

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS MEDIANEIRA – PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
TECNOLOGIAS AMBIENTAIS**

LISSANDRA MAZURANA

**CAPTURA DE CO₂ EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO
ATRAVÉS DA CARBONATAÇÃO NATURAL**

DISSERTAÇÃO

**MEDIANEIRA
2019**

LISSANDRA MAZURANA

**CAPTURA DE CO₂ EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO
ATRAVÉS DA CARBONATAÇÃO**

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 – Câmpus Medianeira.

Discente: Lissandra Mazurana

Orientador(a): Prof. Dra. Edna Possan

MEDIANEIRA
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

F935d

Mazurana, Lissandra

Captura de CO₂ em argamassa de revestimento através da carbonatação natural / Lissandra Mazurana – 2019.

118 f. : il. ; 30 cm.

Texto em português com resumo em inglês

Orientadora: Edna Possan

Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais. Medianeira, 2019.

Inclui bibliografias.

1. Argamassa. 2. Cimento-indústria. 3. Gestão ambiental .4. Tecnologias Ambientais - Dissertações. I. Possan, Edna. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais. IV. Título.

CDD: 600

Biblioteca Câmpus Medianeira
Fernanda Bem 9/1735

TERMO DE APROVAÇÃO

CAPTURA DE CO₂ EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO ATRAVÉS DA CARBONATAÇÃO

Por

LISSANDRA MAZURANA

Essa dissertação foi apresentada às 14:00 horas, do dia 26 de abril de dois mil e dezenove, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Tecnologias Ambientais, Linha de Pesquisa Tecnologias de Prevenção e Controle de Impactos Ambientais, no Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O(A) candidato(a) foi arguido(a) pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dra. Edna Possan (Orientadora – UTFPR)

Prof. Dr. Paulo Rodrigo Stival Bittencourt (Membro Interno – UTFPR)

Prof. Dr. Alex Neves Junior (Membro Externo – UFMT)

Prof. Dra. Giovanna Patrícia Gava Oyamada (Membro Externo – UNIOESTE)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus que iluminou o meu caminho e me deu forças para enfrentar todos os obstáculos.

À minha mãe, que acreditou em mim e esteve sempre ao meu lado, tendo paciência e me dando forças para prosseguir na caminhada, dando o exemplo de caráter e dedicação.

Ao meu pai (*in memoriam*), que mesmo não estando presente de corpo está presente em meu coração, que deixou o exemplo de um pai, um verdadeiro herói pra mim, que me ensinou a ser uma pessoa cada vez melhor e sempre seguir em frente com honestidade, buscando traçar o caminho do bem, e sei que lá do céu está me guiando e iluminado sempre.

Ao meu marido, que sempre esteve ao meu lado me incentivando e apoiando, tendo paciência e acreditando em mim, fazendo tudo valer a pena.

Agradeço a minha orientadora professora Dra. Edna Possan, por todos os conhecimentos transmitidos, por toda a sua paciência, dedicação e apoio, por não ter me deixado desistir nunca, agradeço ainda pela sua amizade, que foi fundamental nesta caminhada.

Meus agradecimentos ao professor Dr. Paulo R. S. Bittencourt pelo auxílio com as análises térmicas, bem como as “aulas” de OriginPro, por toda a paciência e disposição em ajudar.

Ao apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação Araucária (FA), pela bolsa de mestrado concedida, à Laboratório de Tecnologia do Concreto da Itaipu Binacional, a Universidade Federal da Integração Latino-Americana pela infraestrutura laboratorial e pelo apoio técnico.

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Medianeira, em especial aos professores do curso de Mestrado em Tecnologias Ambientais.

Aos meus colegas Isabela de Oliveira Antonio e Eduardo Rigo, que sempre tiveram dispostos a me ajudar em todas as dificuldades, em especial aos ensaios de laboratório.

Agradeço aos pesquisadores e professores da banca examinadora pela atenção e contribuições dedicadas a este estudo.

A todos, enfim, que de uma forma ou outra me incentivaram e me deram forças para prosseguir nesta caminhada, meu muito obrigada.

RESUMO

MAZURANA, Lissandra. **Captura de CO₂ em argamassas de revestimento através da carbonatação**. 2019. 120p. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2019.

A indústria cimenteira é responsável por aproximadamente de 7% das emissões antropogênicas globais de CO₂. A fim de reduzir suas emissões, este setor tem buscado melhorar a eficiência energética, reduzir o teor de clínquer contido no cimento e implementar técnicas de estocagem e captura de carbono. A captura de CO₂ em materiais cimentícios, como argamassas e concretos, ocorre devido à reação química de carbonatação, ao longo de sua vida útil ou após a demolição da edificação/estrutura. Neste sentido, este estudo objetiva avaliar o potencial de captura de CO₂ devido à carbonatação em argamassas de revestimento produzidas com agregado reciclado de RCD (Resíduo de Construção e Demolição), sem proteção superficial. Foram produzidas argamassas com e sem cal hidratada, com substituição de areia natural por reciclada de RCD nos teores de 0, 25, 50, 75 e 100%, avaliando-se as principais propriedades no estado fresco e endurecido. As argamassas foram carbonatadas naturalmente em ambiente interno, externo protegido e externo desprotegido da chuva, onde permaneceram expostas até a idade de 266 dias. Para o balanço das emissões foram realizados os cálculos da quantidade de CO₂ capturado por meio da profundidade de carbonatação e da quantidade de CO₂ emitido na produção das argamassas. A captura de CO₂ também foi avaliada por análises térmica (TGA/DTG). Os resultados indicam que incorporação de RCD em argamassas de revestimento além de contribuir para a reciclagem destes materiais e redução de problemas ambientais eleva o potencial de captura de CO₂. Para as argamassas com 100% de RCD houve um aumento de cerca de 7 mm na profundidade de carbonatação e 2,30 vezes na captura de CO₂. As argamassas possuem grande potencial de capturar CO₂ em curtos períodos de tempo de exposição, as argamassas de cimento com 75 e 100% de RCD atingiram a profundidade máxima de carbonatação aos 266 dias e a captura foi de 165,34 KgCO₂/m³. A captura de CO₂ através da carbonatação natural de argamassas de revestimento pode ser considerada uma medida compensatória para o ciclo de vida das construções, visto que as argamassas possuem capacidade de reabsorver até 53,8% do CO₂ emitido em sua produção.

