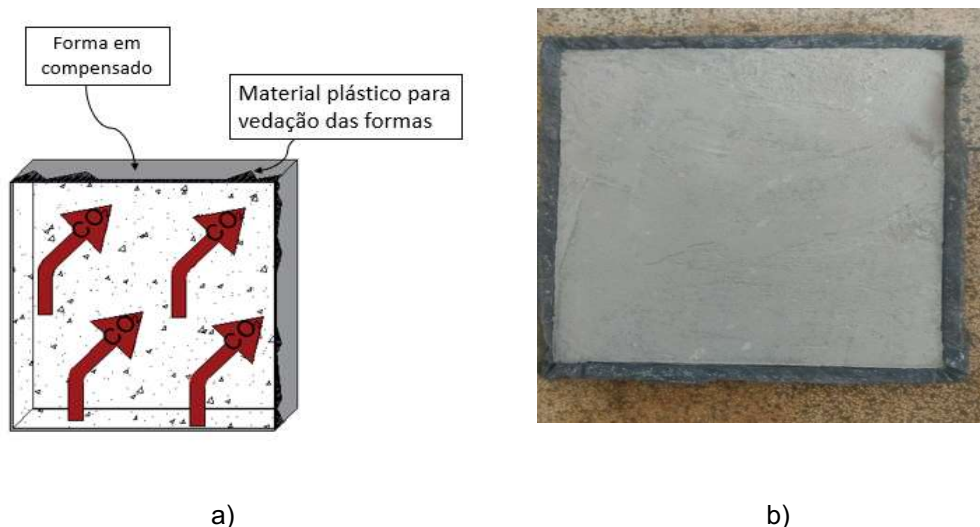
Para avaliar o efeito da proteção superficial na difusão e captura de CO₂ foram produzidos corpos de prova nas dimensões 7,5x9,5x15cm e placas de 40x40x2,5cm (Figura 16). Os corpos de prova prismáticos e as placas foram submetidos a ação de CO₂, sendo medida a profundidade carbonatada ao longo do tempo com uso de fenolftaleína e paquímetro, e avaliada a captura por análise térmica. Para os ensaios de caracterização das argamassas quanto à resistência à compressão e tração na flexão, foram produzidos corpos de prova prismáticos na dimensão 4x4x16cm, conforme NBR 13279 (ABNT, 2005a). Além de corpos de prova 5x10cm para ensaio de absorção de água por capilaridade (Figura 15).

Figura 15 – Corpos de prova para análise das propriedades físicas e mecânicas das argamassas produzidas



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 16 – Placa de argamassa a) esquema de difusão do CO₂; b) simulando revestimento em parede



Fonte: Autoria própria (2021)

Nas Tabela 8 e Tabela 9 encontram-se discriminados a quantidade de corpos de prova produzidos para os ensaios realizados no estudo.

Tabela 8 – Quantidade de corpos de prova produzidos para os ensaios físicos e mecânicos

ENSAIO	Norma/Procedimento	CP				
		Quantidade por traço	Total	Dimensão (cm)	Idades (dias)	
Físico	Absorção de água por capilaridade NBR 9779 (2012)	4	8	5x10	28	
Mecânico	Resistencia a tração na flexão e resistência a compressão NBR 13279 (2005)	4	8	4x4x16	28	
Carbonatação	Profundidade de carbonatação	-	2 CP por sistema de proteção	40	9,5x7,5x15	14; 28; 101; 127; 164
		-	1 placa por sistema de proteção	11	40x40x2,5	28; 101; 164
	Análise térmica TG e dTG	-	50 mg por traço (ZC e ZNC)	-	-	28; 101; 164

Fonte: Autoria própria (2021)

Tabela 9 – Quantitativo de corpos de prova para os ensaios de carbonatação

Sistema de proteção					CP		Placas
Massa	Resina	Coloração	Qualidade	Acabamento	Acelerado		
					[1:2:9]	[1:1:6]	[1:1:6]
-			Sem pintura	-	4	4	3
Corrida	PVA	Branca	Premium	Fosco	2	2	2
Acrílica	Acrílica	Branca	Econômica	Fosco	2	2	
			Standard	Fosco	2	2	-
				Semibrilho	2	2	-
		Premium	Fosco	2	2	2	
			Semibrilho	2	2	-	
Cinza	Premium	Fosco	2	2	2		
			Semibrilho	2	2	2	
TOTAL DE CP					40	11	

Fonte: Autoria própria (2021)

3.2 Caracterização dos materiais

Para confecção das argamassas foram utilizados o cimento CP II Z – 32 por ser o cimento comumente empregado para produção das argamassas no Brasil. A cal utilizada foi a cal hidratada utilizada do tipo III (CH-III) facilmente encontrada nos mercados da região (mais empregada por possuir menor custo), e areia natural quartzosa proveniente da jazida do Rio Paraná, cidade de Guaíra. Os materiais foram caracterizados conforme ensaios dispostos na Tabela 10. Os ensaios de massa específica, granulometria a laser e mecânica, massa unitária foram realizados no Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais (LADEMA) da Universidade Federal da Integração Latino-americana (UNILA).

Tabela 10 – Caracterização das matérias-primas

Ensaio	Método de ensaio	Materiais			
		Areia	Cimento	Cal	Tinta
Massa específica	NBR NM 52 (2009)	X			
Massa específica	NBR 16605 (2017)		X	X	
Granulometria mecânica	NBR NM 248 (2003)	X			
Massa unitária	NBR NM 45 (2006)	X			
Composição Química – FRX	-		X	X	
Análise Termogravimétrica	-		X	X	

Fonte: Autoria própria (2021)

3.2.1 Cal

Para caracterização da cal foram realizados os ensaios de massa específica, espectrometria de fluorescência de Raios-X (FRX) e análise termogravimétrica.

O valor de massa específica foi obtida através do procedimento descrito na NBR 16605 (ABNT, 2017) referente a determinação da massa específica do cimento e outros materiais pulverulentos. Para tanto, fez-se necessária uma adaptação da norma existente, haja vista a massa específica do cimento ser maior que a da cal. Por tentativa, obteve-se que a massa de cal necessária, que manteve o volume (líquido não reagente + aglomerante) dentro do tubo, ou seja, com volume possível de ser medido foi igual a 45 g. Com auxílio de um frasco de Le Chatellier graduado, usando como líquido não reagente o querosene e uma balança de precisão, pesou-se então os 45g de cal. A querosene foi inserida no frasco entre as marcas 0 e 1 cm³, posteriormente os 45 gramas foram inseridos, sendo anotado o novo valor do líquido, e disto retirado o valor da massa específica da cal.

A cal fora também avaliada por meio de análise térmica. As análises termogravimétricas (TG) foram realizadas no Laboratório de Ensaio da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus de Medianeira, em equipamento marca STA6000 PerkinElmerTM. As amostras foram analisadas em cadinho de platina em atmosfera de nitrogênio, com vazão de 20mL/min para gás de purga, de maneira a remover a umidade existente, sendo submetidas a pré-aquecimento a temperatura de 120°C por 5 minutos, e então foram processadas a uma faixa de temperatura de 90 a 900°C e taxa de aquecimento de 20°C por minuto.

3.2.2 Cimento

O cimento utilizado foi o CP II Z – 32 o qual de acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018) pode conter de 71 a 94% de clínquer + sulfato de cálcio, de 6 a 14% de material pozzolânico e até 15% de material carbonático. Para o cimento

foram realizados os ensaios de massa específica, espectrometria de fluorescência de raios-X e análise termogravimétrica.

O ensaio de massa específica do cimento se processou de maneira análoga ao procedimento empregado para a determinação da massa unitária da cal, empregando procedimento descrito pela NBR 16605 (ABNT, 2017). O ensaio de análise térmica se processou de maneira análoga a análise da cal. A análise de fluorescência de Raio-X foi realizada no Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (CRTI) da Universidade Federal de Goiás – UFG.

3.2.3 Agregado

A areia utilizada foi ensaiada quanto a composição granulométrica, massa específica do agregado e massa unitária. Obedecendo as diretrizes impostas pelas normativas específicas, conforme Tabela 10.

Para análise granulométrica da areia foi empregado procedimento descrito na norma NBR NM 248 (ABNT, 2003) para tanto, a areia foi previamente pesada e seca em estufa, e posteriormente peneirada nas peneiras de série normal. As amostras retidas em cada peneira foram devidamente pesadas e anotadas, destes foram ainda retirados e graficados os valores de módulo de finura, e diâmetro máximo característico (DMC) do agregado utilizado.

Para o ensaio de massa específica da areia utilizou-se o método do picnômetro¹², no qual primeiramente foi pesado o picnômetro preenchido de água, retirou-se um volume de água e pesou-se o conjunto água + picnômetro, inseriu-se 200 g de areia ao picnômetro com auxílio de um funil, de modo a evitar que o agregado aderisse as suas paredes, pesou-se essa nova massa prosseguiu-se preenchendo de água o recipiente tomando o cuidado de remover todo o ar presente. Já para a determinação da massa unitária do agregado utilizou-se procedimento descrito pela normativa ABNT NBR NM 45 (ABNT, 2006).

¹² Este método difere do procedimento normatizado pela NM 52 (ABNT, 2009), entretanto o mesmo é aceito devido a confiabilidade dos dados quando realizados ensaios de maneira correta. Na data da apresentação deste trabalho a norma acima referida já não se encontrava mais em vigor, sendo substituída pela NBR 16916 (ABNT, 2021) que entrou em vigor em 04/2021, não sendo, portanto, considerada neste trabalho, pelo fato de neste momento o ensaio já ter sido realizado.

3.3 Produção e proteção das argamassas

As argamassas foram produzidas em ambiente de laboratório na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, com auxílio de uma betoneira com capacidade de 400 litros, necessária devido o volume de argamassa a ser produzido. Para a produção das argamassas a cal precisou ser maturada por 24 horas, conforme indicado pela NBR 7200 (ABNT, 1998) para tanto, a cal, areia e uma parte da água de amassamento necessária a produção foram misturadas e acondicionadas na própria betoneira com fechamento superior de modo a evitar a saída prematura da água durante o período de maturação.

Os materiais haviam sido previamente pesados, a cal, areia e parte da água necessária já estavam na betoneira devido a necessidade de maturação da cal, o cimento e o restante da água foram então adicionados. A quantidade requerida à produção do volume total das argamassas, em kg, para cada traço pode ser vista na Tabela 11. Os materiais foram misturados por aproximadamente 25 minutos, colocados nas formas e adensados, lá permanecendo (nas formas) por 24 horas quando foram desmoldados. No momento da moldagem das argamassas foram registrados a temperatura e umidade relativa do ambiente, registrando os valores de 27°C e 82% para cada, respectivamente. Uma vez desmoldadas as amostras foram mantidas em ambiente interno (laboratório) para cura ao ar até serem ensaiadas (caracterização e carbonatação).

Tabela 11 – Consumo de materiais por m³ de argamassa produzida

Materiais	Traço	
	1:1:6	1:2:9
Cimento [kg/m ³]	177,94	135,50
Cal [kg/m ³]	96,77	147,39
Areia [kg/m ³]	1545,25	1765,12
Relação água/aglo.	1,24	1,30

Fonte: Autoria própria (2021)

Aos 14 dias as amostras com dimensão 7,5x9,5x16cm, destinadas ao ensaio de carbonatação, receberam impermeabilização em todas as faces com

exceção de uma – pela qual o CO₂ se difundiria. A proteção¹³ se deu pela aplicação de 3 camadas sucessivas de parafina derretida (Figura 17). Já para as placas simulando paredes no momento da sua produção, com o intuito de garantir ingresso de CO₂ em apenas uma das faces, tomou-se como precaução a vedação das arestas da forma com aplicação de silicone, além da utilização de um filme plástico colocado anteriormente ao lançamento das argamassas, cobrindo fundo e laterais. As placas argamassadas moldadas foram mantidas nos moldes (feitas em compensado resinado plastificado) até o momento da medição da profundidade de carbonatação.

Figura 17 – Camadas de parafina aplicadas para proteção dos CP



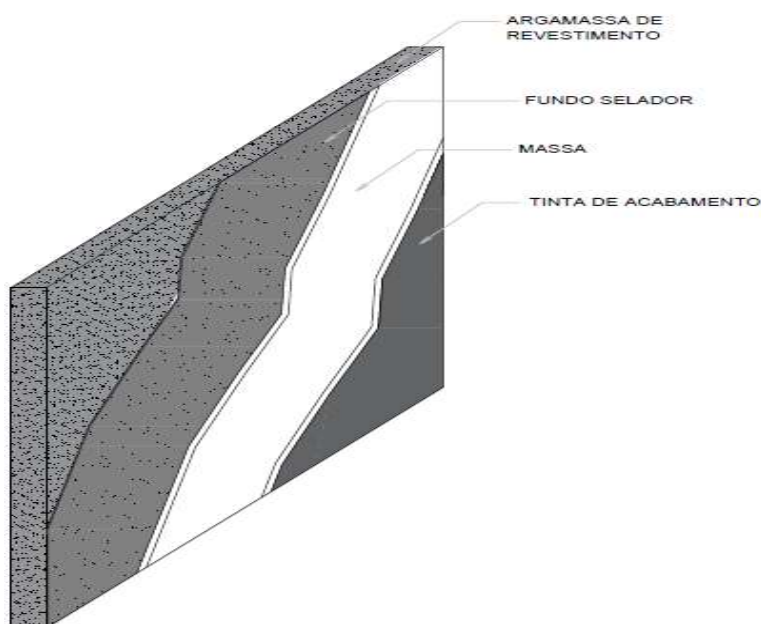
Fonte: Autoria própria (2021)

Decorridos 28 dias da produção conforme indica a normativa NBR 13245 (ABNT, 2011) – que estabelece requisitos para aplicação dos sistemas de pintura – as amostras (cps e placas) de argamassa destinadas ao ensaios de carbonatação, receberam o sistema de pintura na face livre remanescente. Para tal, primeiramente fez-se aplicação de selador, massa de nivelamento (massa acrílica ou massa corrida (PVA) e, por fim tinta de acabamento (Figura 19), na quantidade de demãos recomendada pelo fabricante, com intervalo mínimo de 4 horas entre cada demão. Os materiais utilizados podem ser vistos no

¹³ Sistema de proteção viabilizado por Pedry, (2020).

APÊNDICE A. Para aplicação do sistema de proteção por tintas respeitou-se os limites máximos e mínimos de temperatura – 10 e 40°C, respetivamente – e de 90% de umidade exigidos pela norma acima referida. Com o intuito de garantir a uniformidade do filme da tinta aplicada, foram utilizadas as quantidades de material contidos na Tabela 12. Para tal, os materiais foram pesados e a aplicação foi conduzida com rolo pelo mesmo aplicador.

Figura 18 – Sistema de proteção do tipo pintura aplicado



Fonte: autoria própria (2021)

Tabela 12 – Quantidade de material necessário para revestimento dos CP

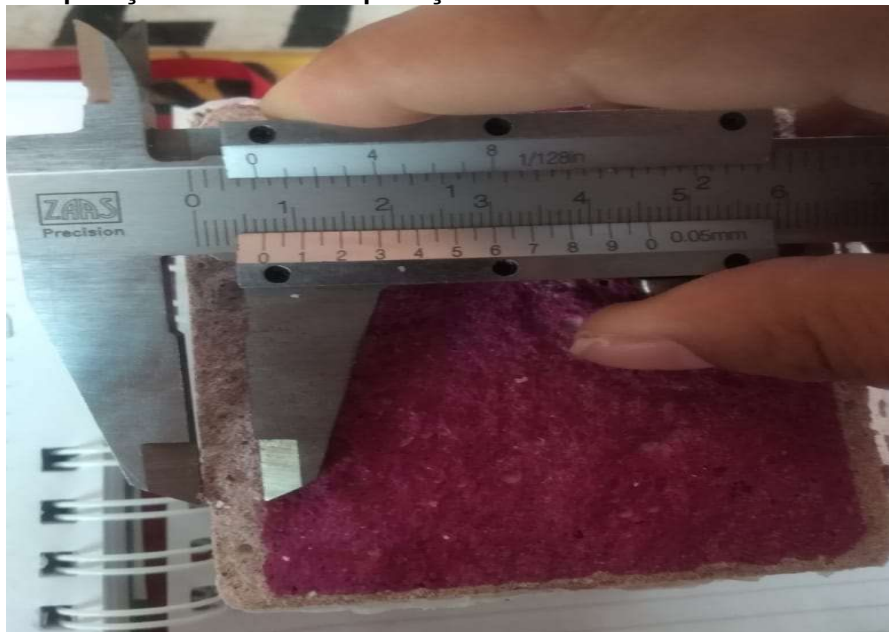
Resina	Qualidade	Acabamento	m ² /demão	CP	Placa	
				g/demão		
Massa PVA	-	-	76	10,39	148,44	
Massa Acrílica	-	-	60,00	5,38	76,80	
Acrílica Cor branca	PVA	Premium	Fosco	380,00	0,68	9,70
		Econômica	Fosco	165,00	1,71	24,44
		Standard	Fosco	350,00	0,77	11,03
		Standard	Semibrilho	300,00	0,80	11,42
		Premium	Fosco	380,00	0,73	10,38
	Premium	Semibrilho	350,00	0,71	10,12	

Fonte: Autoria própria (2021)

Anteriormente a aplicação da tinta, avaliou-se a profundidade de carbonatação de uma amostra de cada traço a fim de determinar a profundidade

carbonatada durante o tempo de cura (nominada de profundidade inicial). Como se deseja analisar a influência da camada protetora quanto à barreira a penetração de CO₂ a carbonatação sofrida até os 28 dias (profundidade inicial) será desconsiderada para efeito da análise do sistema de pintura na difusão de CO₂ (Figura 19). Após essa medição as amostras permaneceram em ambiente interno de laboratório até serem enviadas a câmara de carbonatação acelerada, sofrendo, portanto, carbonatação natural¹⁴ e acelerada. A Figura 20 apresenta a sequência em que ocorreram os ensaios de carbonatação.

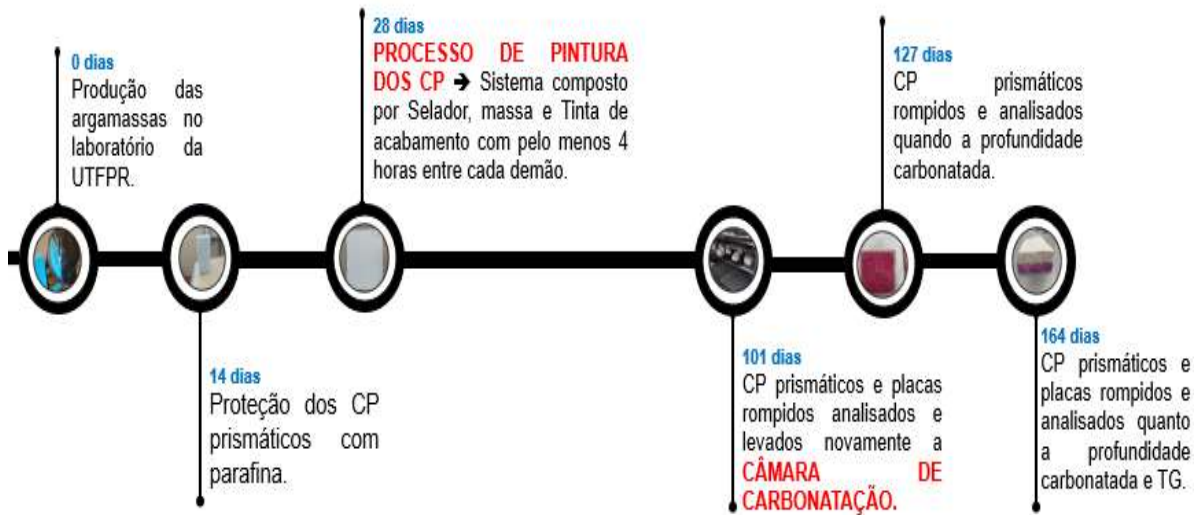
Figura 19 – Avaliação da profundidade carbonatada aos 28 dias, anteriormente a aplicação do sistema de proteção amostra de referência



Fonte: Autoria própria (2021)

¹⁴ A carbonatação natural se deu devido ao fato de as argamassas feitas na UTF-PR de Medianeira não terem sido enviadas de imediato a câmara de carbonatação, cedida pela Universidade Federal da Integração Latino-Americana na cidade de Foz do Iguaçu, em função das restrições da COVID-19.