Palavras-chave: Sequestro de CO₂. Emissões. Argamassas. Medidas compensatórias.

ABSTRACT

MAZURANA, Lissandra. **CO₂ uptake in rendering mortars by carbonation**. 2019. 120p. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2019.

The cement industry generates around 7% of global anthropogenic CO₂ emissions. In order to reduce its emissions, this sector aims to improve energy efficiency, reduce clinker content in cement and implement carbon capture and storage techniques. The CO₂ uptake in cementitious materials, such as mortars and concretes, occurs due to the chemical reaction of carbonation, during its service life or after the building/structure demolition /. In this sense, this study aims to evaluate the CO₂ uptake potential due to carbonation in rendering mortars produced with recycled aggregates of CDW (Construction and Demolition Waste), without coating. Mortars with and without hydrated lime were produced, with replacement of natural sand by CDW recycled sand, at levels of 0, 25, 50, 75 and 100%, evaluating the main properties in the fresh and hardened state. The mortars were naturally carbonated in indoor environment, and outdoor environment protected and unprotected to the rain, until the age of 266 days. For the emission balance, calculations were made of the amount of CO₂ uptake by means of the carbonation depth and the amount of CO₂ emitted in the mortars production. CO₂ uptake was also evaluated by thermal analysis (TGA / DTG). The results indicate that incorporation of CDW in rendering mortars besides contributing to the recycling of these materials and reduction of environmental problems also increases the potential and capture of CO₂. For mortars with 100% CDW there was an increase of about 7 mm in the carbonation depth and 2.30 times in the CO₂ uptake (69.95 KgCO₂/m³). Mortars have a great CO₂ capture potential at exposure time, such as cement mortar with 75% and 100% RCD, reaching the highest purity of carbonation at 266 days and capture was 165.34 KgCO₂/m³. The CO₂ uptake through natural carbonation of rendering mortar can be regarded as a compensatory measure in the building life cycle, since the mortars have the capacity to absorb up to 53,8% of CO₂ emitted in its production.

Keywords: CO₂ sequestration. Emissions. Mortars. Compensatory measures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Concentração do CO ₂ ao longo do tempo.....	21
Figura 2: Emissões e captura de CO ₂ em materiais cimentícios.....	24
Figura 3: Representação da evolução da frente de carbonatação em argamassas...	24
Figura 4: Medição da carbonatação com paquímetro digital.....	26
Figura 5: Contorno de áreas.....	27
Figura 6: Ferramenta Grid.....	27
Figura 7: Potencialidade de captura de CO ₂ do resíduo de construção e demolição	33
Figura 8: Etapas do Projeto.....	34
Figura 9: Agregados utilizados no preparo das argamassas: a) areia Natural b) areia reciclada de RCD.....	36
Figura 10: Ensaio de massa unitária da cal e do cimento.....	38
Figura 11: Equipamentos: a) BET e b) Granulometria a laser.....	39
Figura 12: Determinação do Índice de consistência.....	40
Figura 13: Corpos de prova cilíndricos e prismáticos.....	41
Figura 14: Corpos de prova em período de cura.....	41
Figura 15: Suporte para amostra e Pulsador automático.....	43
Figura 16: Software Sonelastic 3.0.....	43
Figura 17: Secagem em estufa.....	44
Figura 18: Pesagem.....	44
Figura 19: Difratometro.....	45
Figura 20: Moagem da amostra para DRX.....	46
Figura 21: Porta amostra utilizado.....	46
Figura 22: Amostras em cadinho de porcelana.....	46
Figura 23: Amostras dispostas na Mufla.....	46
Figura 24: Exposição das amostras em ambiente a) externo protegido da chuva b) externo desprotegido da chuva c) laboratório.....	47
Figura 25: Equipamento de análise térmica.....	48
Figura 26: Pó guardado em porta amostras.....	48
Figura 27. Relação entre 1 m ³ de argamassa e sua área aplicável considerando espessura média de 20 mm.....	52
Figura 28: Curva granulométrica do cimento Portland CP II F- 32.....	56

Figura 29: Curva granulométrica da Cal Hidratada	56
Figura 30: Curva granulométrica da areia natural e RCD	57
Figura 31: Difratoograma dos materiais	59
Figura 32: Influência do teor de RCD na variável resposta densidade.....	61
Figura 33: Influência do traço na variável resposta densidade	61
Figura 34: Densidade (g/cm ³) em função do teor de substituição de RCD	62
Figura 35: Influência do teor de RCD, na absorção de água por capilaridade	63
Figura 36: Influência do traço na absorção de água por capilaridade	63
Figura 37: Absorção de Água Total em função do teor de substituição de RCD.....	64
Figura 38: Absorção de água das argamassas em função do tempo de ensaio.....	65
Figura 39: Absorção de água e densidade em função do teor de substituirão de RCD a) Argamassa tipo A b) Argamassa tipo B c) Argamassa tipo C	66
Figura 40: Resistência à Tração na Flexão (MPa)	67
Figura 41: Resistência à Compressão (MPa).....	68
Figura 42: Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa).....	70
Figura 43: Profundidade de Carbonatação das argamassas aos 28 dias	72
Figura 44: Profundidade de Carbonatação das argamassas aos 266 dias	72
Figura 45: Argamassas de cimento (A) com 50% RCD aos 28, 96 e 266 dias de exposição natural	73
Figura 46: Amostras com diferentes teores de RCD, aos 96 dias, expostas em ambiente interno (laboratório)	74
Figura 47: Amostras com 100% de RCD, em exposição ao CO ₂ em ambiente interno	75
Figura 48: Captura de CO ₂ das argamassas aos 266 dias	76
Figura 49: Influência do ambiente de exposição na Captura de CO ₂ ao longo do tempo para argamassas mistas tipo C, com 100% de RCD	77
Figura 50: Influência do traço na captura de CO ₂ das argamassas com 0, 50 e 100% de RCD, aos 266 dias, expostas em ambiente interno	78
Figura 51: Captura de CO ₂ aos 28 e 266 dias.....	80
Figura 52: Captura de CO ₂ ao longo do tempo, das argamassas de cimento com 100% de RCD, expostas em ambiente interno.....	81
Figura 53: Captura de CO ₂ em função do tempo de exposição e espessura do revestimento argamassado (Amostra C-100 ambiente interno)	81

Figura 54: Gráfico termogravimétrico das argamassas de cimento carbonatadas (C) e não carbonatadas (NC)	82
Figura 55: Curva termogravimétrica derivada das argamassas de cimento carbonatadas (C) e não carbonatadas (NC).....	83
Figura 56: Gráfico termogravimétrico das argamassas mistas tipo B carbonatadas (C) e não carbonatadas (NC)	85
Figura 57: Curva termogravimétrica derivada das argamassas mistas tipo B carbonatadas (C) e não carbonatadas (NC).....	85
Figura 58: Gráfico termogravimétrico das argamassas mistas tipo C carbonatadas (C) e não carbonatadas (NC)	86
Figura 59: Curva termogravimétrica derivada das argamassas mistas tipo C carbonatadas (C) e não carbonatadas (NC).....	87
Figura 60: Termograma da cal, RCD e cimento	88
Figura 61: Curva termogravimétrica derivada da cal, RCD e cimento.....	88
Figura 62: TG e DTG do hidróxido de cálcio e magnésio.....	90
Figura 63: Difrátograma das três áreas (carbonatada, semi carbonatada e não carbonatada) das argamassas de cimento, sem resíduo (A - 0).....	91
Figura 64: Difrátograma das argamassas de cimento, sem resíduo e com 100% de resíduos, carbonatadas e não carbonatadas	92
Figura 65: Difrátograma das argamassas mistas, tipo C, com 100% de resíduos, carbonatadas e não carbonatadas	93
Figura 66: Difrátograma das argamassas de cimento, sem resíduos, em três temperaturas	94
Figura 67: Emissões totais por m ³ de argamassa	95
Figura 68: Balanço das emissões	96
Figura 69: Balanço das emissões em porcentagem.....	97

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 1: Proporção de materiais para produção de 1m ³ de argamassa	35
Tabela 2: Resultados de massa específica e unitária	55
Tabela 3: Granulometria da areia natural e reciclada.....	57
Tabela 4: Caracterização dos agregados.....	57
Tabela 5: Resultados FRX	58
Tabela 6: ANOVA para os parâmetros utilizados	60
Tabela 7: Estequiometria das reações químicas.....	89
Tabela 8: Quantidade de óxido de cálcio e magnésio, carbonato de cálcio e magnésio e quantidade de H ₂ O e CO ₂ liberada em cada amostra	90
Tabela 9: Massa específica da areia natural e reciclada.....	114
Tabela 10: Massa específica do cimento	114
Tabela 11: Massa específica da cal	114
Tabela 12: Massa unitária areia natural e reciclada	115
Tabela 13: Massa unitária do cimento.....	115
Tabela 14: Massa unitária da cal.....	115
Tabela 15: Resultados de módulo e densidade	116
Tabela 16: Resultados da absorção por capilaridade	116
Tabela 17: Resultados da profundidade de carbonatação média, ambiente interno.	116
Tabela 18: Resultados da profundidade de carbonatação média, ambiente externo protegido.	117
Tabela 19: Resultados da profundidade de carbonatação média, ambiente esterno	118
Tabela 20: Resultados da resistência à tração na flexão e resistência à compressão, aos 28 e 63 dias.	118
Tabela 21: Resultados das emissões mínimas, médias e máximas.	119
Tabela 22: Resultados da captura de CO ₂ mínima, média e máxima, em idade de 266 dias, e espessura do revestimento de 20 mm.	119

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVO GERAL	16
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	17
2	ARGAMASSAS: ASPECTOS TÉCNICOS E DE SUSTENTABILIDADE	18
2.1	CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES	18
2.2	EMISSÕES E CAPTURA DE CO ₂	20
2.3	MEDIÇÃO DA CARBONATAÇÃO	25
2.3.1	Método com indicador químico de pH	26
2.3.2	Método por termogravimetria	27
3	RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	30
4	MATERIAIS E MÉTODOS	34
4.1	ETAPA 1 - PROJETO DE EXPERIMENTO	35
4.2	ETAPA 2 - SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	36
4.2.1	Seleção dos materiais	36
4.2.2	Caracterização dos materiais	37
4.3	ETAPA 3 – CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS	39
4.3.1	Resistência à tração na flexão	41
4.3.2	Resistência à compressão	42
4.3.3	Densidade de massa endurecida	42
4.3.4	Módulo de Elasticidade dinâmico	42
4.3.5	Absorção de Água por capilaridade	44
4.3.6	Difração de raio X – DRX	44
4.4	ETAPA 4 - CARBONATAÇÃO DAS ARGAMASSAS	47
4.5	ETAPA 5 - TG e DTG	47
4.6	ETAPA 6 - DETERMINAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO ₂ REFERENTE A PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS	49
4.6.1	Emissões de cimento	49
4.6.2	Emissões de cal	50
4.6.3	Emissões de agregado natural e reciclado	50
4.6.4	Emissões totais para revestimentos argamassados	51
4.7	ETAPA 7 - DETERMINAÇÃO DA CAPTURA DE CO ₂ DEVIDO À CARBONATAÇÃO	51
4.7.1	Estimativa empregando a profundidade carbonatada	51
4.7.2	Estimativa empregando análise térmica	53
4.8	ETAPA 8 - CÁLCULO DO BALANÇO DAS EMISSÕES	54
5	RESULTADOS	55
5.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	55
5.1.1	Propriedades físicas	55
5.1.2	FRX e DRX	58
5.2	CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS	59