Figura 20 – Linha do tempo para produção das argamassas e sistemas de proteção



Fonte: Autoria própria (2021)

3.4 Caracterização das argamassas

3.4.1 Ensaio Físicos

Para o ensaio de absorção pelas argamassas realizado aos 28 dias, as amostras precisaram ser secas em estufa até constância de massa sendo posteriormente resfriadas em ambiente de laboratório (temperatura $\pm 23^{\circ}\text{C}$) onde anotou-se sua massa. Os corpos de prova foram então posicionados em um recipiente com água, sobre suportes com furos, de modo que houvesse contato do fundo com a água mantida a altura de 5mm aproximadamente. Realizou-se as leituras dos pesos de cada CP após 3h, 24h, 48h e 72 horas depois de terem contato com a água, como recomendado pela NBR 9779 (ABNT, 2012).

3.4.2 Ensaios Mecânicos

O ensaios de resistência à tração na flexão e compressão axial foram realizados aos 28 dias, conforme determina a normativa NBR 13279 (ABNT, 2005a). Sendo realizado nas dependências do laboratório da União Dinâmica das Cataratas – UDC.

3.4.3 Ensaio de Carbonatação

As amostras (prismáticas e placas) foram enviadas a carbonatação acelerada aos 101 dias de produzidas (73 dias depois de pintadas)¹⁵. Portanto, essas argamassas sofreram também processo de carbonatação natural. O processo de carbonatação em ambiente acelerado se deu em câmara acelerada da marca Bass, com concentração de CO₂ de 5%, temperatura de 23°C e UH de 60%. O tempo de exposição das amostras ao CO₂ foi de 63 dias correspondendo a idade de hidratação de 164 dias. Ou seja, exposição ambiente ao CO₂ de 28 dias, 73 dias com pintura também em ambiente natural e 63 dias em ambiente acelerado.

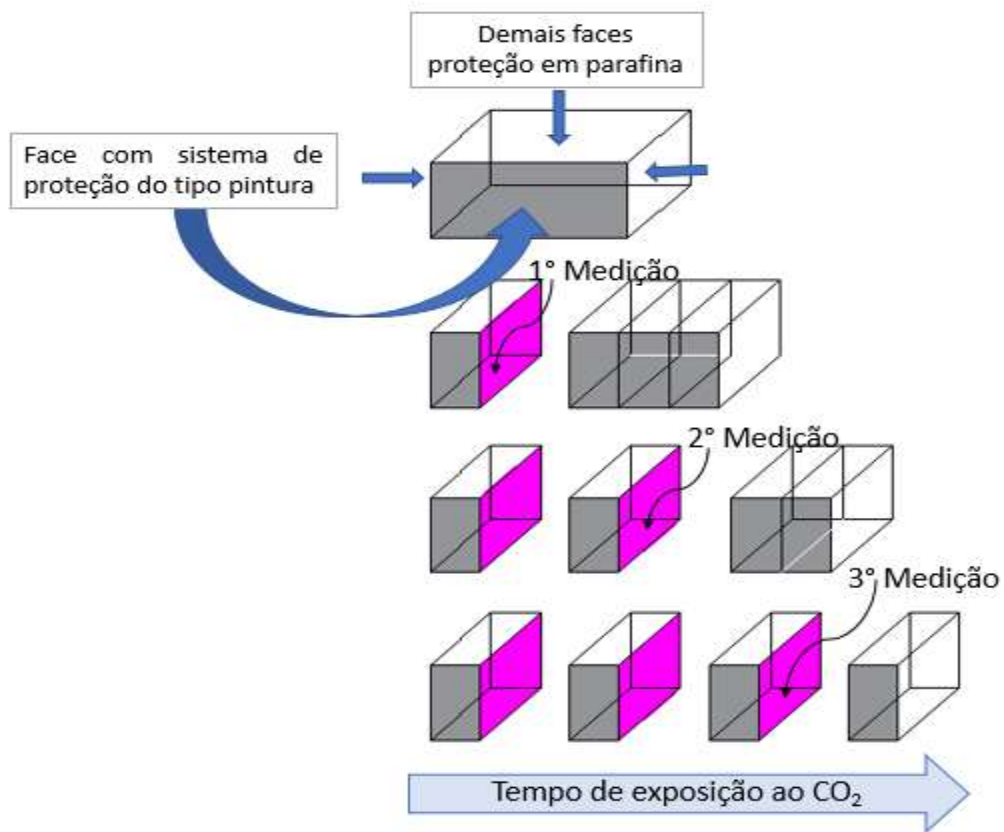
3.4.4 Análise de carbonatação

3.4.4.1 Medição da profundidade carbonatada

Para medição da profundidade carbonatada ao longo do tempo se fez necessário fraturar os CP nas datas previstas (Tabela 8). Os CP prismáticos foram fraturados com auxílio de morsa e chaves de fenda posicionados em cada lado, de maneira a direcionar a propagação da fissura, rompendo-o por compressão (Figura 22a). Em uma das faces resultantes da fratura fez-se a aspersão com uma solução de fenolftaleína diluída a 1% e executou-se a leitura da profundidade carbonatada com auxílio de paquímetro digital (Figura 22b). Na face recém fraturada da amostra aplicou-se parafina, com o intuito de impedir o ingresso de CO₂ para o interior da amostra, a qual foi exposta novamente a ação do CO₂ para leituras em idades futuras (Figura 21). Devido à dificuldade de se extrair material das placas sem que houvesse a sua completa destruição, a leitura da profundidade carbonatada ocorreu aos 28, 101 e 164 dias, uma data a menos quando comparadas as CP prismáticos.

¹⁵ Essa distância entre as datas se deu pelo fato de em função da pandemia do novo Coronavírus os CP que foram produzidos nas dependências da UTF-PR na cidade de Medianeira precisavam ser transportados para a carbonatação acelerada no laboratório LADEMA da UNILA, as cujo período foi afetado pelos Lockdown decretados pelo governo do Estado.

Figura 21 – Sistema para leitura da carbonatação no tempo dos CP prismáticos



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 22 – a) Processo de fratura de CP b) Medição da profundidade carbonatada após aspensão de fenolftaleína

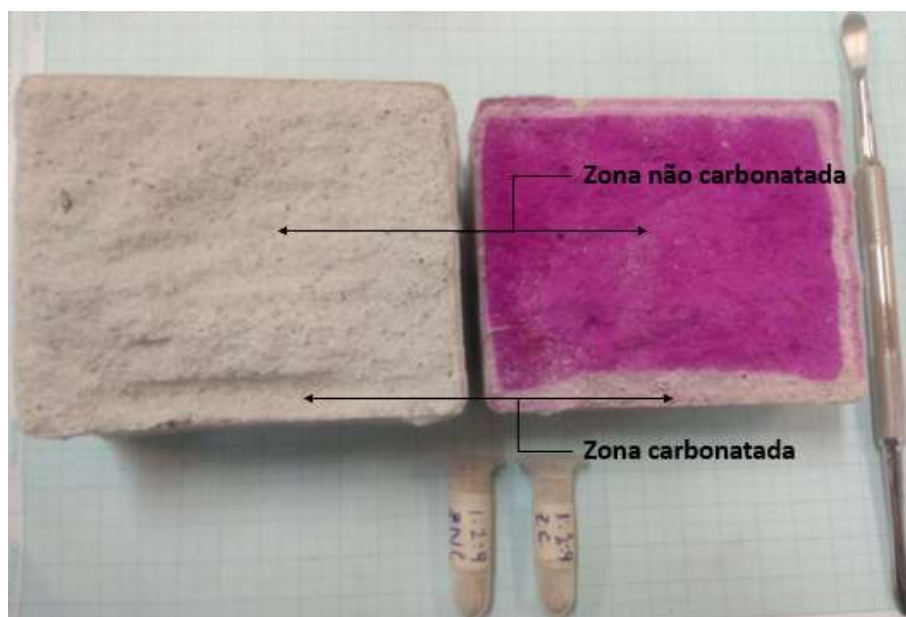


Fonte: Autoria própria (2021)

3.4.4.2 Análise térmica

Para avaliação da carbonatação por meio de análise termogravimétrica umas alíquotas de 50 gramas aproximadamente foram extraídas dos CP e placa, para ambos os traços, sendo retiradas amostras das áreas carbonatada e não carbonatada (Figura 23), retirados da face onde o indicador de pH não foi aplicado. Os ependorfs nomeados ficaram armazenados em laboratório até o momento em que foram ensaiados. As análises termogravimétricas (TG) foram realizadas no Laboratório de Ensaio de Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus de Medianeira, em equipamento de análise térmica conforme descrito no item 3.2.1.

Figura 23 – Retirada de alíquota para análise térmica das zonas carbonatada e não carbonatada



Fonte: Autoria própria (2021)

3.5 Emissões e captura de CO₂

As estimativas de emissões de CO₂ das argamassas foram realizadas com base na estimativa de emissão de cada material componente das argamassas mistas produzidas (cal, areia, cimento), conforme se descreve na sequência.

3.5.1 Estimativa das emissões

a. Emissão do cimento

As emissões atribuídas ao cimento são advindas de seu processo produtivo, essencialmente da etapa de descarbonatação do calcário nos fornos rotativos a altas temperaturas, e da queima de combustíveis fósseis, além do uso de energia elétrica nas fábricas (ROADMAP, 2019). As emissões do cimento puderam ser obtidas através da *Equação 7* abaixo.

$$E_{cim} = E_{clínquer} \times \%C_{cim} + E_{energ.} \times FE \quad \text{(Equação 7)}$$

Onde:

E_{cim} = Emissão para a produção do cimento, em kgCO₂/t;

$E_{clínquer}$ = Emissão do clínquer (descarbonatação e queima de combustíveis fósseis), em kgCO₂/t;

$\% C_{cim}$ = Porcentagem de clínquer presente no cimento, descontando a gipsita;

$E_{energ.}$ = Emissão por energia elétrica em kWh/t;

FE = Fator de emissão da energia elétrica kgCO₂/kWh.

Os fatores de emissão de CO₂ por calcinação, queima de combustíveis, além dos fatores de emissão de consumo pela energia utilizada para produção de cimento podem ser vistos na Tabela 13.

Variável	Descrição	Emissão	Fonte
Clínquer	Emissões por calcinação e queima de combustíveis (Kg CO ₂ /t clínquer)	832	GNR Project, (2019)
	Porcentagem de clínquer no CP II -Z 32 (%)	71 a 94	ABNT NBR16697 (2018)
Energia elétrica	Consumo na planta (kWh/t)	109	GNR Project, (2019)
	Fator de Emissão (Kg CO ₂ /kWh)	0,08	(MCTIC, 2016)

Fonte: Autoria própria (2021)

b. Emissões da Cal

Para determinar a parcela das emissões advindas da produção de cal virgem tomou-se como base os valores obtidos por Jhon et al., (2014) em seu relatório sobre produção da cal. Foram consideradas para tanto emissões referente a etapa de descarbonatação de 464 e 868 kg/CO₂/t (mínima e máxima, respectivamente) e para queima de combustível nos fornos de 188 e 1.475kgCO₂/t (mínimas e máximas emissões, respectivamente) não se considerou a emissão advinda de transporte, energia e outros processos pois segundo os autores são pequenas quando comparadas a emissão da etapa de descarbonatação.

c. Emissões da Areia

Para as emissões da areia adotou-se valor apresentado por Tavares e Bragança (2016), em seu trabalho sobre índices de CO₂ para materiais de construção em edificações brasileiras, cujo valor de emissão foi considerado 30 kgCO₂/t de areia produzida.

d. Emissões das argamassas produzidas.

As emissões associadas à produção das argamassas são definidas pelo somatório do produto da emissão dos componentes pelo consumo dos materiais na mistura para cada m³ produzido, portanto, a emissão atribuída a cada traço pode ser determinada pela *Equação 8*. Como os valores de emissão de CO₂ atribuídos a produção do cimento e da cal podem variar em função do tipo de cimento (teor de clínquer presente) e processo de produção da cal, considerou-se para análise da emissão de cada traço de argamassa produzido as emissões máximas e mínimas atribuídas a cada processo.

$$E_{arg} = E_{cim} \times Q_{cim} + E_{areia} \times Q_{areia} + E_{cal} \times Q_{cal} + E_{\acute{a}gua} + E_{produ\c{c}ao} \quad (\text{Equa\c{c}\~{o} 8})$$

Onde:

E_{cim} = Emissão do cimento (kgCO₂/tproduzida);

Q_{cim} = Consumo de cimento (kg) por m³ de argamassa;

E_{areia} = Emissão da areia (kgCO₂/tproduzida);

Q_{areia} = Consumo de areia (kg) por m³ de argamassa;

E_{cal} = Emissão da cal (kgCO₂/tproduzida);

Q_{cal} = Consumo de cal (kg) por m³ de argamassa produzida;

$E_{\acute{a}gua}$ = Energia da água não considerada por falta de dados robustos;

Já as estimativas de captura foram realizadas por meio da análise da profundidade carbonatada método BRE e por meio de análise térmica (TG/dTG).

3.5.2 Estimativa das capturas

3.5.2.1 Pela profundidade de carbonatação

A estimativa da captura por meio da análise da profundidade carbonatada se dará por meio da equação apresentada na normativa, BRE EM 15804 (2014) e empregada de maneira adaptada por Mazzurana (2019) e Silva (2019) a qual pode ser vista na *Equação 9*, os dados que alimentam a presente equação podem ser visto na Tabela 14.

$$\begin{aligned} Cap_{CO_2} = e_c \times A \times [& (M1 \times CaO_{cim} \times Q_{cim} \times \%C_{cim} \times \%CaO_{cim}) \\ & + (M1 \times CaO_{cal} \times Q_{cal} \times \%CaO_{cal}) \\ & + (M2 \times MgO_{cal} \times Q_{cal} \times \%MgO_{cal})] \end{aligned} \quad \text{(Equação 9)}$$

Onde;

e_c = Profundidade carbonatada, obtida por dados experimentais, em m;

Q_{cim} = Consumo de cimento para produzir 1m³, em kg;

Q_{cal} = Consumo de cal para produzir 1m³ de argamassa, em kg;

CaO_{cim} = Quantidade de CaO contido no cimento, em %;

CaO_{cal} = Quantidade de CaO contida na cal, em %;

$\%CaO_{cim}$ = Porcentagem de CaO totalmente carbonatada para o teor de CaO do cimento, em %;

$\%CaO_{cal}$ = Porcentagem de CaO totalmente carbonatada para o teor de CaO da cal, em %;

$\%C_{cim}$ = Porcentagem de clínquer contida no cimento;

MgO_{cal} = Quantidade de MgO contida da cal, em %;

$\%MgO_{cal}$ = Proporção do MgO totalmente carbonatada para o teor de MgO do cimento, em %;

$M1$ = Fração molar química referente $\frac{CO_2}{CaO}$ por estequiometria;

$M2$ = Fração molar química referente $\frac{CO_2}{MgO}$ por estequiometria química;

A = Area superficial exposta, em m².

Tabela 14 – Dados para determinação da captura por meio de equação BRE EM 15804 adaptada

10	Valores considerados	Origem dos dados
ec	Apêndice C	Autoria própria, (2021)
CaOcim	52,04%	Autoria própria, (2021)
Qcim, Qcal, Qareia	Tabela 11	Autoria própria, (2021)
%Ccim	67,5 ¹⁶ - 90,5%	NBR 16.697 (ABNT, 2018)
%CaOcim	80%	Xi et al, (2016)
CaOcal	40,17%	Autoria própria, (2021)
%CaOcal	60%	STANMORE e GILOT (2005)
MgO	60%	-
A	40m ²	Calculado
M2 (MgO)	1,1	$\frac{CO_2}{CaCO_3}$
M1 (CaO)	0,79	$\frac{CO_2}{MgCO_3}$

Fonte: Autoria própria (2021)

3.5.2.2 Pelo método da TG e DTG

Para a determinação da captura de CO₂ por termogravimetria faz-se necessário conhecer as massas perdidas devido à decomposição dos carbonatos de cálcio e de magnésio, que acontecem em faixas de temperaturas específicas. As curvas de TG e dTG podem ser geradas por meio de softwares específicos (Origin, no caso do presente trabalho). Para a obtenção das massas basta cruzar as inflexões da dTG (associados a cada evento térmico) com a curva de TG anotando seus valores. A massa de cada pico pode ser obtida por meio da *Equação 10* abaixo.

$$Massa\ perdida\ (\%) = m_1 - m_2 \quad \text{(Equação 10)}$$

¹⁶ Descontados 3,5% referente a adição de gesso.

Onde,

m_1 = Massa, em porcentagem, referente ao final do pico;

m_2 = Massa, em porcentagem, referente ao inicial do pico;

De acordo com Scrivener et al., (2016) os hidróxidos de magnésio e de cálcio se decompõe, em CaO e H_2O , MgO e H_2O a faixas de temperatura de 420° e 460°C, respectivamente. A faixas de temperatura de 500 a 600°C ocorre a descarbonatação do carbonato de magnésio, o carbonato de cálcio se decompõe em CaO e CO_2 em temperaturas acima de 600°C. A quantidade de cada material presente na amostra (carbonatos de magnésio e cálcio) pode ser calculada por meio das equações 11 e 12 abaixo.

$$\% \frac{m}{m} CaCO_3 = \frac{(PM_C - PM_{NC})}{M_1} \quad \text{(Equação 11)}$$

Onde;

$\%CaCO_3$ = Quantidade de carbonato de cálcio presente na amostra;

PM_C = Perda de massa referente ao carbonato de cálcio da zona carbonatada (%);

PM_{NC} = Perda de massa referente ao carbonato de cálcio na zona não carbonatada (%)

M_1 = Fração molar química do $CaCO_3$

$$\%MgCO_3 = PM_C \times M_2 \quad \text{(Equação 12)}$$

Onde;

PM_C = Perda de massa referente ao carbonato de magnésio presente da amostra carbonatada (%);

M_2 = Fração molar química do Magnésio

Uma vez determinada a quantidade de $CaCO_3$ e $MgCO_3$ presentes na amostra por meio do método das tangentes descrito por Scrivener, et al., (2016), é possível determinar a quantidade de CO_2 capturado a partir da relação entre

as massas molares dos compostos acima e do CO₂, conforme as equações (Equação 13 e Equação 14).

$$\%CapCO_2 = (\%CaCO_3 \times M_1) + (\%MgCO_3 \times M_2) \quad \text{(Equação 13)}$$

Onde;

$\%CapCO_2$ = Porcentagem de captura de CO₂;

$\%CaCO_3$ = Porcentagem de CaCO₃ presente;

$\%MgCO_3$ = Porcentagem de MgCO₃ presente;

M_1 e M_2 = Fração molar química do carbonato de cálcio e do carbonato de magnésio, respectivamente

$$CapCO_2 = d1 \frac{\%CaCO_3 + \%MgCO_3}{m1 \times 0,1} \quad \text{(Equação 14)}$$

Onde;

$CapCO_2$ = Quantidade de CO₂ capturado (kgCO₂/m³);

$\%CaCO_3$ = Porcentagem de CaCO₃ presente;

$\%MgCO_3$ = Porcentagem de MgCO₃ presente;

$d1$ = Massa específica (kg/m³);

m_1 = massa inicial da amostra, em mg.