5.2.1 Avaliação das propriedades físicas	61
5.2.2 Avaliação das propriedades mecânicas	66
5.2.3 Avaliação da profundidade de carbonatação	71
5.3 CAPTURA DE CO ₂	75
5.3.1 Estimativa da captura com base na profundidade de carbonatação.....	76
5.3.2 Estimativa da captura com base nas análises térmicas.....	82
5.3.3 Análise mineralógica	91
5.4 BALANÇO DAS EMISSÕES.....	94
6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	98
6.1 RCD, PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DAS ARGAMASSAS ..	98
6.2 CARBONATAÇÃO E CAPTURA DE CO ₂	99
6.3 BALANÇO DE EMISSÕES	100
6.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	101
REFERÊNCIAS.....	102
APÊNDICE A	114

1 INTRODUÇÃO

O clima no planeta Terra vem sofrendo constantes mudanças, principalmente, o aumento da temperatura que tem se intensificado nos últimos anos, devido, sobretudo às ações humanas, desmatamentos e emissões de gases (IPCC, 2015). Em janeiro do ano de 2018, a temperatura na superfície terrestre e oceânicas se elevou 0,71 °C em relação à média do século XX, sendo a quinta maior temperatura registrada nos últimos 38 anos (PROOXYGEN, 2018). O dióxido de carbono (CO₂) um dos principais Gases do Efeito Estufa (GEE), é responsável pelo aumento da temperatura média do planeta e aquecimento global (IPCC, 2015).

Uma das indústrias contribuintes para a elevação das emissões globais de CO₂ é a cimenteira, a qual é responsável em média por cerca de 7% das emissões antropogênicas de CO₂ na atmosfera, as quais têm origem na queima de combustíveis fósseis e calcinação do calcário para fabricação do clínquer (ALI et al., 2011, WBCSD, 2009; JOHN et al., 2018). HABERT et al., (2010) relatam que aproximadamente 0,92 toneladas de CO₂ são liberadas na atmosfera para cada tonelada de clínquer produzido no planeta.

O cimento é o principal componente de concretos e argamassas, cerca de 90% de todo o cimento produzido no Brasil é empregado nestes materiais, sendo 35% destinados à produção de concretos e 55% a produção de argamassas (JOHN et al., 2018), o restante (10%) é empregado para outros usos.

A diminuição da demanda de cimento ou a substituição por outros materiais não são opções realistas para a redução das emissões de CO₂, dado a necessidade de crescimento e urbanização de um país (WBCSD, 2009), o que tem motivado as indústrias cimenteiras à busca de maior eficiência em seus processos produtivos. Neste sentido, o Brasil é considerado uma referência mundial na produção de cimento com baixa emissão, pois é um dos países que menos emite CO₂ por tonelada de cimento produzida (585 kg de CO₂), utilizando a técnica de produção a seco que reduz a demanda de combustíveis para a produção do clínquer (WBCSD, 2009). Também faz o emprego de adições, como cinza volante e escória, que reduzem a quantidade de clínquer contido no cimento. Ainda a nova norma brasileira de cimento (NBR 16679, 2018) elevou o teor máximo de filler contido no cimento de 10 % para 25 %.

Conforme *Roadmap* para a indústria do cimento publicado pela WBCSD (2009), a redução das emissões associadas à produção do cimento pode ser obtida por meio da melhoria da eficiência térmica e elétrica, do uso de combustíveis alternativos, da redução do teor de clínquer contido no cimento; e captura e estocagem de carbono.

Recentemente muitos estudos têm sido realizados, buscando a avaliação da absorção ou reabsorção do CO₂ existente na atmosfera pelos materiais de construção, sobretudo o concreto (PADE e GUIMARÃES, 2007, DAMIN; JUNIOR; SANTOS, 2013; JANG et al., 2016, entre outros). Os produtos oriundos do cimento como as argamassas e o concreto têm a capacidade de absorver o CO₂ ao longo do tempo, através de um processo denominado carbonatação, que ocorre durante a vida útil da estrutura e após demolição (PADE e GUIMARRAES, 2007, FURCAS et al., 2014). A absorção de CO₂ do concreto durante a vida útil e após a demolição da estrutura/edificação pode compensar parcialmente as emissões de CO₂ advindas da produção do cimento (XUAN; POON, 2019).

A carbonatação é uma reação química entre o dióxido de carbono que penetra e se dissolve nos poros, com os compostos alcalinos que estão presentes na pasta endurecida do cimento hidratado. A principal consequência da carbonatação é a redução do pH, que deixa a armadura suscetível à corrosão, comprometendo a durabilidade das estruturas (CAFANGE, 2011). No entanto, em estruturas não armadas ou elementos sem função estrutural a carbonatação é considerada benéfica, pois atua como um processo de captura de CO₂ da atmosfera (POSSAN et al., 2017).

As argamassas de revestimento por serem aplicadas em camadas de pequena espessura em grandes áreas de exposição, possuem condições propícias para a captura de CO₂ em períodos de tempo inferior a 200 dias. De maneira análoga, pavimentos em concretos, meios fios, calçadas, etc., também têm grandes áreas superficiais e pequenas espessuras favorecendo a captura de CO₂ (ANTONIO, 2018).

A capacidade de absorção de CO₂ das argamassas e concretos é influenciada tanto por fatores internos como externos. Os internos estão relacionados à composição química, tipo de cimento, relação água/cimento e porosidade. Já os fatores externos se referem ao ambiente de exposição, a umidade, temperatura e a concentração de CO₂ destes ambientes (KALIYAVARADHAN; LING, 2017; XUAN; POON, 2019).

Segundo Xi et al. (2016) em média 97,9% das emissões iniciais de CO₂ oriundas do processo de fabricação do cimento, são absorvidas durante a vida útil¹ das argamassas e 2,1% no período de demolição. As argamassas à base de cimento podem capturar até 26,4 g de CO₂/ Kg de argamassa (FURCAS et al, 2014). Andrade et al. (2018) observaram que após 240 dias a profundidade de carbonatação nas argamassas podem atingir de 9 a 15 mm, dependendo do ambiente de exposição. A absorção média de CO₂ pode variar de 70g CO₂/m² e 50g CO₂/m² de revestimento para ambiente interno e externo protegido da chuva, respectivamente (ANDRADE et al., 2018).

Os resíduos de construção e demolição (RCD) também estão ganhando muita atenção quando se trata de sequestro de CO₂, pois são ricos em hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) e silicato de cálcio hidratado (C-S-H) que contribui para o desenvolvimento da reação de carbonatação (KALIYAVARADHAN; LING, 2017). O uso de RCD na produção de materiais de construção vem sendo estudado como uma alternativa para a minimização dos impactos ambientais associados à geração de resíduos (NENO; BRITO; VEIGA, 2014, CONTRERAS et al., 2016, XUAN, ZHAN e POON, 2016, entre outros). Estudos recentes também têm abordado o potencial de captura de CO₂ da atmosfera pelo uso de RCD na produção de materiais a base de cimento (XUAN; POON, 2019, PADE e GUIMARÃES, 2007, ANDRADE et al., 2018, FURCAS et al., 2014, entre outros).

Destaca-se que a indústria da construção civil é responsável pela geração de elevados volumes de resíduos de construção e demolição, que na maioria das vezes são descartados em lugares desapropriados, causando degradação ao meio ambiente e ao ecossistema (LOVATO et al., 2012). Segundo a ABRELPE (2016) os RCDs representam cerca de 38,5% do total de resíduos gerados no Brasil, 8,5% a mais que o ano de 2004 (NUNES et al., 2007). Além dos impactos ambientais, a geração dos resíduos representa um desperdício econômico já que parte deles pode ser reciclada ou reaproveitada na fabricação de produtos para a indústria da construção (KOCHEM, 2016).

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

Um fator determinante tanto para o desenvolvimento de políticas públicas de gestão de resíduos, quanto para o aproveitamento e reciclagem é o conhecimento do volume de resíduo gerado (ANGULO et al., 2011, YUAN; SHEN, 2011). O volume mensal de RCD recebido em unidades de disposição final varia de acordo com o porte do município e as políticas de gerenciamentos de resíduos. O volume produzido em cidades Paranaenses como Ponta Grossa chega a 1,14 kg/hab.dia, em Londrina 0,79 kg/hab.dia e em Cascavel 0,79 kg/hab.dia (KOCHEM, 2016).

O uso dos RCD's em materiais cimentícios como forma de substituição do agregado natural, além de contribuírem para a preservação de recursos naturais, redução de custos e problemas ambientais, ainda contribuem com a captura de CO₂ da atmosfera, pois quando demolidos os RCD's não se encontram totalmente carbonatados, novas superfícies ficam expostas ao CO₂ e se inicia um novo ciclo de carbonatação, logo, quando adicionados a outros materiais aumentam o potencial de captura de CO₂ (KALIYAVARADHAN; LING, 2017, POSSAN et al., 2017).

No presente contexto, este trabalho busca estimar a captura de CO₂ de argamassas mistas e de cimento produzidas com diferentes teores de RCD analisando a possibilidade de serem consideradas medidas compensatórias para o ciclo de vida das construções.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem por objetivo geral quantificar a captura de CO₂ de argamassas de revestimento, sem proteção superficial, com substituição do agregado natural por diferentes teores de agregado reciclado de RCD, pela reação de carbonatação, a fim de realizar o balanço de emissões e captações de carbono durante o ciclo de vida da edificação.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Avaliar a influência do teor de RCD na captura do CO₂ de argamassas de revestimento;
- b) Avaliar a influência das argamassas mistas e de cimento na captura de CO₂;
- c) Avaliar a influência do ambiente de exposição na captura de CO₂ de argamassas de revestimento;
- d) Avaliar a influência da espessura do revestimento na captura de CO₂ ao longo do tempo;
- e) Avaliar o tempo necessário para a máxima captura de CO₂ das argamassas;
- f) Determinar o balanço das emissões de CO₂ durante o ciclo de vida de argamassas de revestimento.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está dividida em seis capítulos. No primeiro, tem-se a introdução do trabalho, onde se apresenta a importância e justificativa do tema da pesquisa e os objetivos gerais e específicos do estudo.

No capítulo 2 são apresentados os aspectos técnicos e de sustentabilidade das argamassas, discutindo suas principais características e propriedades, as emissões de CO₂ e o potencial de captura deste gás devido à carbonatação natural de materiais cimentícios, em especial de argamassas.

No capítulo 3 é apresentado a origem e características dos resíduos de construção e demolição, bem como sua classificação e emprego em outros materiais.