3.5.3 Balanço das emissões

O balanço das emissões pode ser realizado por meio da subtração simples do que foi produzido pelo que foi capturado pelos diferentes sistemas armazenados produzidos (Equação 15).

$$BCO_2 = Earg - CapCO_2 \quad \text{(Equação 15)}$$

Onde:

BCO_2 = balanço das emissões de CO₂, em kgCO₂/m³;

$Earg$ = Emissão de CO₂ da argamassa, em kgCO₂/m³;

$CapCO_2$ = Captura de CO₂ ao longo do CV, em kgCO₂/m³.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo apresentam-se os resultados obtidos por meio dos ensaios de caracterização dos materiais e argamassas produzidos. Apresenta-se também os dados obtidos para os ensaios de carbonatação, bem como a análise das emissões, captura e balanço dos cenários pensados, buscando responder à pergunta principal que rege o trabalho, se os diferentes tratamentos têm efeito ou não na difusão de CO₂ matriz adentro.

4.1 Caracterização

O cimento CII Z-32 utilizado na produção das argamassas possui massa específica de 2,93 g/cm³, já a cal possui massa específica de 2,37 g/cm³, valor próximo ao encontrado por Silva, (2019) de 2,44 g/cm³ também para a mesma tipologia de cal. O resultado de massa específica e massa unitária do agregado encontram-se dispostos na Tabela 15.

Tabela 15 – Resultado das massas específicas e unitária

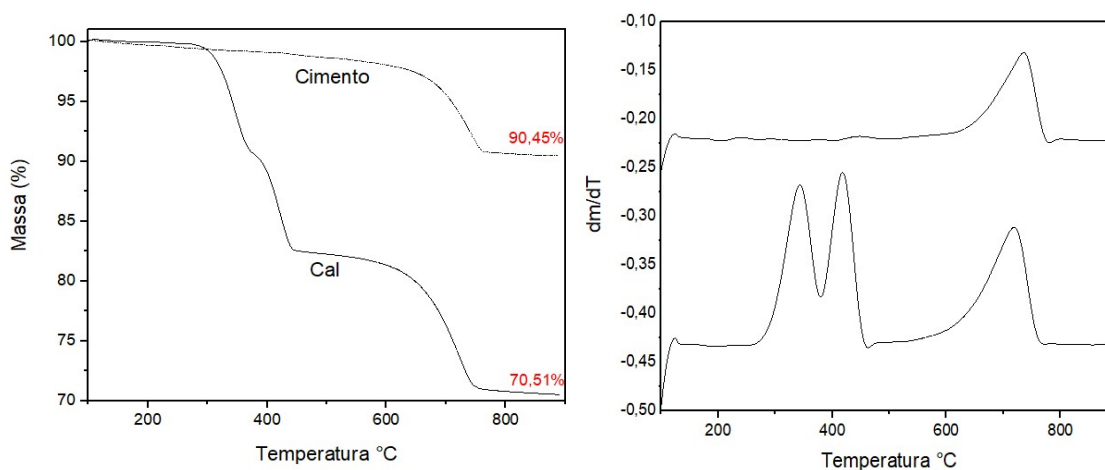
Massa [g/cm ³]	MATERIAIS		
	Cimento CP II Z - 32	Cal CH III	Areia
Massa específica	2,93	2,37	2,67
Massa unitária	-	-	1,43

Fonte: Autoria própria (2021)

O cimento e a cal foram ensaiados ainda quanto a análise térmica, as curvas termogravimétricas (TG) e curvas derivadas (dTG) dos materiais encontram-se na Figura 24. Da análise do cimento, observa-se um valor residual de 90,45% com relação a amostra inicial, apresentando perdas de massa a temperatura de 580 a 800°C de aproximadamente 7,56%, correspondente a descarbonatação do carbonato. Para a cal, evidenciou-se um valor residual de 70,51% com relação a massa inicial. A perda de massa ocorreu em três etapas distintas, a primeira a temperaturas próximas a 230° que se refere a desidratação do hidróxido de magnésio, com uma perda de aproximadamente 9,18% da

massa, a segunda perda ocorreu a temperaturas próximas de 425°C e refere-se a decomposição do hidróxido de cálcio, com uma perda de 8,41% da massa (MAZURANA, 2019), a terceira etapa de decomposição ocorreu próximo a temperaturas de 725°C referindo-se a decomposição do carbonato de cálcio e de magnésio (RODRIGUES; JUNIOR, 2018).

Figura 24 – TG e DTG dos materiais carbonatáveis, cimento e cal



Fonte: Autoria própria (2021)

O FRX do cimento e da cal apresentado na Tabela 16, mostra que tanto para o cimento quanto para a cal o elemento em maior quantidade é o CaO, no cimento este óxido está presente em 52,04% do material e em 40,17% para cal. A cal ainda é composta 27,54% por óxido de magnésio, o que a caracteriza como uma cal magnesiana.

Tabela 16 – Tabela de FRX do cimento e da cal

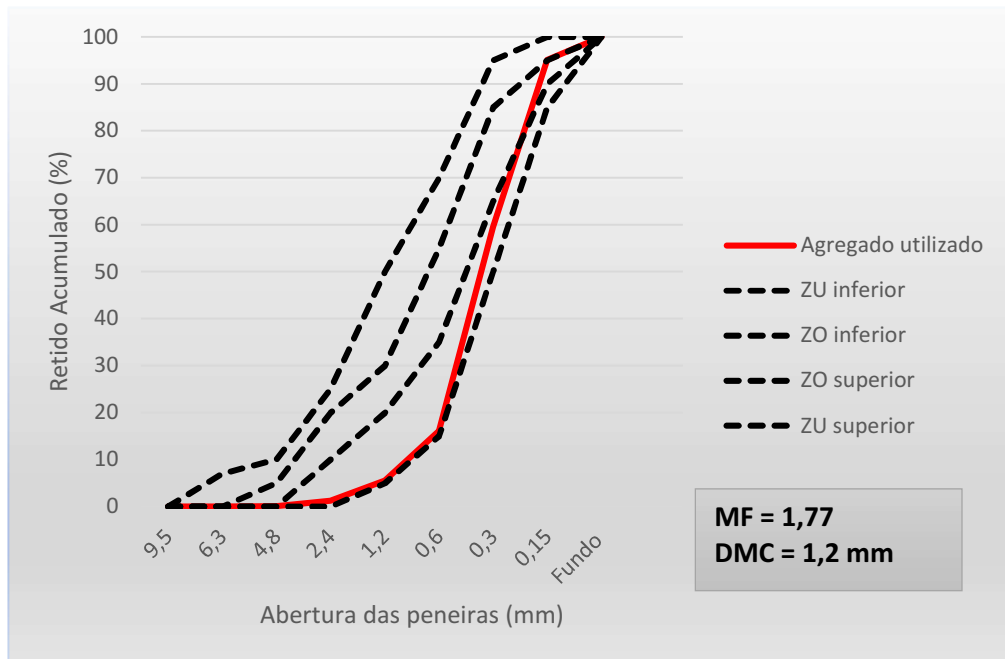
Óxidos (%)	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MaO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	S ₀₃	LOI	Soma (%)
CH III	3,81	<LQ	0,12	0,18	<LQ	27,54	40,17	<LQ	<LQ	<LQ	0,12	28,69	100,63
CPII-Z	22,61	0,26	5,71	2,69	<LQ	5,75	52,04	0,18	1,23	0,13	1,27	7,42	99,29

Fonte: Autoria própria (2021)

Da curva granulométrica da areia utilizada (Figura 25) nota-se que ela se encontra fora da faixa ótima de utilização (considerando o limite para concreto), entretanto encontra-se dentro da faixa considerada utilizável inferior. O agregado utilizado possui como módulo de finura o valor de 1,77 sendo considerada uma areia fina segundo versão anterior da norma NBR 7211:2009. Porém para

produção de argamassas areias finas conferem um melhor acabamento superficial.

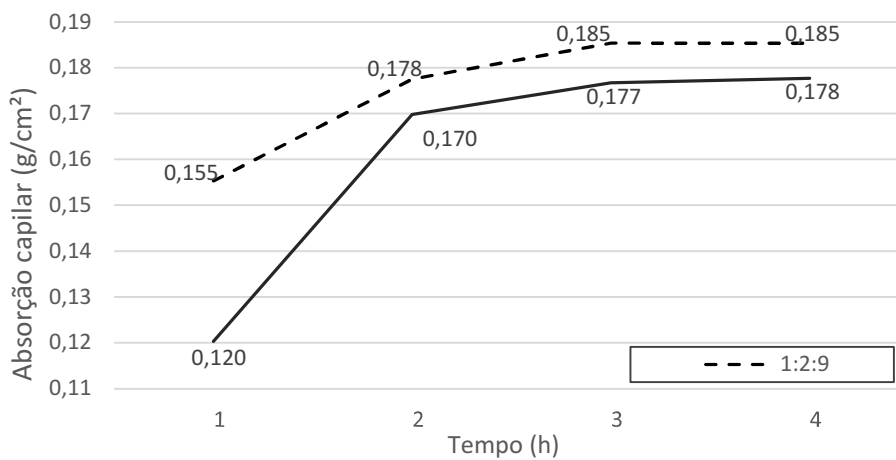
Figura 25 – Curva granulométrica da areia



Fonte: Autoria própria (2021)

No ensaio absorção de água por capilaridade (Figura 26) as argamassas atingiram a máxima altura conseguida por capilaridade (altura do CP), as quais após 72h apresentaram aproximadamente a mesma taxa de absorção de aproximadamente 0,18g/cm².

Figura 26 – Resultado de absorção de água por capilaridade em g/cm²



Fonte: Autoria própria (2021)

Na Tabela 17 encontram-se os dados de resistência à tração e à compressão das argamassas aos 28 dias. As argamassas de traço 1:1:6 apresentaram maiores resistências que as argamassas de traço 1:2:9 (a primeira é quase três vezes a resistência da segunda), este resultado se justifica pela menor quantidade de cimento presente nas argamassas de traço 1:2:9. De acordo com a norma brasileira NBR 13281 (2005b), ambas argamassas são caracterizadas como argamassas do tipo P1, ou seja, com resistência à compressão menores que 2,0 MPa e resistência à tração na flexão menor ou igual a 1,5MPa. Silva (2019) em seu trabalho comparando as capturas de CO₂ em argamassa de assentamento com e sem aditivo incorporador de ar, encontrou valores aproximados para resistência à compressão e tração nas argamassas de traço 1:1:6 (sem aditivo e sem emprego de RCD), de 1,60MPa e 0,63MPa, respectivamente.

Tabela 17 – Resultados de resistência à compressão, tração na flexão, em MPa

Traço 1:2:9	Compressão axial	0,63	Desvio padrão	0,13
	Tração na flexão	0,23		0,00
Traço 1:1:6	Compressão axial	1,78		0,33
	Tração na flexão	0,66		0,10

Fonte: Autoria própria (2021)

4.2 Profundidade carbonatada

4.2.1 Efeito do sistema de proteção na profundidade carbonatada

O objetivo principal do presente trabalho constituiu-se da análise do efeito, do tipo de proteção na difusão de CO₂ na matriz cimentícia, e conseqüentemente a captura de CO₂ pelo processo de carbonatação. Os dados de profundidade carbonatada no decorrer dos dias para os sistemas de proteção produzidos estão apresentados na seqüência. Com o intuito de facilitar a leitura dos gráficos e tabelas, na Tabela 18 apresenta-se de maneira simplificada as nomenclaturas adotadas para os sistemas utilizados.

Tabela 18 – Nomenclatura adotada para apresentação das argamassas

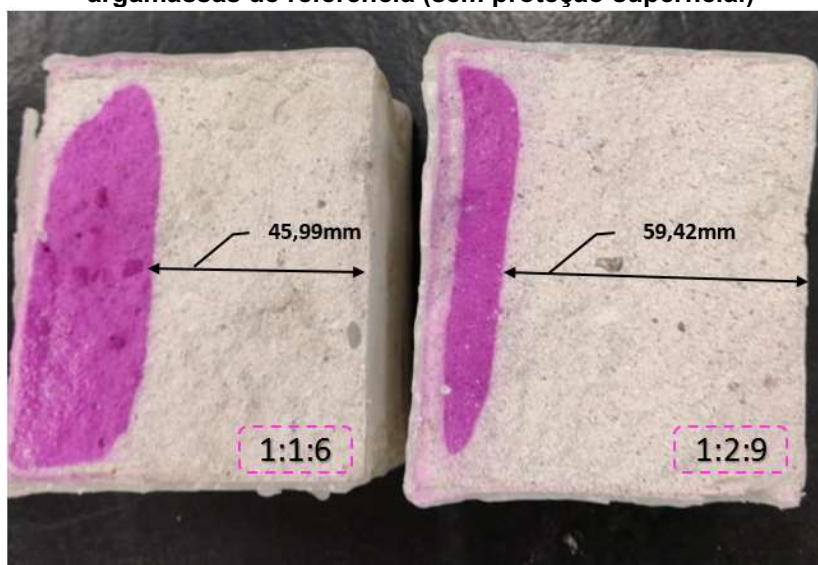
	Base	Qualidade	Acabamento	Cor
REF	Argamassa de referência s/ pintura			
PPF	PVA	Premium	Fosco	Branca
APF	Acrílica	Premium	Fosco	Branca
ASF	Acrílica	Standard	Fosco	Branca
AEF	Acrílica	Econômica	Fosco	Branca
APS	Acrílica	Premium	Semibrilho	Branca
ASS	Acrílica	Standard	Semibrilho	Branca
APF_C	Acrílica	Premium	Fosco	Cinza
APS_C	Acrílica	Premium	Semibrilho	Cinza

Fonte: Autoria própria (2021)

As Figura 28 e Figura 29 apresentam a evolução da profundidade carbonatada nas amostras prismáticas ao longo dos dias (mesclando exposição natural e em ambiente acelerado) para os diferentes traços e tratamentos. Pode-se observar que houve um aumento na profundidade carbonatada no decorrer do tempo de exposição ao CO₂. Observa também que a evolução na profundidade foi reduzida quando se compara argamassas de referência (sem pintura) com as demais argamassas protegidas, independente do traço e sistema de proteção.

As argamassas de traço 1:1:6 apresentaram menor profundidade de carbonatação quando comparadas a argamassas de traço 1:2:9 (Figura 27). Esse fato pode ser explicado se analisado a composição das mesmas, já que a segunda apresenta menor quantidade de cimento sendo, portanto, um traço mais fraco, de maior porosidade, apesar de apresentarem uma maior quantidade de materiais carbonatáveis do que argamassas 1:1:6. As argamassas de traço 1:1:6 deste estudo apresentaram resistência à compressão aos 28 dias 2,83 vezes a resistência das argamassas de traço 1:2:9, sendo a porosidade preponderante à quantidade de materiais carbonatáveis no que diz respeito a profundidade, e consequentemente a velocidade de carbonatação dessas argamassas.

Figura 27 – Profundidade carbonatada aos 164 dias de exposição natural ao CO₂ em argamassas de referência (sem proteção superficial)

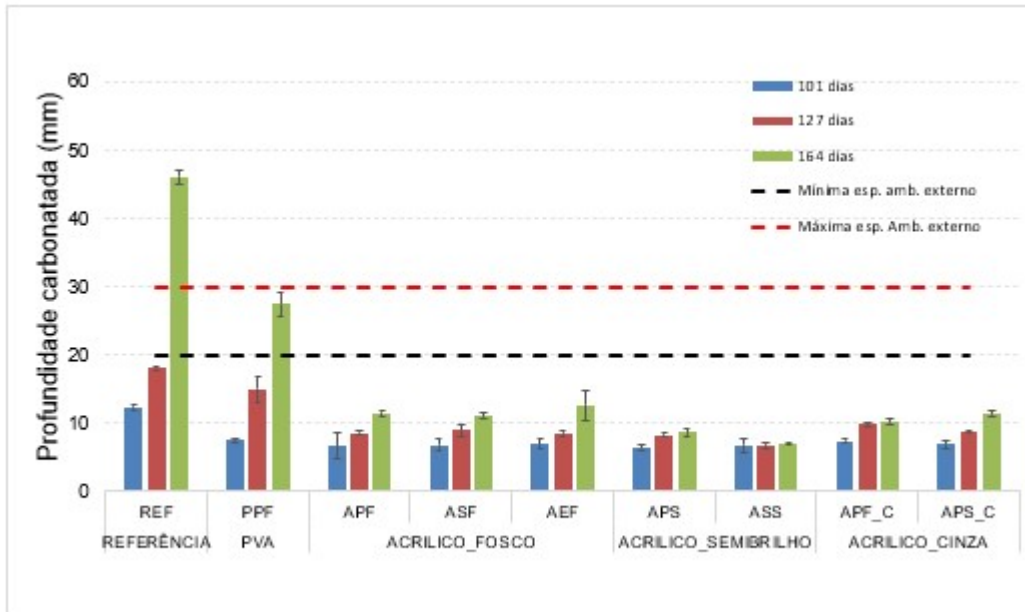


Fonte: Autoria própria (2021)

Entre as amostras com proteção do tipo pintura, o sistema de base PVA foi o que apresentou menor barreira a penetração de CO₂, com maior profundidade carbonatada para ambos os traços, seguido pelo sistema com tinta acrílica econômica de acabamento fosco (AEF). Para os demais sistemas não houve uma simetria em relação aos dados de profundidade em função dos sistemas de proteção para os dois traços. Os sistemas para traço 1:1:6 em ordem de proteção (da menor para a maior) apresentaram a seguinte sequência: sistemas APF, APSC, ASF, APFC, APS e ASS. Já para o traço 1:2:9 a sequência foi: ASF, APF, APSC, APFC, ASS e APS. Pode-se com base nos dados de profundidade afirmar que as argamassas acrílicas de acabamento semibrilho (Standard ou Premium) de cor branca conferem maior proteção ao substrato.

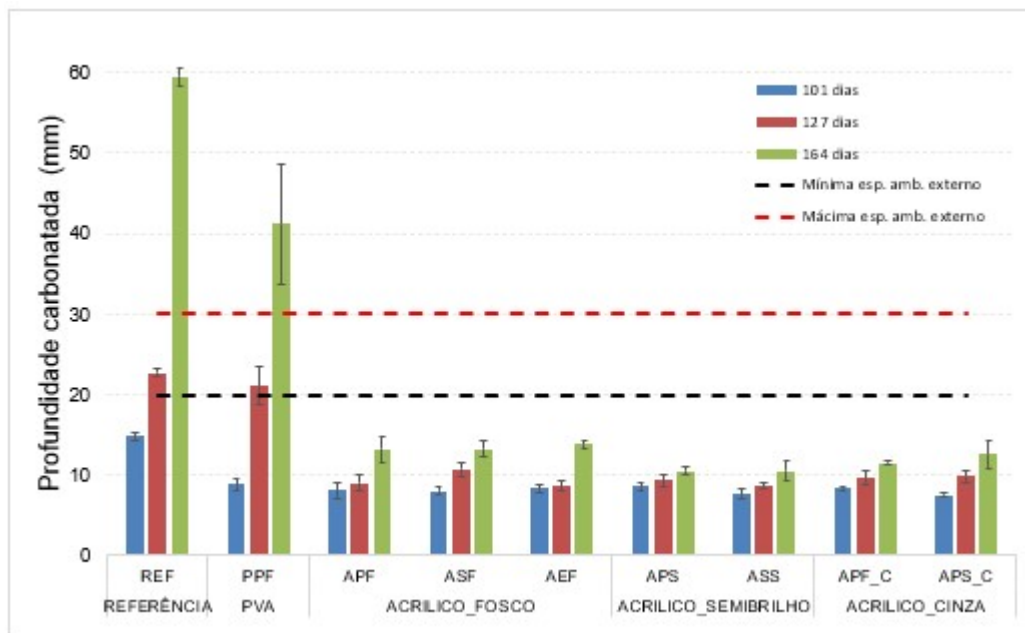
De acordo com Loh, (2017) quanto maior o PVC de uma tinta menor a eficiência da película por ela formada, ou seja, menor a barreira contra o ingresso de agentes agressivos, no caso o CO₂. O PVC de uma tinta é função do volume do pigmento no volume total do filme. Dentre as tintas imobiliárias destinadas à construção civil, as tintas foscas possuem valor de PVC de 35 a 45, e as tintas semibrilho apresentam PVC de 15 a 30, o que justificaria um melhor desempenho das tintas semibrilho em comparação às tintas foscas no que diz respeito a difusão de CO₂ e profundidade de carbonatação nas argamassas.

Figura 28 – Evolução da profundidade de carbonatação no tempo, em mm para argamassa com Traço 1:1:6



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 29 – Evolução da profundidade de carbonatação no tempo, em mm para argamassa com Traço 1:2:9



Fonte: Autoria própria (2021)

Como evidenciado houve diferença nas profundidades carbonatadas, algumas amostras com diferenças numericamente muito pequenas entre si, mas para verificar a existência de diferença significativa entre os diferentes

tratamentos as amostras ensaiadas quanto à carbonatação foram submetidas ao teste estatístico ANOVA¹⁷, com 5% de significância. Para realização do ANOVA descontou-se de todas as argamassas a profundidade de referência (profundidade de referência medida aos 28 dias, respectivo a cada traço) com o objetivo de analisar a evolução da profundidade após a pintura.

O teste apresentou $P_{valor} < 0,05$, para ambos os traços, evidenciando haver diferença entre os tratamentos, entretanto, o teste nada disse a respeito de quais tratamentos seriam diferentes entre si, havendo necessidade da aplicação de um teste de comparação das médias. Para tanto, aplicou-se o Teste de Tukey cujo resultado pode ser visto nas Tabela 19 e Tabela 20. Na apresentação dos resultados do teste de Tukey médias que são iguais estatisticamente (de acordo com o grau de significância) são apresentadas com a mesma letra (letra a por exemplo, todas as médias com esta letra são estatisticamente iguais), já médias que são estatisticamente diferentes, ou seja, possuem diferença significativa aparecem com letras diferentes.

Tabela 19 – Teste de Tukey de comparação de médias - TRAÇO 1:1:6

TRATAMENTO	MÉDIA	CLASSIFICAÇÃO
REF	39,66	a
PPF	21,09	b
AEF	6,35	c
APF	5,15	c
APS_C	5,01	c
ASF	4,77	c
APF_C	3,86	cd
APS	1,83	d
ASS	0,67	d

Fonte Autoria própria (2021)

¹⁷ A ANOVA, é um teste estatístico que visa comparar a média de população amostral e assim identificar se as médias diferem significativamente entre si, a diferença dos demais testes de hipóteses é que por meio da ANOVA se pode comparar mais de uma média e verificar se ao menos uma difere significativamente das demais.

Tabela 20 – Teste de Tukey de comparação de médias - Traço 1:2:9

TRATAMENTO	MÉDIA	CLASSIFICAÇÃO
REF	51,95	a
PPF	33,68	b
AEF	6,40	c
ASF	5,80	c
APF	5,74	c
APS_C	5,19	c
APF_C	4,01	c
APS	3,02	c
ASS	3,06	c

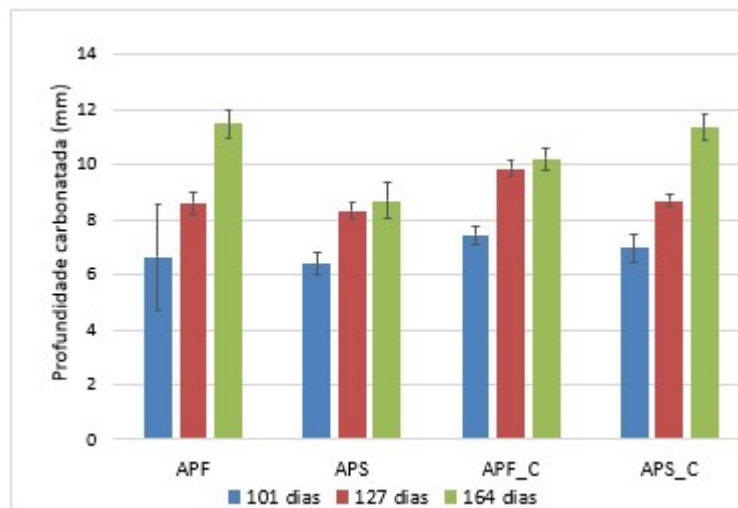
Fonte: Autoria própria (2021)

Do teste de comparação de médias cujo resultado encontra-se tabelado acima, nota-se que quando comparadas com a amostra de referência todas as argamassas com sistemas de proteção apresentaram diferença significativa, ou seja, todas as amostras após pintadas tiveram redução significativa da difusão de CO₂, independente do sistema de proteção e traço da argamassa, o mesmo é válido para as argamassas de base PVA (PPF), que difere significativamente de todos os demais sistemas, inclusive da argamassa de referência.

Quando analisado o traço 1:2:9 observa-se que as tintas acrílicas independentemente do tipo de acabamento, qualidade e cor não apresentaram diferença significativa nos tratamentos, todas conferiram a mesma proteção. Para o traço 1:1:6 as argamassas acrílicas semibrilho de cor branca (APS e ASS) apresentaram diferença significativa dos demais tratamentos, conferindo maior proteção. A tinta acrílica Premium fosca de cor cinza (APF_C), não possui diferença significativa das tintas acrílicas ASS e APS, mas também não possui diferença significativa das demais argamassas (AEF, APF, ASF, APSC) que apresentaram o mesmo grau de proteção entre si. Pedry (2020), em seu trabalho comparando quatro sistemas de proteção na difusão de CO₂, (PVA, acrílica semibrilho, acrílica fosca e acrílica acetinada, de mesma coloração) também evidenciou haver diferença entre os sistemas de base acrílica e PVA, entretanto não evidenciou diferença no tratamento quando comparadas às tintas acrílicas de diferentes acabamentos. Pode-se dizer, portanto, com base nos dados coletados e observações que as tintas conferem proteção ao substrato, e que as tintas acrílicas no quesito proteção são superiores às tintas de base PVA,

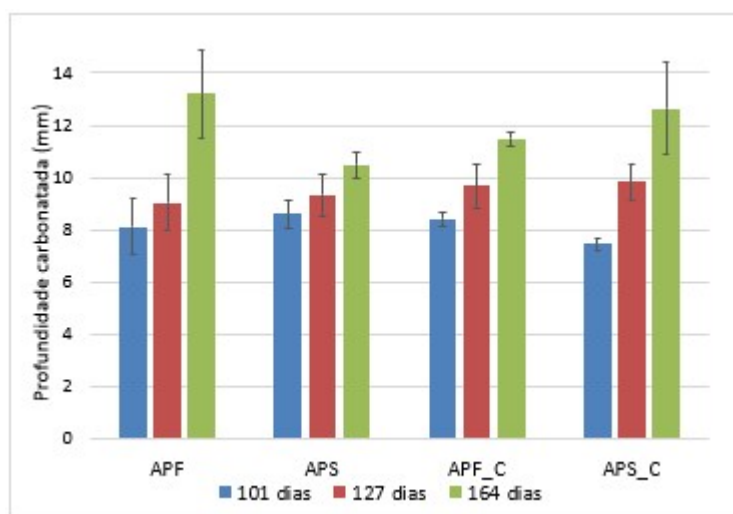
dificultando o ingresso de CO₂ matriz adentro e, conseqüentemente, a captura pela reação de carbonatação.

Figura 30 – Comparação entre tintas acrílicas em função da cor, traço 1:1:6



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 31 – Comparação entre tintas acrílicas em função da cor, traço 1:2:9



Fonte: Autoria própria (2021)

Para análise da influência da cor utilizou-se argamassas com sistema de pintura acrílica de qualidade Premium, acabamentos foscos e semibrilho (Figura 30 e Figura 31). A escolha das cores foi feita de maneira aleatória sendo comparadas a cores branca e cinza. Das argamassas observa-se que para o traço 1:2:9 não houve diferença nos tratamentos com relação a difusão de CO₂, todas conferiram a mesma proteção. Para o traço 1:1:6 as tintas de acabamento

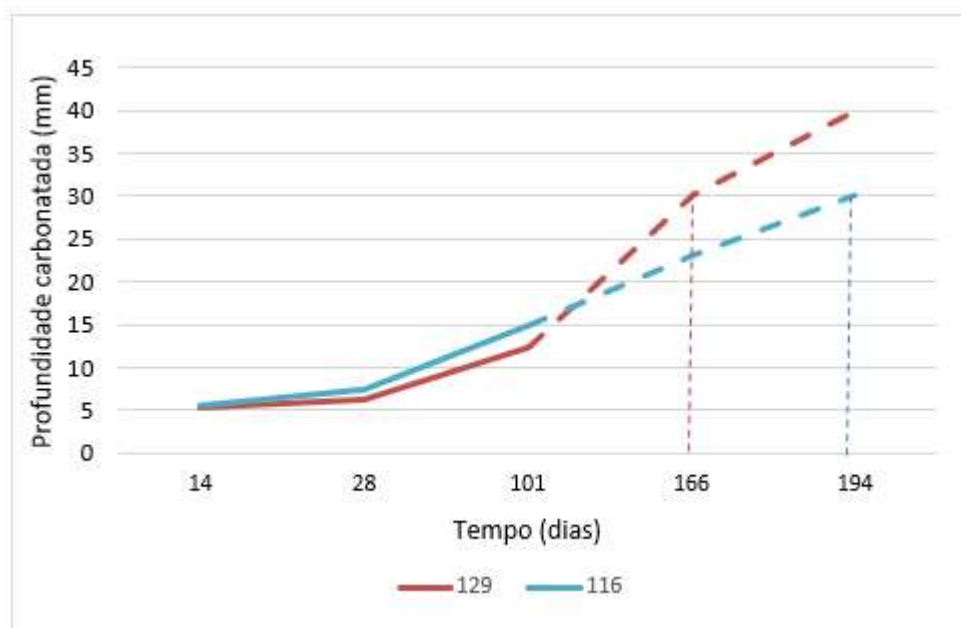
fosco apresentaram mesma proteção, já para o acabamento semibrilho a tinta de cor branca apresentou maior proteção do que os demais sistemas.

4.2.2 Avaliação da profundidade de carbonatação natural

A norma brasileira 13749 ABNT (ABNT, 2013b) apresenta os valores mínimos e máximos recomendados para espessura de revestimento em argamassas, sendo para argamassa externa valores de 20 e 30mm, respectivamente, e para argamassas internas espessuras de 5 e 20mm. As argamassas produzidas foram ensaiadas em datas distintas, na primeira idade – 28 dias, data em que geralmente as argamassas são pintadas –, as mesmas não haviam atingidos 20mm de profundidade (espessura mínima para ambientes internos e máximo para externos), tendo atingido essa marca aos 127 dias. Na última data ensaiada (164 dias), as argamassas já haviam carbonatado 30mm referentes a espessura máxima de revestimentos externos, entretanto para esta data 63 dias de carbonatação se deram em ambiente acelerado.

Se considerada apenas carbonatação natural a espessura máxima do revestimento argamassado imposto por norma seria atingida ao 166 e 194 dias, para as argamassas de traço 1:2:9 e 1:1:6, respectivamente (Figura 32). Considerando um sistema de revestimento argamassado de 30mm seriam, portanto, necessários quase seis meses de exposição natural ao CO₂ para carbonatar totalmente a argamassa sem proteção superficial. O consumo total dos hidróxidos seria interessante no que diz respeito a evitar patologias como por exemplo a eflorescência. Entretanto, o tempo de espera é demasiado grande quando aplicado a obras de pequeno porte (residências unifamiliares) onde há a necessidade de prazos de entrega curtos.

Figura 32 – Profundidade de carbonatação natural ao longo do tempo e projeção para alcance da profundidade alvo de 30 mm



Fonte: Autoria própria (2021)

4.2.3 Efeito do proporcionamento da argamassa na profundidade carbonatada

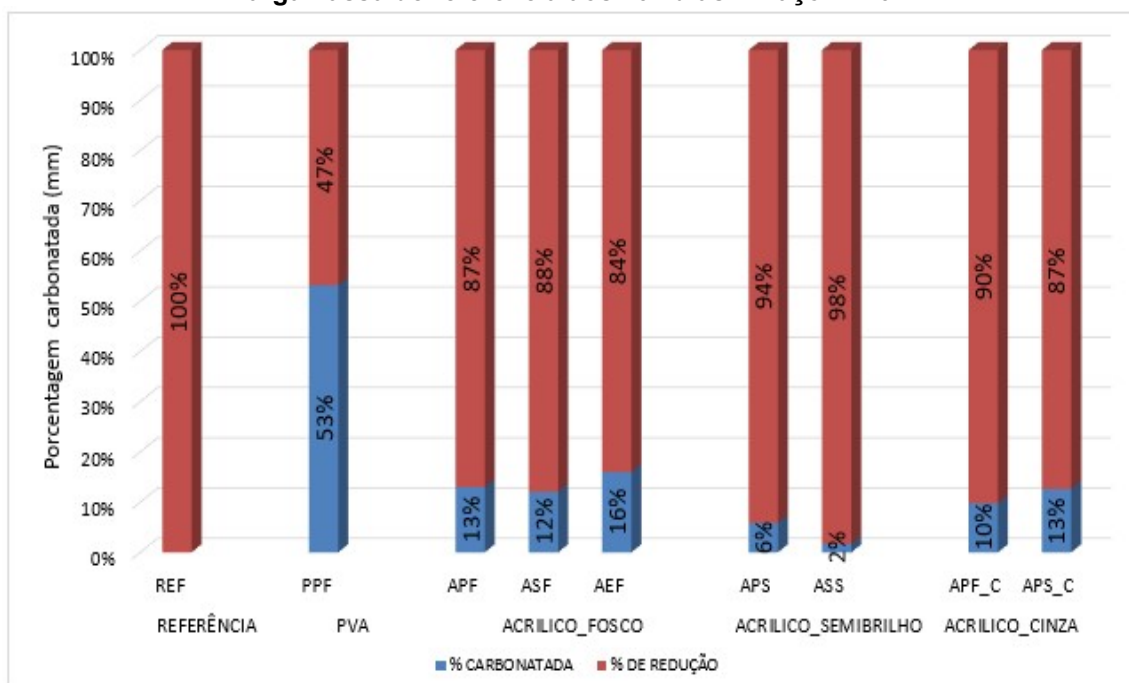
As argamassas apresentaram profundidade de carbonatação diferentes isso pode ser visto nas Figura 28 e Figura 29. Promovendo o desconto referente a profundidade inicial (avaliada aos 28 dias) temos que as argamassas de referência atingiram aos 164 dias, uma profundidade de 39,66mm e de 51,95mm para o traço 1:1:6 e 1:2:9, respectivamente. Ou seja, as argamassas (sem pintura) de traço 1:1:6 carbonataram a uma taxa 1,3 vezes mais lenta que as argamassas 1:2:9.

Nas Figura 33 e Figura 34 os valores de profundidade carbonatada aos 164 dias acima referenciados representam o valor de 100% com a qual os demais sistemas foram comparados. Com base nos dados observa-se que as tintas de base PVA (PPF) apresentaram redução de 35 e 47% na profundidade carbonatada para os traços 1:1:6 e 1:2:9, respectivamente. Para este sistema houve uma diferença de mais de 12mm na profundidade carbonatada de um traço para outro. Os sistemas acrílicos apresentaram pouca variação ou nenhuma na profundidade carbonatada em função do traço, o sistema acrílico

de qualidade econômica, por exemplo não apresentou variação na profundidade carbonatada para os traços, apresentando aproximadamente 6,4mm de profundidade carbonatada após pintura para ambos os traços. O sistema acrílico Standard semibrilho apresentou variação de 2,39mm de um traço para outro. De maneira geral as argamassas de traço 1:2:9 apresentaram maiores profundidades carbonatadas que as argamassas de traço 1:1:6. Dito isso pode-se afirmar que o traço da argamassa, e conseqüentemente sua porosidade têm influência na profundidade de captura, mesmo em sistemas com pintura.