No capítulo 4 descreve-se a metodologia da pesquisa, onde são apresentados os ensaios físicos e mecânicos realizados, o processo da carbonatação, as análises térmicas e as formulações empregadas para os cálculos de emissões, captura de CO₂ e balanço das emissões para as argamassas em estudo.

No capítulo 5 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais e das argamassas produzidas, o potencial de captura de CO₂ e o balanço das emissões das argamassas em estudo.

As considerações finais e sugestões para trabalhos futuros são apresentados no capítulo 6.

2 ARGAMASSAS: ASPECTOS TÉCNICOS E DE SUSTENTABILIDADE

Os assuntos apresentados neste capítulo referem-se às características e propriedades das argamassas e seus componentes, emissões e captura de CO₂ por meio da reação química de carbonatação e um breve conhecimento sobre os métodos de medida da carbonatação para a determinação da quantidade de CO₂ absorvido.

2.1 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES

Segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005) as argamassas são misturas homogêneas de agregado miúdo (areia), aglomerantes e água, que podem conter em sua composição aditivos ou adições, que tem como finalidade fornecer propriedades de endurecimento e aderência. Segundo Carasek (2007), as argamassas de revestimento tem como finalidade revestir e preparar a superfície para receber o acabamento final. Têm como principal função aprimorar o acabamento, proteger as estruturas de vedação aumentando o conforto térmico e acústico da edificação e promover a estanqueidade da água e gases.

As principais características das argamassas são trabalhabilidade, resistência, aderência e durabilidade, podendo ser classificadas de diferentes formas. Uma delas é quanto ao tipo do aglomerante utilizado, podendo ser simples (cimento ou cal) ou mistas (cimento e cal). A aplicação das argamassas está diretamente ligada à quantidade de aglomerante empregado, granulometria da areia e quantidade de água adicionada. Na construção civil são utilizadas para assentamentos de alvenarias, revestimento de alvenarias (chapisco, emboço e reboco), revestimento de pisos (contra piso) e assentamentos diversos como o de rochas (MARGALHA, 2011). Em menor escala, as argamassas também podem ser empregadas como materiais de reparo de estruturas.

O cimento utilizado nas argamassas tem influência positiva no aumento da resistência mecânica, na aderência e na estanqueidade à água e suas características físicas influenciam na qualidade e desempenho do revestimento. Deve obedecer a critérios de finura, teor de adições e composições químicas. O uso de cimentos em

quantidades inadequadas apesar de elevar a resistência mecânica, pode gerar aumento do módulo de elasticidade e retração no material o que facilitará o surgimento de trincas e fissuras (SILVA, 2006).

A cal hidratada, segundo a NBR 7175 (2003) é um pó seco que resulta da hidratação da cal virgem, constituída basicamente por hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2). Segundo Mattana (2013), o uso da cal hidratada nas argamassas aumenta a plasticidade e retenção de água, melhora a trabalhabilidade e absorve acomodatamentos estruturais iniciais. Com o elevado poder de retenção de água e o maior potencial de acomodar movimentações, a cal hidratada deixa as argamassas menos suscetíveis às fissuras, o que pode ser comprovado pelos resultados obtidos na absorção de água e módulo de elasticidade (ver item 5.2.1 e 5.2.2). Ainda as argamassas, sobretudo as mistas, como aumentam a absorção de água, contribuem para a reação química de endurecimento, a partir das reações de carbonatação naturais, por meio da qual o CO_2 reage com hidróxido de cálcio e precipita como carbonato de cálcio (CARASEK, 2007).

Os aditivos são produtos químicos adicionados às argamassas que têm como finalidade modificar determinadas propriedades no estado fresco e endurecido, gerando maior economia e eficiência. São muitos os aditivos empregados na produção de argamassas tais como: incorporadores de ar, plastificantes, hidrofugantes, retardadores de pega e retentores de água (SILVA, 2006). O principal aditivo empregado nas argamassas é o incorporador de ar, que consiste na inclusão de bolhas de ar que aumentam a retenção de água da argamassa, reduzem a exsudação e melhoram a plasticidade (SILVA, 2006).

A fim de melhorar as propriedades das argamassas e concretos e diminuir as fissurações provenientes da retração, são empregadas adições à mistura, como fibras e microfibras poliméricas (CAMPELLO, 2013). Existe uma grande variedade de fibras, que podem ser tanto de ocorrência natural ou sintética que são incorporadas às argamassas com objetivo de aumentar a tenacidade e reduzir o aparecimento de fissuras, ainda a utilização de determinadas fibras naturais pode estar associadas à redução das emissões de CO_2 e redução das necessidades energéticas (PEREIRA et al., 2015), tendo em vista que estas demandam processamento reduzido ou nulo, pois já se encontram disponível em forma fibrosa e pode ser facilmente extraído de suas próprias plantas.

Como apresentado, os materiais constituintes têm influência nas propriedades das argamassas e, conseqüentemente, no desempenho físico e mecânico das mesmas. Também afetam sua capacidade de capturar CO₂, cujo tema será abordado na seqüência.

2.2 EMISSÕES E CAPTURA DE CO₂

As emissões antropogênicas de gases de efeito estufa (GEE) contribuem para as mudanças climáticas e o aquecimento global. O aquecimento tende a ocasionar uma série de mudanças nas condições de vida, dentre elas o aumento da ocorrência de eventos extremos como: enchentes, furacões, secas, a alteração dos ecossistemas afetando a capacidade produtiva, e ainda a disponibilidade e qualidade de diversos recursos naturais (JUNIOR; PINHO; SELAN, 2014).