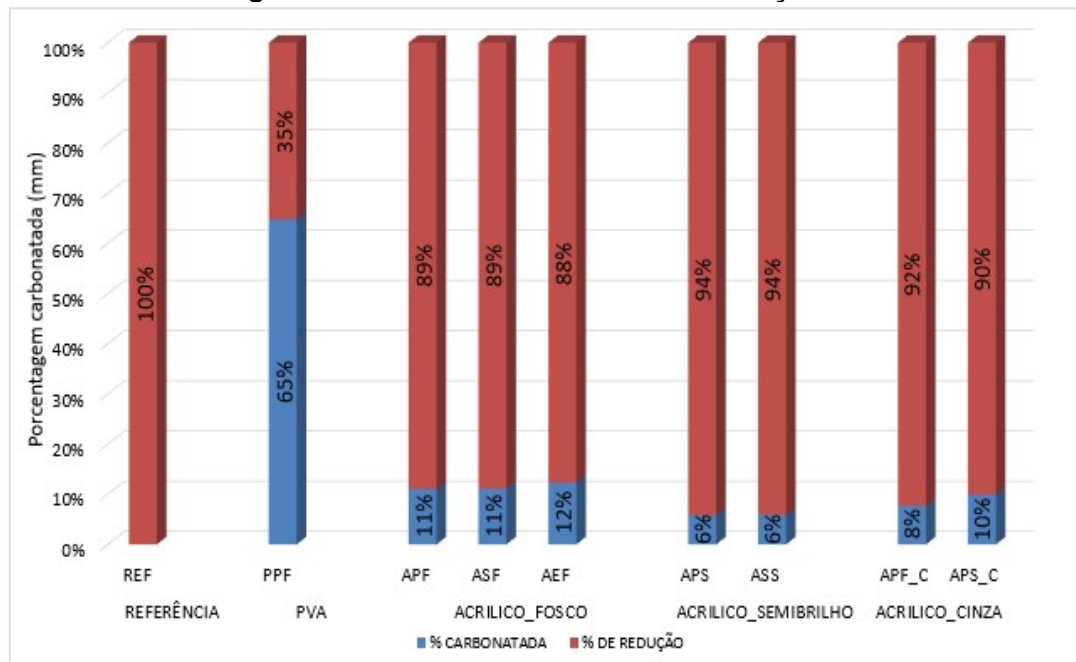
As Silva et al., (2019) analisaram a proteção superficial atribuída a pintura quanto ao ingresso de CO₂ em CP de concreto, aplicando como proteção uma tinta acrílica a base de óleo, constatando aos 84 dias uma redução na profundidade carbonatada de 100%, concluindo que a barreira criada pela pintura é eficaz quanto ao ingresso de CO₂. No presente trabalho ficou evidenciado que as argamassas com pinturas acrílicas de acabamento fosco apresentam redução na profundidade de 84 a 92% na profundidade carbonatada, para as tintas acrílicas de acabamento semibrilho de 94 a 98%.

Figura 33 – Porcentagem de redução na profundidade carbonatada em comparação a argamassa de referência aos 164 dias - Traço 1:1:6



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 34 – Porcentagem de redução da profundidade carbonatada em comparação a argamassa de referência aos 164 dias – Traço 1:2:9

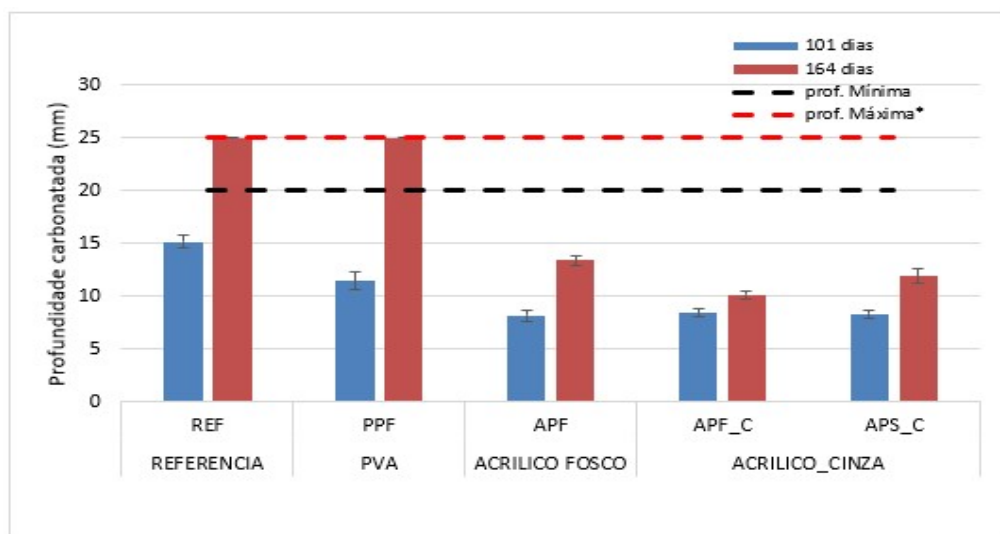


Fonte: Autoria própria (2021)

4.2.4 Efeito da dimensão do corpo de prova na profundidade carbonatada

Com intuito de simular ambientes mais próximos ao real (maior área superficial) que as placas foram produzidas. As placas assim como os CP prismáticos sofreram exposição natural e carbonatação acelerada. Carbonataram naturalmente por 101 dias (28 dias sem proteção superficial).

Figura 35 – Profundidade de carbonatação em placas argamassadas, em mm



* Nota: a espessura máxima de 25 mm é função da espessura da placa

Fonte: Autoria própria (2021)

Para as placas assim como os corpos de prova prismáticos houve diferença significativa entre os diferentes acabamentos quando comparados a argamassa de referência com as demais (Tabela 21). A análise das médias foi realizada com as profundidades obtidas aos 101 dias de carbonatação, devido ao fato de que na medição aos 164 dias as placas de referência e de base PVA terem carbonatado completamente. Se a comparação fosse feita a essa data os resultados não seriam uma representação da realidade pois as argamassas em realidade continuariam carbonatando não fosse a espessura limitada da placa produzida. Do teste de comparação das médias evidenciou-se diferença significativa entre o sistema sem pintura com relação aos demais, assim como diferença da proteção do sistema de base PVA com as demais tintas acrílicas, já para as tintas acrílicas de acabamento semibrilho e fosco não se evidenciou diferença significativa nos tratamentos.

Na Tabela 22 foram comparadas as médias das profundidades carbonatada para os CP prismáticos versus as placas (uma a uma), com objetivo de avaliar se haveria diferença na profundidade carbonatada agora em função da área exposta. Do teste ficou evidenciado que há diferença apenas nas amostras de referência e de base PVA. Para as demais amostras não houve diferença significativa evidenciando mais uma vez uma menor difusão de CO₂ atribuídos a uma melhor proteção dos sistemas acrílicos. As placas de maior área apresentaram maior profundidade carbonatada, sendo a área dos CP quesito a ser considerado quando analisado profundidade de carbonatação e consequentemente captura de CO₂.

Tabela 21 – Teste de comparação de médias Placas – Traço 1:1:6

TRATAMENTO	MÉDIA	CLASSIFICAÇÃO
REF - REFERÊNCIA	15,21	a
PPF - PVA_PREMIUM_FOSCA	11,41	b
APF - ACRILICO_PREMIUM_FOSCO	8,14	c
APS_C - ACRILICO_PREMIUM_SEMIBRILHO_CINZA	8,29	c
APF_C - ACRILICO_PREMIUM_FOSCO_CINZA	6,78	c

Fonte: Autoria própria (2021)

Tabela 22 – Comparação de médias CP prismáticos versus Placas – Traço 1:1:6

TRATAMENTO	MÉDIA	
	CP PRISMÁTICOS	PLACAS
REF - REFERÊNCIA	12,37a	15,21b
PPF - PVA_PREMIUM_FOSCA	7,53a	11,41b
APF - ACRILICO_PREMIUM_FOSCO	6,65a	8,14a
APF_C - ACRILICO_PREMIUM_FOSCO_CINZA	7,43a	8,29a
APS_C - ACRILICO_PREMIUM_SEMIBRILHO_CINZA	6,96a	6,78a

Fonte: Autoria própria (2021)

4.3 Estimativa e captura de CO₂

4.3.1 Profundidade carbonatada – método BRE

Para produção de 1m³ de argamassa foram considerados o quantitativo de materiais apresentados na Tabela 11. Com relação ao substrato pode-se observar que as argamassas com maior quantidade de cal (1:2:9) emitem mais CO₂ ao ambiente, em contrapartida também possuem maior potencialidade de captura (MAZZURANA, 2019). A maior emissão é explicada graças ao método pela qual a cal é produzida, a variabilidade na matéria-prima empregada e falta de padronização/normalização dos processos. Para cada m³ de argamassa produzido deste estudo são emitidos no mínimo 213,48 kgCO₂ para o traço 1:1:6 e 228,27 kgCO₂ para o traço 1:2:9 (Tabela 23), quando considerada as emissões máximas nota-se um aumento de quase 100kg/CO₂ por m³ produzido de um traço com relação ao outro.

Para estimar quanto CO₂ um m³ de argamassa pode absorver por carbonatação, se faz necessário calcular a área exposta que pode ser coberta por esse volume. Considerando-se a espessura de 25 mm (valor intermediário entre os limites mínimo e máximo para revestimento externo e também espessura da placa produzida), consegue-se uma razão de 40 m²/m³ (área revestida com 01 m³ de argamassa).

Tabela 23 – Emissões de CO₂ para produção de 1m³ de argamassa por traço

TRAÇO	EMISSÕES DO CIMENTO CP II Z 32 - [kgCO ₂ /m ³]		EMISSÕES DA CAL [kgCO ₂ /m ³]		EMISSÕES AGREGADO [kgCO ₂ /m ³]	EMISSÕES TOTAIS	
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima		Mínima	Máxima
1:1:6	104,02	139,46	63,10	226,74	46,36	213,48	412,56
1:2:9	79,22	106,21	96,10	345,34	52,95	228,27	504,50

Fonte: Autoria própria (2021)

As quantidades máximas e mínimas de captura podem ser obtidas por meio da *Equação 9* e são apresentadas nas Tabela 24 e Tabela 25. Observa-se que o sistema de revestimento argamassado de 25 mm de espessura, sobre as condições já expostas (ambiente interno, 101 dias de carbonatação natural e 63 dias de carbonatação acelerada e sem proteção do tipo pintura) têm capacidade de capturar no mínimo 104,19 e 113,59 kgCO₂/m³ para os traços 1:1:6 e 1:2:9, respectivamente. Para as argamassas de referência a máxima capacidade (em função da espessura de 25 mm) de captura já havia sido evidenciada anteriormente aos 164 dias, o mesmo fenômeno não foi evidenciado para as tintas com acabamento do tipo pintura, com exceção do sistema de base PVA.

Aos 28 dias, pelo método BRE¹⁸, o sistema de referência havia capturado 22,58 kgCO₂/m³, na segunda medição, 101 dias, a captura em função da profundidade carbonatada foi de 44,10 kgCO₂/m³, ou seja 21,51 kgCO₂/m³ puderam ser capturados ao longo desses 63 dias. Para os demais sistemas, nessa mesma janela de tempo a captura apresentou valores bem abaixo quando comparados com a amostra de referência, mas valores mais próximos quando comparados os sistemas com pintura entre si, capturando para o sistema PPF (PVA Premium Fosco) 4,28kgCO₂/m³ e 5,76 kgCO₂/m³, já o sistema ASS (Acrílico Standard Semibrilho) apresentou valores de captura de 1,53 kgCO₂/m³ e 0,77 kgCO₂/m³ para os traços 1:1:6 e 1:2:9, respectivamente.

A taxa de aceleração de difusão de CO₂ dada pela relação da profundidade de carbonatação em ambiente acelerado e em ambiente de exposição natural foi de 2,7 e 3 vezes para o traço 1:1:6 e 1:2:9, respectivamente para o traço de referência (sem proteção superficial). Devido à menor

¹⁸ Os valores de profundidade considerados foram dos CP prismáticos pois as placas foram produzidas apenas com o traço 1:1:6.

difusibilidade de CO₂ em amostras com proteção, durante o período de realização deste estudo, não foi possível obter este indicador, uma vez que o processo de carbonatação natural resulta em pequenas profundidades carbonatadas.

Utilizando como base os dados de profundidade aos 28, 101, 127 e 164 dias é possível fazer previsão de datas prováveis onde a captura máxima poderia ser alcançada para os diferentes tratamentos. Das Figura 36 e Figura 37 estima-se que seriam necessários 158 dias de exposição ao CO₂ em ambiente acelerado para que as argamassas de base PVA atingissem a captura total e um total de 845 dias para que as argamassas com proteção de base Acrílica Premium semibrilho branco atinjam os 25 mm de espessura, e conseqüentemente a máxima captura, para o traço 1:1:6. Para o traço 1:2:9 esses valores reduziram para 143 e 446 dias. Ou seja, na pior condição (APS, traço 1:1:6) seriam necessários 2,3 anos para que uma profundidade de 25 mm fosse totalmente carbonatada. Pode-se afirmar que ao longo do tempo, tem-se difusão de CO₂ e a conseqüente reação de carbonatação nas argamassas de revestimento mesmo com a superfície protegida com pintura imobiliária. Considerando uma espessura de revestimento de 25 mm (ABNT, 2013b) e vida útil de projeto mínima para os sistemas de vedações e estrutural entre 20 e 50 anos (NBR 15575 ABNT, 2021), a argamassa de revestimento poderá ser totalmente carbonatada na fase de uso, a depender das condições de exposição e do tipo e qualidade da tinta imobiliária utilizada como material de acabamento.

Tabela 24 – Estimativa de captura de CO₂ (kg/m³), por meio do método BRE, e=25mm – Traço 1:1:6

SISTEMA DE PROTEÇÃO	Tempo (dias)							
	28	101	127	164	28	101	127	164
	MÍNIMA				MÁXIMA			
REF	22,58	44,10	64,29	89,14	26,40	51,54	75,15	104,19
PPF		26,86	53,34	89,14		31,40	62,35	104,19
APF		23,70	30,66	40,96		27,70	35,84	47,87
ASF		24,26	32,18	39,58		28,35	37,61	46,27
AEF		24,86	30,37	45,22		29,06	35,50	52,86
APS		22,75	29,71	30,90		26,59	34,73	36,12
ASS		24,12	24,33	24,98		28,19	28,44	29,20
APF_C		26,48	35,09	36,36		30,95	41,01	42,50
APS_C		24,83	31,01	40,45		29,02	36,24	47,28

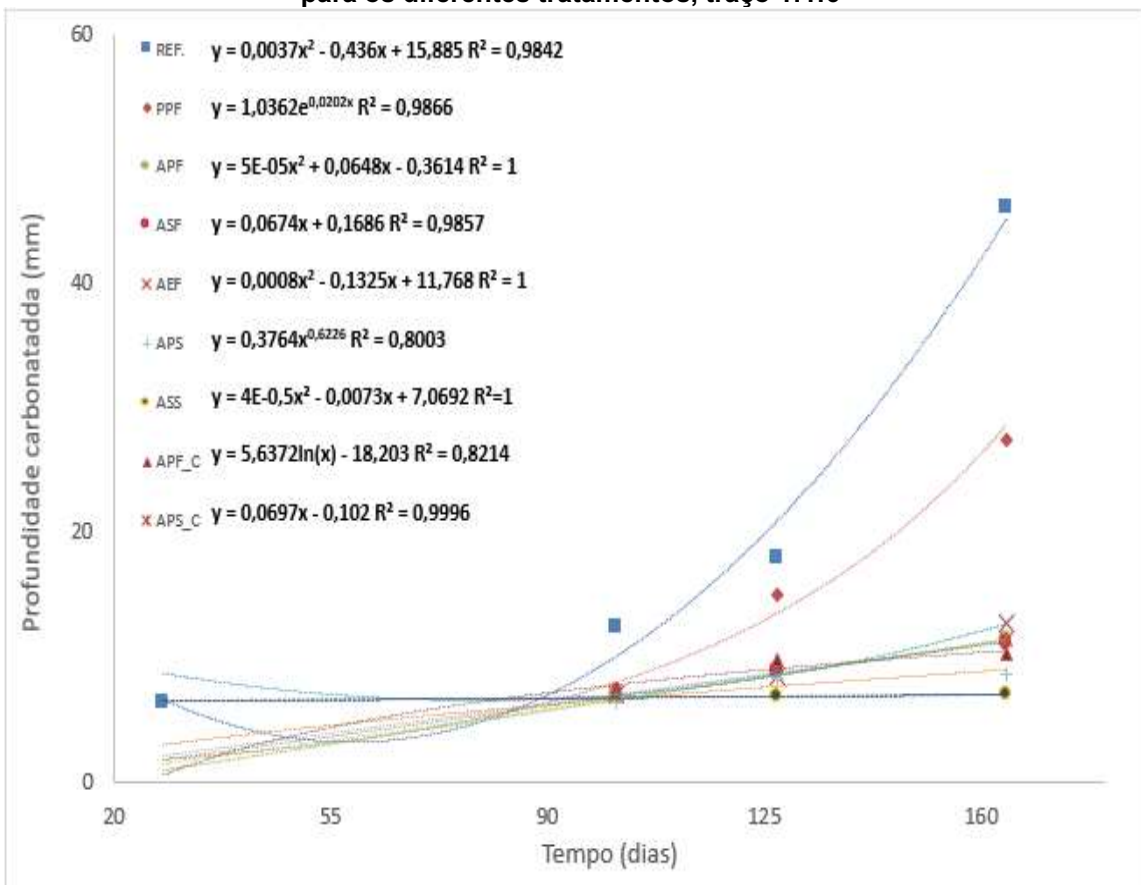
Fonte: Autoria própria (2021)

Tabela 25 – Estimativa de captura de CO₂ (kgCO₂/m³), por meio do método BRE, e=25mm – Traço 1:2:9

SISTEMA DE PROTEÇÃO	Tempo (dias)							
	28	101	127	164	28	101	127	164
	MÍNIMA				MÁXIMA			
REF	30,50	60,55	92,68	102,13	33,93	67,35	103,08	113,59
PPF		36,26	86,25	102,13		40,33	95,93	113,59
APF		33,16	36,92	53,94		36,88	41,06	59,99
ASF		32,94	43,63	54,21		36,64	48,53	60,29
AEF		34,02	35,23	56,64		37,84	39,18	63,00
APS		35,18	38,13	42,85		39,13	42,41	47,65
ASS		31,27	35,43	42,99		34,78	39,41	47,82
APF_C		34,38	39,54	46,87		38,24	43,98	52,13
APS_C		30,55	40,19	51,70		33,98	44,70	57,50

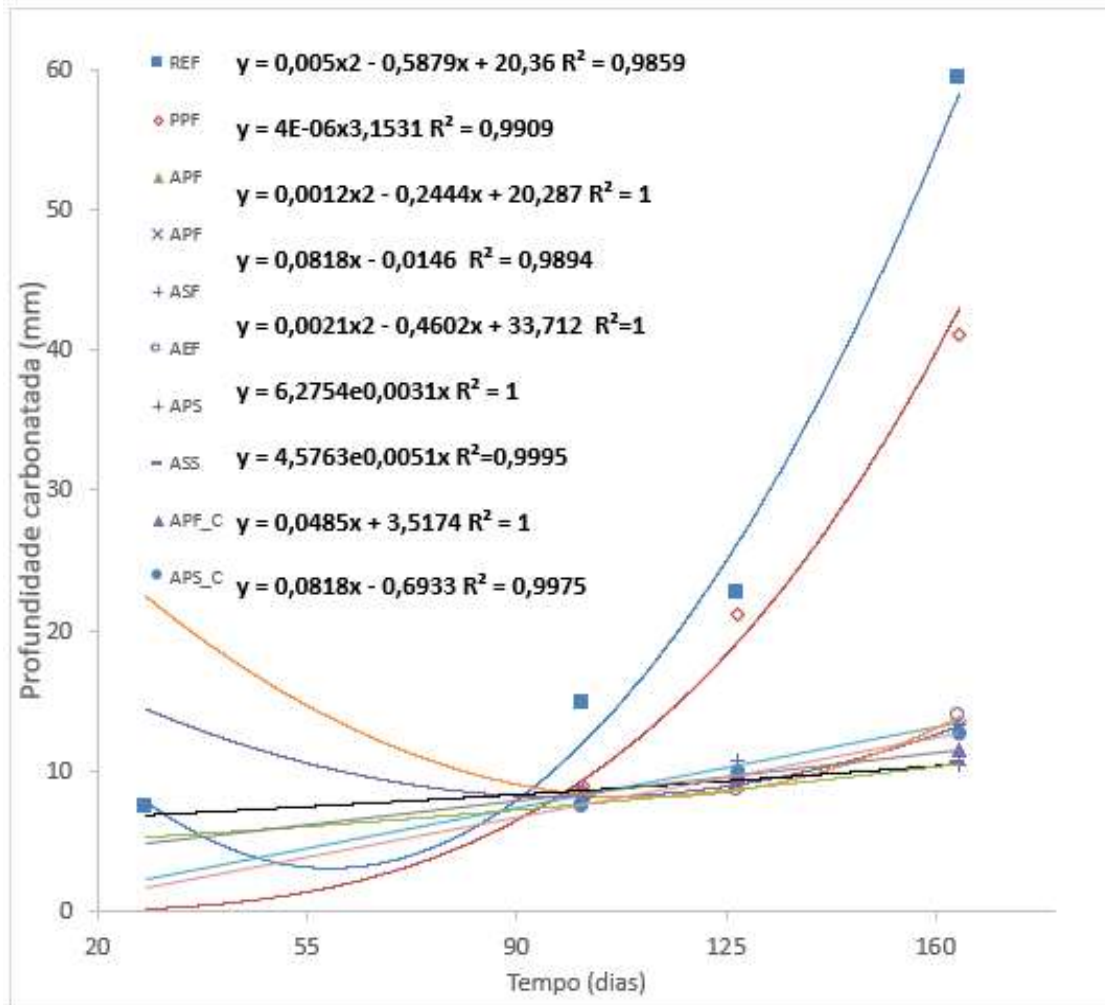
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 36 – Equações de projeção de tempo para profundidade máxima de carbonatação para os diferentes tratamentos, traço 1:1:6



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 37 – Equações de projeção de tempo para profundidade máxima de carbonatação para os diferentes tratamentos, traço 1:2:9

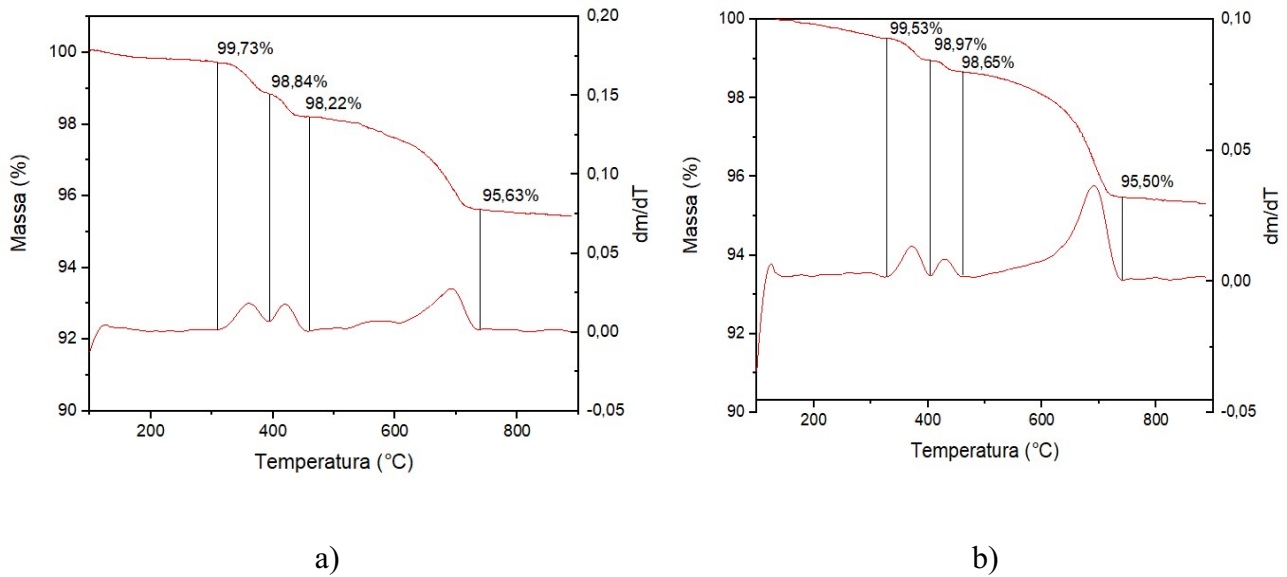


Fonte: Autoria própria (2021)

4.3.2 Análise termogravimétrica

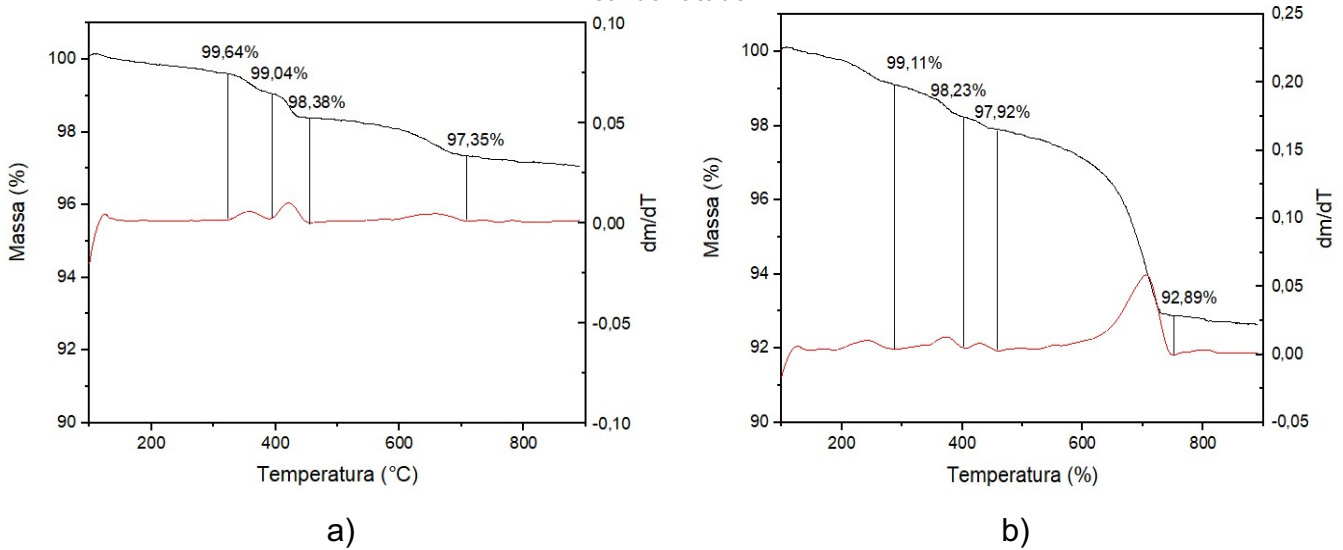
Ambos os traços produzidos foram submetidos a análise de potencial de captura, por meio da decomposição dos carbonatos no ensaio de análise termogravimétrica (Figura 38). Como pode-se observar existem três picos principais de perda de massa para ambas as argamassas o pico entre 300 e 400°C referente aos hidróxidos de cálcio, o pico que acontece até a temperatura 500°C refere-se a decomposição do carbonato de magnésio e o terceiro pico a temperaturas de 600 a 800°C que refere-se a decomposição do carbonato de cálcio (NIQUES, 2003; SCRIVENER; SNELLINGS; LOTHENBACH, 2016; RODRIGUES; JUNIOR, 2018).

Figura 38 – TG e DTG de argamassa traço 1:2:9 a) Zona não carbonatada; b) Zona carbonatada



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 39 – TG e DTG de argamassa traço 1:1:6 a) Zona não carbonatada; b) Zona carbonatada



Fonte: Autoria própria (2021)

A captura de CO_2 por análise térmica se processou conforme descrito no item 3.5.2.2. Os valores encontrados para captura de CO_2 pelo método BRE para o traço 1:1:6 foram equivalentes ao encontrado por análise térmica, sendo capturado pelo primeiro método, valor máximo de $26,40 \text{ kgCO}_2$, e por análise térmica o valor de captura foi de $29,80 \text{ kgCO}_2/\text{m}^3$, uma diferença de menos de $4 \text{ kgCO}_2/\text{m}^3$ entre os métodos de avaliação. Para o traço 1:2:9, entretanto, há bastante variação entre os métodos, aos 28 dias o método BRE devolveu um

valor de fixação de carbono de 33,93 kgCO₂/m³ para a análise térmica a captura foi de 16,60 kgCO₂/m³, como se pode ver da TG para este traço (Figura 38), tem-se picos mais elevados de hidróxidos e carbonatos de Magnésio e Calcio, em relação que na mistura 1:1:6. Este fato está relacionado ao proporcionamento das misturas. Na mistura 1:2:9 o consumo de cimento é 23,85 menor e o consumo de cal 34% superior ao traço 1:1:6. Com isso, na mistura 1:2:9 tem-se maiores quantidades de hidróxidos e carbonatos decorrentes da maior quantidade de cal hidratada empregada. Entretanto, a captura foi menor para o traço 1:2:9 decorrente de uma semicarbonatação na amostra, que pode ser evidenciada pelo pico no carbonato no que deveria ser a zona não carbonatada.

Os valores de carbonatos de cálcio e magnésio encontrados através da TG encontram-se na Tabela 26.

Tabela 26 – Valores de hidróxidos e carbonatos encontrados por TG

Tempo (dias)	Traço	Massa inicial (g)	CaCO ₃ capturado	MgCO ₃ capturado	Captura total de CO ₂	
					(%)	(kgCO ₂ /m ³)
28	1:2:9	5,44	3,43	0,47	1,75	16,60
28	1:1:6	6,62	8,41	0,68	4,06	29,80

Fonte: Autoria própria (2021)

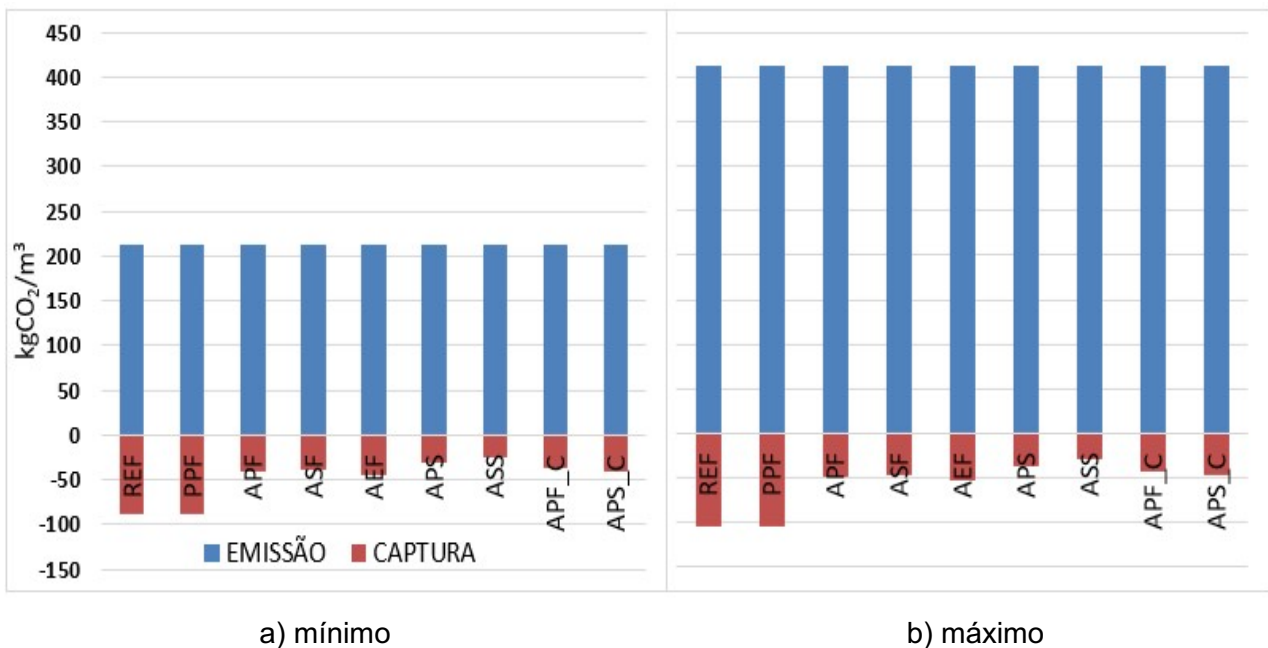
4.4 Balanço das emissões

Como já havia sido observado nas análises anteriores a captura aumenta com o tempo e decresce para os sistemas com proteção em comparação ao sistema de referência, devido a uma maior dificuldade de difusão do CO₂ graças a proteção conferida pelas tintas. Para realizar os balanços de CO₂ para o cenário foi necessário o conhecimento das emissões e captura associadas, as quais podem ser encontradas nas Tabelas Tabela 23, Tabela 24 e Tabela 25, respetivamente.

O balanço das emissões aos 164 dias pode ser visto nas Figura 40 e Figura 41. Pode-se observar que para o traço 1:1:6 que dos 213 kgCO₂ emitidos para produção do traço (um m³), aproximadamente 90kgCO₂ puderam ser absorvidos para situação de mínima emissão e captura, para situação de máxima captura das 412 kgCO₂ emitidos 105 kgCO₂ aproximadamente puderam

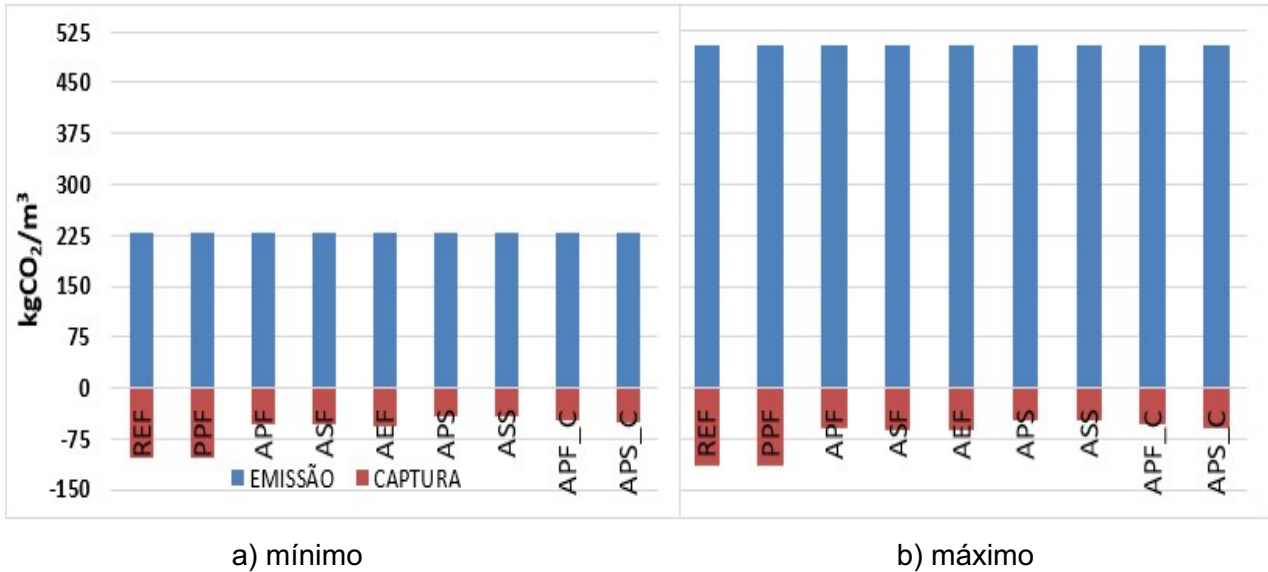
ser capturados. Já para o traço 1:2:9 na situação de mínima emissão 228 kgCO₂ foram emitidos e 102 puderam ser capturados. Para o cenário de máxima emissão e captura dos 505kgCO₂ emitidos 114 aproximadamente puderam ser capturados, considerando os mesmos 164 dias de carbonatação e 40m² de área coberta com 1m³. Esse balanço é referente as argamassas de referência (sem pintura) e refletem também o balanço para as argamassas de base PVA. Para as demais argamassas há uma redução da captura em função do sistema de proteção. Para o sistema acrílico econômico fosco, que apresentou menor proteção depois da tinta PVA, o traço 1:1:6 capturou no mínimo 45kgCO₂ e para o traço 1:2:9 a captura mínima foi de 56kgCO₂ aproximadamente. Evidenciando uma redução na captura da ordem de 44 e 45kgCO₂ que deixaram de ser capturado para os traços, naquele intervalo de tempo. A tinta acrílica Standard de acabamento semibrilho evidenciou uma redução de 59 e 64 kgCO₂/m³ na captura e conseqüentemente apresentaram menor valor de balanço das emissões. Os valores de balanço de CO₂ em kgCO₂/m³ para as demais idades ensaiadas e sistemas de proteção podem ser observados no APÊNDICE D – Balanço de CO₂.

Figura 40 – Balanço das emissões aos 164 dias, traço 1:1:6



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 41 – Balanço das emissões aos 164 dias, traço 1:2:9



Fonte: Autoria própria (2021)

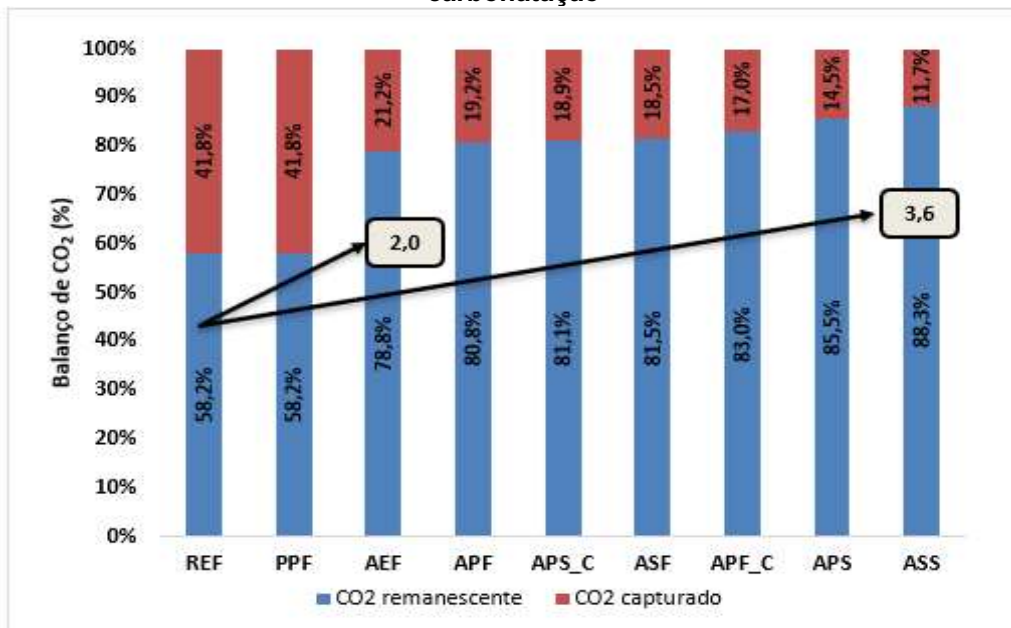
Considerando o balanço de CO₂ para o cenário de máxima captura, 164 dias (carbonatação natural e acelerada), do montante de CO₂ emitido 41,8% puderam ser recuperados por carbonatação para os sistemas de referência e base PVA (PPF). Apesar de terem capturado para esta data (de leitura) a quantidade total de CO₂ que está argamassa tem potencial, esse potencial foi alcançado em datas distintas, próximo as datas de 136 e 158 dias, respectivamente. O sistema acrílico Standard Semibrilho que conferiu maior proteção logrou capturar aproximadamente 12% das emissões deste traço.