Desde a era pré-industrial as emissões de GEE provocaram grandes aumentos nas concentrações de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) na atmosfera. As emissões cumulativas de CO₂ entre os anos de 1750 e 2011 chegaram em média a 310 Gigatonelada de CO₂, destes, 40% permaneceram na atmosfera e os demais foram removidos e armazenados em terra (em plantas e solos) e no oceano (IPCC, 2015).

No ano de 2016 as emissões brasileiras de gases do efeito estufa subiram 8,9% em comparação com o ano de 2015. Naquele ano, o país emitiu 2,278 bilhões de toneladas brutas de CO₂, o que representa 3,4% do total mundial, fazendo com que o Brasil ocupasse o 7º lugar de maior poluidor do mundo. Dos setores que mais emitem GEE no país, está o uso da terra (51%), seguido da agropecuária (22%), energia (19%), indústria (4%) e resíduos (4%). Dentro do setor de energia, o Brasil é o 13º colocado no ranking de países que mais emitem GEE no mundo, sendo que 93,5% desses gases é CO₂ (SEEG, 2016). Segundo a Agência Internacional de Energia (2013), até o ano de 2035 as emissões de CO₂ relacionadas com a energia irão aumentar 20%, resultando em um aumento de 3,6°C na temperatura média do planeta, valor bem acima da meta internacional acordada de 2°C.

As emissões nacionais no setor de processos industriais no ano de 2017 subiram de 95,6 milhões de toneladas de CO₂ para 99 milhões de toneladas e no setor

de energia as emissões aumentaram de 424 para 431 milhões de toneladas de CO₂ (SEEG, 2018).

Desde o ano de 1950 a concentração global de CO₂ na atmosfera tem se elevado. Hoje essa concentração chega a 411,17 ppm e estudos afirmam que em 2050 pode atingir valores próximos de 450 ppm. Na Figura 1 é possível visualizar o crescimento da concentração de CO₂ na atmosfera desde o ano 1000 até os dias atuais, sendo que o aumento da concentração de CO₂ é de aproximadamente 32% (PROOXYGEN, 2019).



Figura 1: Concentração do CO₂ ao longo do tempo
Fonte: Prooxygen (2019).

Das emissões industriais globais de CO₂ 7% são associadas à produção do cimento, sendo que 50% são provenientes do processo de fabricação do clínquer, 40% da queima de combustíveis fósseis para aquecer os fornos e 10% são decorrentes de atividades de transportes de matéria-prima e eletricidade (WBCSD, 2012).

No ano de 2016 o Brasil produziu aproximadamente 57,4 milhões de toneladas de cimento, ficando entre os 10 maiores produtores mundiais de cimento (SNIC, 2017; USGS, 2017). Para cada tonelada de cimento produzido, o Brasil emite em média

585kg de CO₂. A exemplo, nações como China e EUA emitem 642 e 778 Kg de CO₂, respectivamente (WBCSD, 2009). A baixa emissão associada à produção do cimento brasileiro deve-se à maior eficiência do processo produtivo e ao emprego de adições na fabricação do cimento (WBCSD, 2012).

Muitas indústrias cimenteiras estão propondo mudanças no processo produtivo, na tentativa de reduzir o número de emissões e tornar o processo de produção mais eficiente. Dentre as medidas que estão sendo realizadas está a implantação de eficiência térmica e elétrica, com novas tecnologias em equipamentos e fábricas, a utilização de combustíveis alternativos que neutralizam as emissões de gás carbônico, a substituição do clínquer por outros materiais de baixo carbono e a captura e armazenamento de carbono (WBCSD, 2009).

No processo de fabricação da cal, componente empregado principalmente em argamassas de revestimento, também ocorre a emissões de CO₂ por meio da descarbonatação da pedra calcária e da queima de combustíveis no processo de calcinação. As emissões resultantes para a produção da cal virgem variam entre 464 e 868 KgCO₂/t de cal e para a cal hidratada varia entre 419 e 694 KgCO₂/t (JOHN; PUNHAGUI; CINCOTTO, 2014). Os autores ainda destacam que no ano de 2013 as emissões por descarbonatação e calcinação para a produção da cal foram entre 5047 e 8239 Gigagrama² de CO₂ e estima-se que se mantidas as mesmas condições esses valores serão entre 5995 e 9787 Gigagramas³ de CO₂ no ano de 2020.

Apesar do processamento da cal demandar menores temperaturas que o processamento do cimento, as elevadas emissões do setor são associadas à baixa eficiência dos fornos (JOHN; PUNHAGUI; CINCOTTO, 2014). Ainda segundo os autores, para reduzir as emissões associadas à produção da cal, recentemente as indústrias estão criando estratégias para a mitigação das emissões de CO₂, baseando-se em mudanças de combustíveis e tecnologias empregadas na calcinação.

A inserção de tecnologias para mitigação das emissões do carbono em concretos e argamassas podem reduzir em média 80 milhões de toneladas de CO₂

² Ou 5,05 e 8,24 milhões de toneladas.

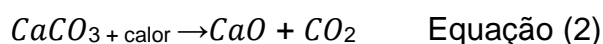
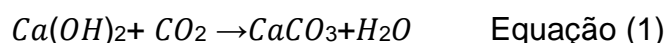
³ Ou 5,99 e 9,78 milhões de toneladas.

entre os anos de 2014 e 2050, o que representa 5,1% para as emissões do cimento, sendo mitigado cerca de 7% para as emissões de argamassas e 13% para os concretos (JOHN et al., 2018).

Além das ações de minimização das emissões no processo produtivo, existem formas de capturar e estocar o CO₂ por métodos físicos como armazenamento em formações geológicas, oceanos e fundo de mares e processos químicos como a carbonatação (HUIJGEN e COMANS, 2003).