Da Figura 42 observa-se que houve uma redução na quantidade de CO₂ que pode ser capturado, e conseqüentemente no balanço de CO₂, resultado direto da menor velocidade de carbonatação com relação a argamassa de referência. Para a argamassa acrílico econômica fosco essa redução foi de 2 vezes a referência. A redução foi de até 2,3 vezes para as argamassas APF, APSC e ASF. Para as tintas acrílica Premium fosca cinza e Acrílica Premium semibrilho a redução foi de 2,5 e 2,9 vezes a de referência respectivamente, A tinta ASS apresentou redução de até 3,6 vezes na velocidade.

Para o traço 1:2:9 o percentual de captura máxima das argamassas produzidas é de 44,7% do CO₂ emitido (Figura 43). As argamassas com pintura PVA Premium foscam apresentaram redução de 1,8 vezes a argamassa de referência. As argamassas com proteção acrílica Standard e Premium, acabamento semibrilho assim como para o traço 1:1:6 apresentaram maior

redução na velocidade, desta vez de 2,4 vezes aproximadamente as de referência. Os sistemas Acrílico Standard fosco, Premium fosco, Econômico fosco, e Premium semibrilho cinza apresentaram redução de 1,9 a 2,0 vezes a captura.

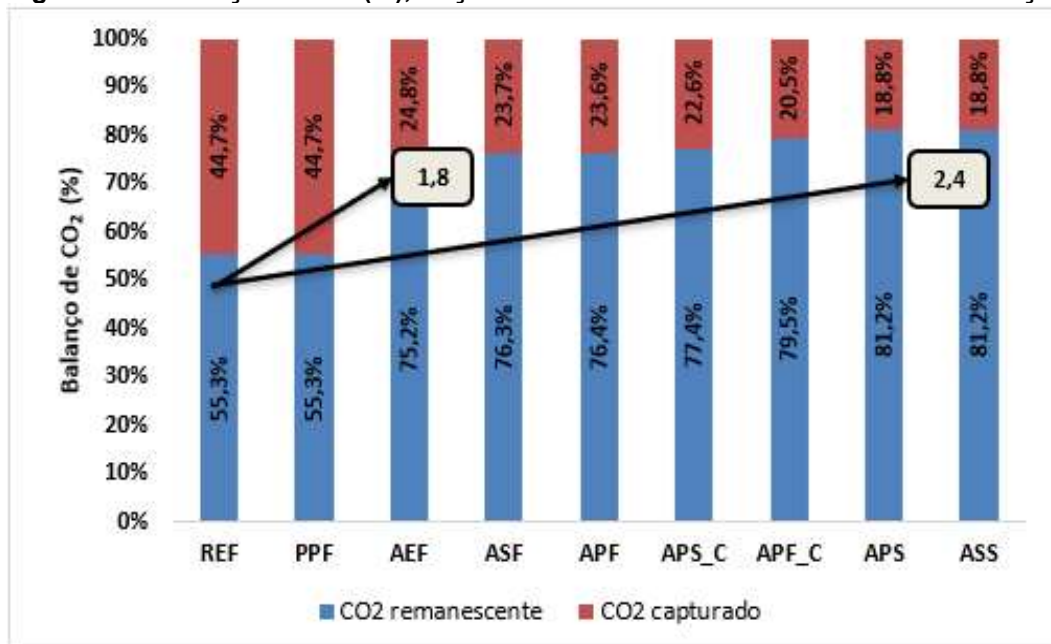
Figura 42 – Balanço de CO₂ (%) para o traço 1:1:6, considerando 164 dias de carbonatação



Nota: As flechas indicam os valores máximos e mínimos da redução no balanço de CO₂ devido a uma melhor proteção conferido pelos sistemas de proteção.

Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 43 – Balanço de CO₂ (%), traço 1:2:9 considerando 164 dias de carbonatação



Fonte: Autoria própria (2021)

Estes resultados comprovam que a profundidade de carbonatação e consequentemente a captura de CO₂ são afetadas devido a aplicação de sistemas de pintura, sejam eles quais forem. Entretanto, assim como a profundidade de carbonatação poderá ser atingida ao longo do tempo para as argamassas com e sem pintura a diferença é o tempo necessário para que essa profundidade seja atingida, infere-se que as argamassas independentemente do sistema de proteção podem ao longo do tempo incorporar até 41,8 e 44,7% do CO₂ emitido para os traços 1:1:6 e 1:2:9, respectivamente.

5 CONCLUSÕES

Sobre o efeito dos diferentes sistemas de proteção tipo pintura na difusão e captura de CO₂ em argamassas de revestimento, concluiu-se que:

- 1) A aplicação do sistema de pintura imobiliária sobre argamassas de revestimento é uma barreira para a difusão do CO₂ para o interior da matriz, reduzindo a velocidade de carbonatação e de captura de CO₂ no tempo, com influência do tipo de base (PVA ou acrílica) do sistema de pintura aplicado.
- 2) Quando comparadas às argamassas de referência (em ensaio natural e acelerado de carbonatação), as tintas acrílicas de acabamento semibrilho apresentaram maior proteção à difusão de CO₂, seguida pelas argamassas com proteção acrílica fosca (independente da qualidade da tinta), e por fim tinta de base PVA.
- 3) Quanto ao substrato as argamassas com maior teor de cal (1:2:9) emitiram mais CO₂ a atmosfera para produção do mesmo m³ do que as argamassas 1:1:6, essa emissão é justificada pois o valor associado a emissão da cal é maior que para o cimento. Em contrapartida essas argamassas capturam mais CO₂ pela reação de carbonatação pois possuem maior quantidade de materiais carbonatáveis, Ca(OH)₂ e Mg(OH)₂, além de possuírem menor resistência a compressão que a argamassa de traço 1:1:6 e conseqüentemente maior porosidade.
- 4) As tintas acrílicas atuam como melhor barreira na difusão de CO₂ para o interior da matriz a base de cimento, com redução na velocidade de carbonatação de até 3,6 vezes para argamassas acrílicas de acabamento semibrilho, 2,4 vezes menores para argamassas com proteção acrílica, qualidades Premium e Standard (independentemente da cor) acabamento fosco, e 2 vezes menores para proteção acrílica qualidade econômica fosco. Na tinta PVA, a velocidade de carbonatação foi 2,0 vezes menor que a argamassa de referência. Dos sistemas de proteção pode-se observar diferenças significativas em função da base (PVA e acrílica), não foi possível diferenciar a proteção conferida em função da qualidade das

tintas, mas sim em função do acabamento, sendo as semibrilho mais eficientes à proteção do que as foscas.

- 5) As argamassas de traço 1:2:9 (que apresentaram maior captura) sem proteção superficial podem capturar até 44,07% do CO₂ emitido e no mínimo 20,02%, considerando 164 dias de exposição ao CO₂, para profundidade de carbonatação de 25 mm. Se considerado apenas 28 dias de exposição ao CO₂ atmosférico, foram capturados no mínimo 6% e no máximo 13,40%. Quando analisamos os sistemas com proteção a mesma idade (164 dias) observa-se que as argamassas PVA podem capturar os mesmos valores que o sistema de referência, já para o sistema acrílico econômico fosco a captura variou de 11,2 a 24,8% das emissões e para os sistemas acrílico Standard e Premium semibrilho a captura é de no mínimo 8,5% e no máximo 18,8% para cada.
- 6) Apesar de as tintas apresentarem uma barreira a difusão de CO₂, que é função do sistema de proteção escolhido, pode-se dizer que as tintas de base PVA permitem maior permeabilidade ao CO₂ que os demais sistemas, podendo ser utilizada como meio de mitigação de CO₂ por argamassas haja vista que seus dados de profundidade foram bastante similares as argamassas sem proteção, atingindo carbonatação completa em idades similares a da argamassa de referência.
- 7) Por meio das equações de previsão, observou-se que para os sistemas com maior proteção, – traço 1:1:6 – sistema com pintura acrílica Standard semibrilho (ASS) e Acrílica Premium semibrilho (APS) são necessários de 2,1 e 2,3 anos para carbonatarem por completo, respectivamente. Deste modo pode-se inferir que as argamassas mesmo quando protegidas superficialmente podem carbonatar por completo durante sua vida útil. Podendo o potencial de captura das argamassas ser desconsiderado em estudos de mitigação de CO₂ por argamassas.
- 8) A taxa de aceleração de difusão de CO₂ dada pela relação da profundidade de carbonatação em ambiente acelerado e em ambiente de exposição natural foi de 2,7 e 3 vezes para o traço 1:1:6 e 1:2:9, respectivamente para o traço de referência (sem proteção superficial). Devido à menor difusibilidade de CO₂ em amostras com proteção, durante o período de realização deste estudo, não foi possível obter este

indicador, uma vez que o processo de carbonatação natural resulta em pequenas profundidades carbonatadas.

- 9) Após a aplicação do sistema de pintura, a difusão do CO₂ para o interior da matriz a base de cimento e cal foi reduzida o que impactou em menor captura de CO₂, uma vez que esta é função da fixação de carbono pela reação química de carbonatação. Logo, quando a superfície de uma argamassa de revestimento é protegida com pintura, tem-se a redução da velocidade de difusão de CO₂ atmosférico para o interior do material. Conseqüentemente, a captura de carbono devido à carbonatação da argamassa de revestimento é mais lenta ao longo do tempo.

Em estudos futuros sugere-se a análise da influência da radiação UV (envelhecimento) na difusão de CO₂ em argamassas de revestimento para diferentes configurações de sistemas de pintura imobiliária. Também são necessários estudos de longa duração, com exposição a ação não acelerada ao CO₂ de argamassas de revestimento com diferentes sistemas de pintura imobiliária, considerando condições de exposição distintas.

REFERÊNCIAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Test.** Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento determinação da resistência a tração na flexão e compressão.** Rio de Janeiro: ABNT, 2005a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2005b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13245: Tintas para Construção Civil – Execução de pinturas em edificações não Industriais Preparação da superfície.** Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13529: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Terminologia.** Rio de Janeiro: ABNT, 2013a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13749: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação.** Rio de Janeiro: ABNT, 2013b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12554: Tintas para edificações não industriais - Terminologia.** Rio de Janeiro: ABNT, 2013c.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697: Cimento Portland — Requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11702: Tintas para construção civil - Tintas, vernizes, texturas e complementos para edificações não industriais - Classificação e requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

BONFIM, G. **Informações gerais sobre tintas e pintura imobiliária.**

Disponível em: <https://abrafati.com.br/informacoes-gerais-sobre-tintas-e-pintura-imobiliaria/>. Acesso em: mar. 2021.

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **O Desafio da Sustentabilidade na Construção Civil**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2011.

ALBUQUERQUE, I. *et al.* **Análise das Emissões Brasileiras de Gases de Efeito Estufa e suas Implicações para as Metas de Clima do Brasil 1970-2019**, 2020. Disponível em: <http://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2020/11/SEEG8_DOC_ANALITICO_SINTESE_1990-2019.pdf>. Acesso em: Jul. 2020.

ANÁLISES TÉRMICAS. **Como interpretar curvas de TGA e DSC**. AnalisesTermicas.com.br. 2017. Disponível em: <http://www.analisestermicas.com.br/como-interpretar-curvas-de-tga-e-dsc/>. Acesso em: jul. 2020.

ANDERSSON, R. *et al.* Carbonation as a method to improve climate performance for cement based material. **Cement and Concrete Research**, v. 124, n. July, p. 1-10, 2019.

ANDRADE, C.; SANJUÁN, M. Á. Updating carbon storage capacity of Spanish cements. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 12, p. 1–15, 2018.

ANDREW, R. M. Global CO₂ emissions from cement production, 1928 – 2017. **Earth Syst. Sci. Data**, v. 10, p. 2213–2239, 2018.

ANTONIO, I. DE O. **Avaliação da captura de CO₂ devido à carbonatação de argamassas de revestimento produzidas com RCD**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2018.

BERTOLINI, L. **Materiais de Construção: patologia, reabilitação, prevenção**. São Paulo: Oficina de textos, 2010.

BIELEMAN, J. **Additives for Coatings**. Netherland: CONDEA Servo BV, 2000.

BRASIL. NDC Contribuição Nacionalmente Determinada para Consecução do Objetivo da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. **Unfccc**, v. 9, p. 6, 2016.

BRE. **Global, Product Category Rules for Type III environmental product declaration of construction products. EN 15804**, 2014.

BUCHER, R. C. Y. R; M ESCADEILLAS, G. Calcined Clays for Sustainable Concrete. **RILEM Bookseries**, n. January, 2015.

BUCHMANN, G. **Comparação dos impactos ambientais de formulações de tintas com a aplicação da avaliação do ciclo de vida**. Dissertação (Mestrado), Escola politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2018.
CALDAS, L. R. E; SPOSTO, R. M. Emissões de CO₂ referentes ao transporte de materiais de construção no Brasil: estudo comparativo entre blocos

estruturais cerâmicos e de concreto. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 4, p. 91–108, 2017.

CAMPOS, A. R. *et al.* Calcinação. *In: Tratamento de minérios*. 6.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. Cap.16, p.727-752.

CAO, Z. *et al.* The sponge effect and carbon emission mitigation potentials of the global cement cycle. **Nature Communications**, v. 11, n. 1, p. 1–9, 2020.

CARASEK, H. Argamassas *In: Isaia, G. Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais*. Ibracon, 2010. 885 - 933

CARVALHO, J. O. Emissões de gases de efeito estufa nos processos industriais e por uso de solventes. **Ministério de Ciência e Tecnologia**, p. 36, 2010.

CETESB, **Tintas E Vernizes - Guia técnico ambiental Tintas e Vernizes - Série P+L**. v. 1, São Paulo, 2006.

CETESB. **Estudo de baixo carbono para a indústria siderúrgica no estado de São Paulo de 2014 a 2030**. São Paulo, 2017.

CHEN, C.T; HO, C. W. Influence of cyclic humidity on carbonation of concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 12, p. 1929–1935, 2013.

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.

CNI. Construção Verde: Desenvolvimento com sustentabilidade. **Encontro da Indústria para a Sustentabilidade**, v. Cadernos s, p. 69, 2012.

CNI. A indústria brasileira de cimento base para a construção do desenvolvimento. **Associação Brasileira de Cimento Portland**. p. 66, 2017.

COSTA, M. R. M. M.; PACHECO, A. P. G. Avaliação do potencial de carbonatação de cales hidratadas em pasta, **Revista Matéria**, v.23, 2018.

CULTRONE, G.; SEBASTIÁN, E.; HUERTAS, M. O. Forced and natural carbonation of lime-based mortars with and without additives: Mineralogical and textural changes. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 12, p. 2278–2289, 2005.

DAMIN, O. C. B. **Sequestro de dióxido de carbono (CO₂) por resíduos de construção e demolição**. Dissertação (Mestrado), Universidade Santa Cecília, Santos, 2013.

DE MEDEIROS, M. H. F. *et al.* Partial replacement and addition of fly ash in Portland cement: influences on carbonation and alkaline reserve. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 2, n. 1, p. 1–9, 2017.

DENARI, B. G.; CAVALHEIRO, G. T. E. **Principios e aplicações de análise**

térmica. Material de apoio - Instituto de química de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012.

DILONARDO, I. *et al.* Avaliação metodológica da medida de carbonatação de microconcretos. **Anais Do 57º Congresso Brasileiro Do Concreto - Cbc2015 – 57Cbc**, n. October, p. 1–18, 2015.

DORNELLES, K. A. **Absortância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas latex acrílica e PVA**. 2008. 160p. Tese (doutorado), Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, São Paulo, 2018.

EKOLU, S. O. A review on effects of curing, sheltering, and CO₂ concentration upon natural carbonation of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 127, p. 306–320, 2016.

EL-HASSAN, H.; SHAO, Y. Carbon storage through concrete block carbonation. **Journal of Clean Energy Technologies**, v. 2, n. September, p. 287–291, 2014.

FELIX, E.; CARRAZEDO, R.; POSSAN, E. Análise paramétrica da carbonatação em estruturas de concreto armado via Redes Neurais Artificiais. **Alconpat**, v. 7, n. Maio-Agosto, p. 302–316, 2017.

FELIX, E. F.; POSSAN, E. Balance emissions and CO₂ uptake in concrete structures: simulation based on the cement content and type. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 11, n. 1, p. 135–162, 2018.

FERREIRA, G. E.; PEREIRA, L. DOS S. A indústria da cal no Brasil. **23 Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**, p. 583–589, 2009.

FILHO, J. H. *et al.* High-Volume Fly Ash Concrete with and without Hydrated Lime: Chloride Diffusion Coefficient from Accelerated Test. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 3, p. 411–418, 2013.

GALAN, I. *et al.* Estudio del efecto sumidero de CO₂ de los materiales de base cemento. **Cemento-hormigón**, v. 81, n. 939, p. 70–83, 2010.

GEOFF HAMMOND, C. J. Inventory of Carbon & Energy (Ice). 2008.

GNR, P. **GNR - Indicator 59cAG - world**, 2016.

GOBBI, A. **Atividade pozolânica de adições minerais pelas NBR 5751/2012 e NBR 5752/2012: uma análise crítica a partir de métodos complementares**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

GOMES, J. D. O.; LACERDA, J. F. S. B. Uma Visão Mais sustentável dos sistemas construtivos no Brasil: Análise do Estado da Arte. **E-Tech: Tecnologias para Competitividade Industrial**, v. 7, n. 2, p. 167–186, 2014.

GONZALEZ, E. D. R. S. Incentivos econômicos e projeto de supply chain para captura e sequestro de carbono: caso Brasil. **Production**, v. 24, n. 4, p. 847–860, 2014.

GUO, R. *et al.* Global CO₂ uptake of cement in 1930-2019. **Earth Syst. Sci. Data Discuss**, v. 2, n. October, p. 1–28, 2020.

HABERT, G. *et al.* Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 5, p. 820–826, 2010.

HARRISON, J. **Carbonating and hydraulic mortars - the difference is not only in the binder, aggregates are also important**. Alberta, Banff, 2005.

Disponível em:

http://canadamasonrydesigncentre.com/download/10th_symposium/1a-3.pdf.

Acesso em: Jun. 2020.

HOLMES, N. Introducing a New Cement Hydration and Microstructure Model. **Journal of Material Science & Engineering**, v. 07, n. 04, 2018.

IPCC. Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, **Nature**. 2019.

JOHN, V. M. *et al.* **Potencial de mitigação de CO₂ de materiais cimentícios na fase de uso**. ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **Anais...**Porto Alegre: ANTAC, 2018. Disponível em: <file:///C:/Users/Meire/Downloads/416.pdf>. Acesso em: maio 2020.

JOHN, V. M.; PUNHAGUI, K. R. G.; CINCOTO, M. A. Produção de cal. **Núcleo de Estudos de Economias de Baixo Carbono**, p. 67, 2014.

JOHN, V. M.; PUNHAGUI, K. R. G.; CINCOTTO, M. A. **Economia de baixo carbono: Avaliação de impactos de restrições e perspectivas tecnológicas - produção da cal - relatório final EBC**. Ribeiro Preto - São Paulo, 2014.

KULAKOWSKI, M. P.; PEREIRA, F. M.; MOLIN, D. C. C. D. Carbonation-induced reinforcement corrosion in silica fume concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 3, p. 1189–1195, 2009.

KWEKU, D. *et al.* Greenhouse Effect: Greenhouse Gases and Their Impact on Global Warming. **Journal of Scientific Research and Reports**, v. 17, n. 6, p. 1–9, 2018.

LAGERBLAD, B. Carbon dioxide uptake during concrete life cycle - State of the art. **Materials Science**, 2005.

LOH, K. Tintas na Construção Civil. *In: Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais*. São Paulo: Ibracon, 2017.

LU, C. F. *et al.* Effects of micro-environmental climate on the carbonation depth and the pH value in fly ash concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 181, n. February, p. 309–317, 2018.

MARANGU, J. M.; THIONG'O, J. K.; WACHIRA, J. M. Review of Carbonation Resistance in Hydrated Cement Based Materials. **Journal of Chemistry**, v. 2019, 2019.

MARTINEZ, A. S. A Mathematical Model for predicting the carbon sequestration potential of exposed Ordinary Portland Cement (OPC) concrete. **Construction and Building Materials**, v. 147, p. 417-427, 2017.

MATTANA, A. **Estudos de cales hidratadas de mercado - caracterização química, física e comportamento reológico da pasta**. Dissertação (Mestrado) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2013.

MAZURANA, L. **Captura de CO₂ em argamassas de revestimento através da carbonatação**. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2019. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/4733/1/argamassasrevestimentocarbonatacaonatural.pdf>. Acesso em: jun. 2021.

MCT. MINISTÉRIO DA CIENCIA E TECNOLOGIA, **Emissões de gases de efeito estufa nos processos industriais - Produtos minerais Parte II - Produção de cal, outros usos do calcário e dolomita - Produção e uso de barrilha**, Brasília, 2010.

MCTIC. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **Estratégia Nacional De Ciência, Tecnologia e Inovação**, p. 136, 2016. Disponível em: http://www.finep.gov.br/images/a-finep/Politica/16_03_2018_Estrategia_Nacional_de_Ciencia_Tecnologia_e_Inovacao_2016_2022.pdf. Acesso em: jul. 2021.

MEGGI, V. L. A. **Efeito da degradação das tintas na proteção do betão à carbonatação**. Dissertação (Mestrado) - Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2012.

MERTEN, H. O. *et al.* Compostos Orgânicos Voláteis De Tintas Imobiliárias E Certificações Ambientais: Estudo De Caso Para Subsolos. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 13, n. 1, 2016.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Microestrutura, propriedades e materiais. Concreto**, 2. ed., São Paulo: Ibracon, 2014.

NAQI, A.; JANG, J. G. Recent progress in green cement technology utilizing low-carbon emission fuels and raw materials: A review. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 2, 2019.

NEVES JUNIOR, A. **Captura de CO₂ em materiais cimentícios através de carbonatação acelerada**. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

NEVES JUNIOR, A. *et al.* Determination of CO₂ capture during accelerated carbonation of engineered cementitious composite pastes by thermogravimetry. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 138, n. 1, p. 97–109, 2019.

NEVES, R.; BRANCO, F.; DE BRITO, J. Field assessment of the relationship between natural and accelerated concrete carbonation resistance. **Cement and Concrete Composites**, v. 41, p. 9–15, 2013.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. São Paulo: Bookman, 2013.

NIGRI, E.; ROCHA, S.; FILHO, E. Portland cement: an application of life cycle assessment. **Product: Management & Development**, v. 8, n. 2, p. 167–172, 2010.

NIQUES, G. **Efeito do tempo de maturação na microestrutura de uma cal virgem dolomítica**. Dissertação (Mestrado) - Centro tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, 2003.

NOAA. **Nacional Ocean and Atmospheric Administration**. Disponível em: <<https://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/search>>. Acesso em: mai. 2020.

NUNES, F. L.; HELENE, P. R. D. L. **Influência da Dosagem na Carbonatação de Concretos**. (Boletim técnico) - Departamento de Engenharia da Construção Civil, Escola Politécnica da USP, EPUSP, São Paulo, 1998.

PADE, C.; GUIMARAES, M. The CO₂ uptake of concrete in a 100 year perspective. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 9, p. 1348–1356, 2007.

PAIVA, S. C.; GOMES, E. A. D. O.; OLIVEIRA, R. A. D. Controle de qualidade da cal para argamassas - metodologias alternativas. **Revista Ciências & Tecnologia**, v. 1, n. 1, p. 1–11, 2007.

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

PCIZIECZEK, A. **Análise das propriedades físicas e mecânicas de argamassa para revestimento utilizando cinza volante e resíduos de borracha de pneus inservíveis**. p. 1–147. Dissertação (Mestrado) em Engenharia Civil, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2017.

PEDRY, G. R. **Avaliação do Efeito da Proteção Superficial (Pintura) na Captura de CO₂ devido à Carbonatação de Argamassas de Revestimento**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal da Integração Latino Americana - UNILA, Foz do Iguaçu, 2020.

PETER, M. A. *et al.* Competition of several carbonation reactions in concrete: A parametric study. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 12, p. 1385–1393, 2008.

PILZ, C. F. **Influência Das Propriedades Da Resina Nas Propriedades De Uma Tinta Base Água Ilblioteca**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, 2004.

POLITO, G. Principais Sistemas de Pinturas e suas Patologias. **Material de apoio, Dep. de engenharia e materiais e construção**. p. 1–66, 2006.

POSSAN, E. **Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado**. p. 153. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, 2004.

POSSAN, E. Captura de CO₂ em materiais cimentícios. **Concreto & Construções**, v. Jul-Set, n. 98, p. 72–78, 2019.

POSSAN, E.; FELIX, E.; THOMAZ, W. CO₂ uptake by carbonation of concrete during life cycle of building structures. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 1, n. 1, p. 1–9, 2016.

QUARCIONI, A. V. *et al.* Estimativa da porosidade de argamassas de cimento e cal pelo método de cálculo de volumes. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 4, p. 175–187, 2009.

QUARCIONI, V. A. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento portland: estudo em pasta**. p. 172. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

RAO, N. V.; MEENA, T. A review on carbonation study in concrete. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 263, n. 3, 2017.

ROADMAP. **ROADMAP Tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050 / coordenado por Gonzalo Visedo e Marcelo Pecchio**. Rio de Janeiro: SNIC, 2019.

RODRIGUES, S.; JUNIOR, N. Análise térmica de pastas a base de cal hidratada com utilização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar **Engeneering and Science**. v. 4, p. 39–48, 2018.

RUFATTO, E. M. **Estimativa da captura de CO₂ devido à carbonatação natural de argamassas de revestimento**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Unioeste, Paraná, 2019.

SANJUÁN, M. Á. *et al.* Carbon dioxide uptake by mortars and concretes made with Portuguese cements. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 10, n. 2, 2020.

SANTOS, A. C. **Implementação e validação de um método de controlo do teor de COV em tintas líquidas, por GC-MS com amostrador headspace**. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Química, Universidade de Porto, 2015.

SAVIJA, B.; LUKOVIC, M. Carbonation of cement paste: understanding, challenges, and opportunities. **Construction and Building Materials**, v. 117, p. 285–301, 2016.

SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. **A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials**. 1° CRC Press, Boca Raton, 2016.

SEEG. Análise das Emissões Brasileiras de Gases de Efeito Estufa e suas implicações para as metas do Brasil. **Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa**, p. 1–33, 2019.

SEEG. **Impacto Da Pandemia De Covid-19 Nas Emissões De Gases De Efeito Estufa No Brasil**. 2020.

SEO, J. H. *et al.* CO₂ uptake of carbonation-cured cement blended with ground volcanic ash. **Materials**, v. 11, n. 11, 2018.

SILVA, M. D. S. *et al.* Redução Da Carbonatação Natural Em Concretos Com Proteção Acrílica. **15° Congresso internacional de patologias y recuperación de estructuras**, n. November, 2019.

SILVA, T. B. **Captura de CO₂ em argamassas de assentamento com agregado de resíduo de construção e demolição e aditivo incorporador de ar**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Unioeste, Paraná, 2019.

SNIC. **SNIC - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento**. Disponível em: <<http://snic.org.br/numeros-do-setor.php>>. Acesso em: junho de 2020.

SNIC. CONSUMO APARENTE DE CIMENTO POR REGIÕES E ESTADOS (t) 2020* (INCLUI AJUSTES**). p. 2020, 2020.

SOUZA, A. G. R.; GIANEZINI, M.; WATANABE, M. Panorama Do Setor De Tintas No Brasil: Mercado, Gestão E Tecnologias Para O Segmento De Tintas Imobiliárias. **Revista Gestão Inovação e Tecnologias**, v. 8, n. 3, p. 4430–4446, 2018.

STATISTA. **Major countries in worldwide cement production from 2010 to 2020**. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/267364/world-cement-production-by-country/>>. Acesso em: jun. 2020.

STRIPPLE, H. *et al.* **CO₂ uptake in cement - containing products Background and calculation models for IPCC implementation**. Stockholm: IVL Swedish Environmental Research Institute Ltd, 2018.

TAVARES, S. F.; BRAGANÇA, L. Índices de CO₂ para materiais de construção em edificações brasileiras. **SBE16 Brazil & Portugal**, p. 10, 2016.

TERCI, D. B. L.; ROSSI, A. V. Indicadores naturais de pH: usar papel ou solução? **Química Nova**, v. 25, n. 4, p. 684–688, 2002.

TORGAL, P. *et al.* An overview on concrete carbonation in the context of eco-efficient construction: Evaluation, use of SCMs and/or RAC. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 141–150, 2012.

TRACTON, A. Coatings Technology Fundamentals, Testing, And Processing Techniques. **Coating Technology Handbook**, v. 66, p. 68, 2006.

UEMOTO, K. L. **Influência da formação das tintas de base acrílica como barreira contra a penetração de agentes agressivos nos concretos**. Tese (doutorado) - Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, EPUSP, São Paulo, 1998.

UEMOTO, K. L. **Projeto, execução e inspeção de pinturas**. 2. ed. São Paulo: O nome da rosa, 2005.

UNFCCC. **Climate Change: impacts, vulnerabilities and adaptation in developing countries united nations framework convention on climate change**. 2020. Disponível em: <<https://unfccc.int/resource/docs/publications/impacts.pdf>>. Acesso em: Dez. 2021.

VITAL, M. H. F. Aquecimento global: acordos internacionais, emissões de CO₂ e o surgimento dos mercados de carbono no mundo. **BNDES Set.**, v. 24, n. 48, p. 167–244, 2018.

WANG, S. **Carbonation of cement-based products with pure carbon dioxide and flue gas**. Dissertação (Mestrado) - Departamento de engenharia civil e mecanica aplicada, McGill University, Montreal, Canada, 2007.

WANG, X. Y.; LEE, H. S. A model for predicting the carbonation depth of concrete containing low-calcium fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 725–733, 2009.

WOLIŃSKI, P. *et al.* The influence of the mineral additives on the carbonation of cement composites. **MATEC Web of Conferences**, v. 196, p. 1–7, 2018.

XI, F. *et al.* Substantial global carbon uptake by cement carbonation. **Nature Geoscience**, v. 9, n. 12, p. 880–883, 2016.

YANG, K. H.; SEO, E. A.; TAE, S. H. Carbonation and CO₂ uptake of concrete. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 46, p. 43–52, 2014.

ZHANG, J. *et al.* Analysis of CO₂ Emission for the cement manufacturing with alternative raw materials: A LCA-based framework. **Energy Procedia**, v. 61, p. 2541–2545, 2014.

ZHANG, Q.; YE, G. Dehydration kinetics of Portland cement paste at high temperature. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 110, n. 1, p. 153–158, 2012.

APÊNDICE A – Tintas empregadas

DADOS FORNECIDOS PELOS FABRICANTES, RELATIVO AS TINTAS EMPREGADAS

DENOMINAÇÃO		COMPOSIÇÃO	DILUIÇÃO	RENDIMENTO m ² /demão	DEMÃOS	TEMPO ENTRE DEMÃOS	MARCA
Selador acrílico							Alta Cor
Massa Acrílica	Cor branca	Água, resina à base de dispersão aquosa de copolímero estireno-acrílico, cargas minerais inertes, glicóis e tensoativos etoxilados.	N/A	Até 3m ² /demão - 0,9L	2 a 3 demãos	3h	Suvitli
Massa Corrida	Cor branca	Água, resina à base de dispersão aquosa de copolímero estireno-acrílico, cargas minerais inertes, glicóis e tensoativos etoxilados.	N/A	Até 3m ² /demão - 0,9L	2 a 3 demãos	3h	Suvitli
PVA - Premium - Fosco	Cor branca	Água, resina à base de dispersão aquosa de copolímeros estireno-acrílico e vinil-acrílico, aditivos, pigmentos isentos de metais pesados, cargas minerais, glicóis, espessantes, tensoativos, fungicida e bactericida à base de isotiazolinonas.	50% em todas as demãos	75m ² /demão - 3,6 L	2 a 3 demãos	4h	Suvitli
Acrílica - Económica - Fosco	Cor branca	Emulsão acrílica estirenada, cargas minerais, hidrcarbonetos alifáticos, espessantes, dispersantes e microbicidas.	Até 20% em todas as demãos.	30 a 40 m ² /demão - 3,6 L	2a 3demãos	4h	Corecul
Acrílica - Standard - Fosco	Cor branca	Água, resina à base de dispersão aquosa de copolímeros estireno-acrílico, aditivos, pigmentos isentos de metais pesados, cargas minerais, glicóis, espessantes, tensoativos, algicida à base de Diuron, fungicida e bactericida à base de isotiazolinonas.	20% em todas as demãos	70m ² /demão - 3,6L	2 a 3 demãos	4h	Glasuritl Suvitli
Acrílica - Standard - Sembriho	Cor branca	Água, resina à base de dispersão aquosa de copolímeros estireno-acrílico, aditivos, pigmentos isentos de metais pesados, cargas minerais, glicóis, espessantes, tensoativos, fungicida e bactericida à base de isotiazolinonas.	20% em todas as demãos	56m ² /demão - 3,6 L	2 a 3 demãos	4h	Glasuritl Suvitli
Acrílica - Premium - Fosco	Cor branca	Emulsão acrílica estirenada, cargas minerais, hidrcarbonetos alifáticos, espessantes, dispersantes e microbicidas.	Até 20% em todas as demãos.	30 a 40 m ² /demão - 3,6 L	2 a 3 demãos	4h	Corecul
Acrílica - Premium - Sembriho	Cor branca	Emulsão acrílica estirenada, cargas minerais, hidrcarbonetos alifáticos, espessantes, dispersantes e microbicidas.	Até 20% em todas as demãos.	30 a 40 m ² /demão	2 a 3 demãos	4h	Corecul
Acrílica - Premium - Sembriho	Cor cinza		Até 20% em todas as demãos.	Até 80m ² /demão - 3,6L	2 a 3 demãos	4h	Alessi
Acrílica - Premium - Fosco	Cor cinza		Até 20% em todas as demãos.	Até 80m ² /demão - 3,6L	2 a 3 demãos	4h	Alessi

Fonte: Autoria própria (2021)

APÊNDICE B – Dados de absorção de água por capilaridade

TAXA DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE, EM g/cm²

TRAÇO	TEMPO (h)			
	3	24	48	72
1:2:9	0,155	0,178	0,185	0,185
1:1:6	0,120	0,170	0,177	0,178

Fonte: Autoria própria (2021)

APÊNDICE C – Profundidade de carbonatação nos distintos tempos

PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO EM MM, NOS DISTINTOS TEMPOS

SISTEMA DE PROTEÇÃO	TEMPO EM DIAS							
	28	101	127	164	28	101	127	164
	Traço 1:1:6				Traço 1:2:9			
REF.	6,33	12,37	18,03	45,99	7,47	14,82	22,69	59,42
PPF	-	7,53	14,96	27,42	-	8,88	21,11	41,14
APF	-	6,65	8,60	11,49	-	8,12	9,04	13,20
ASF	-	6,80	9,03	11,10	-	8,06	10,68	13,27
AEF	-	6,97	8,52	12,68	-	8,33	8,62	13,87
APS	-	6,38	8,33	8,67	-	8,61	9,33	10,49
ASS	-	6,76	6,82	7,01	-	7,65	8,67	10,53
APF_C		7,43	9,84	10,20	-	8,42	9,68	11,47
APS_C		6,96	8,70	11,34	-	7,48	9,84	12,66

Fonte: Autoria própria (2021)

APÊNDICE D – Balanço de CO₂ para os diferentes traços

Quantidade de CO₂ remanescente (kgCO₂/m³), traço 1:2:9

SISTEMA DE PROTEÇÃO	MÁXIMA CAPTURA				MÍNIMA CAPTURA			
	Tempo em dias							
	28	101	127	164	28	101	127	164
REF	197,77	167,72	135,59	126,14	473,99	443,94	411,82	402,37
PPF	228,27	192,01	142,02	126,14	504,50	468,23	418,25	402,37
APF	228,27	195,11	191,35	174,33	504,50	471,33	467,58	450,56
ASF	228,27	195,33	184,64	174,06	504,50	471,55	460,87	450,29
AEF	228,27	194,25	193,04	171,63	504,50	470,48	469,27	447,86
APS	228,27	193,09	190,14	185,42	504,50	469,32	466,37	461,65
ASS	228,27	197,00	192,84	185,27	504,50	473,23	469,06	461,50
APF_C	228,27	193,89	188,73	181,40	504,50	470,11	464,95	457,63
APS_C	228,27	197,72	188,08	176,57	504,50	473,95	464,31	452,80

Fonte: Autoria própria (2021)

Quantidade de CO₂ remanescente (kgCO₂/m³), traço 1:1:6

SISTEMA DE PROTEÇÃO	Para mínima emissão				Para máxima emissão			
	Tempo em dias							
	28	101	127	164	28	101	127	164
REF	190,89	169,38	149,19	124,33	386,17	361,02	337,42	308,37
PPF	213,48	186,61	160,13	124,33	412,56	381,16	350,21	308,37
APF	213,48	189,78	182,81	172,52	412,56	384,86	376,72	364,69
ASF	213,48	189,22	181,30	173,89	412,56	384,21	374,95	366,29
AEF	213,48	188,62	183,10	168,26	412,56	383,50	377,06	359,71
APS	213,48	190,73	183,76	182,58	412,56	385,97	377,83	376,44
ASS	213,48	189,36	189,15	188,49	412,56	384,37	384,12	383,36
APF_C	213,48	187,00	178,39	177,11	412,56	381,62	371,55	370,06
APS_C	213,48	188,65	182,47	173,03	412,56	383,54	376,32	365,28

Fonte: Autoria própria (2021)