A captura de CO₂ pode acontecer de duas maneiras: direta ou indireta. Pela maneira direta acontece a separação e captura de CO₂ de processos industriais e processos relacionados à geração e/ou consumo de energia seguido do transporte e armazenamento deste gás em locais de segurança em formações geológicas, nos oceanos, em forma de carbonatos minerais ou utilizados em processos industriais. Na captura do CO₂ pela maneira indireta acontece a absorção do gás de forma natural, por meio da fotossíntese e carbonatação (YANG et al., 2008).

No que se refere aos processos indiretos de absorção de CO₂ da atmosfera, a carbonatação de materiais a base de cimento, como concretos e argamassas, tem ganhado destaque nos últimos anos. (FURCAS et al., 2014). No processo de carbonatação o CO₂ reage com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) presente na matriz cimentícia das argamassas e precipita como carbonato de cálcio (CaCO₃) e água (H₂O), conforme Equação 1 (POSSAN et al., 2017), em um processo reverso à produção do cimento (Equação 2).



A Figura 2 representa um esquema gráfico do ciclo de emissões e captura de CO₂ de materiais a base de cimento. O balanço das emissões pode ser conduzido por meio da diferença entre o total de CO₂ decorrente da produção do cimento e a quantidade de CO₂ capturado devido a reação química de carbonatação durante o ciclo de vida e o período pós-demolição da edificação.

Segundo Neves Junior (2014) a carbonatação acontece tanto na vida útil da estrutura, como no período de demolição. Começa na superfície exterior da estrutura e se move progressivamente para o interior, o processo é controlado pela facilidade

de difusão do CO₂, que está diretamente ligada a umidade interna, tamanho dos poros e composição química dos materiais.

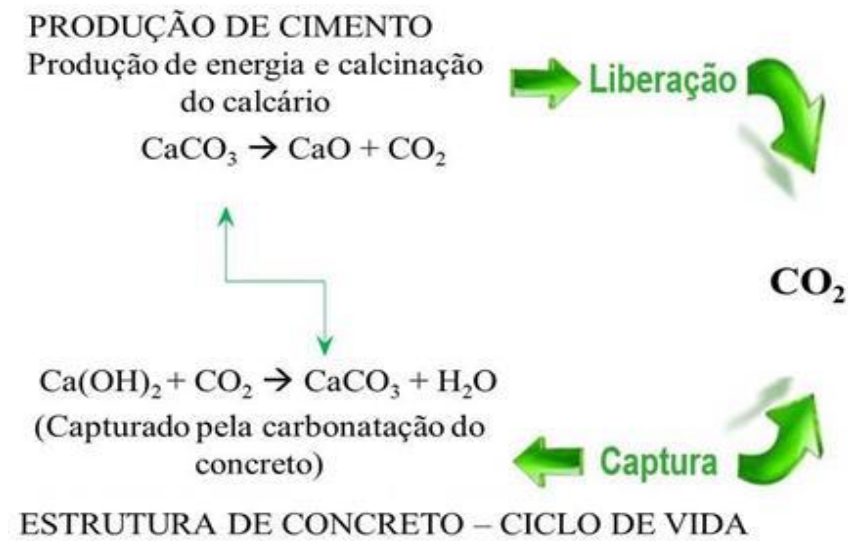
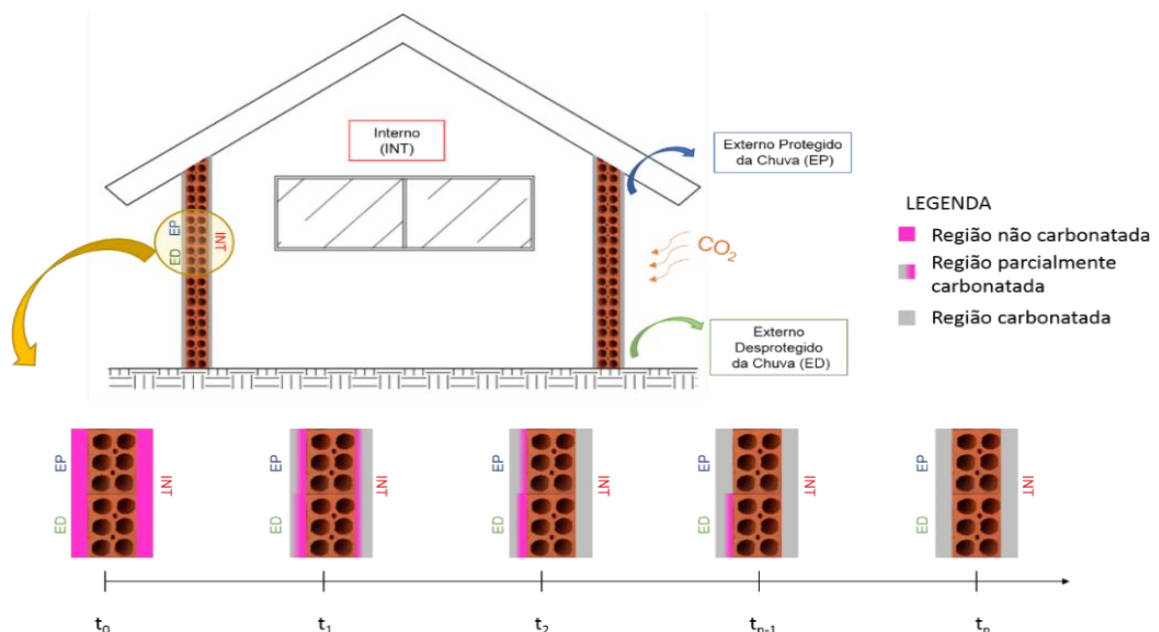


Figura 2: Emissões e captura de CO₂ em materiais cimentícios
 Fonte: Possan *et al.*, (2017).

Na Figura 3 tem-se a representação esquemática da ação da carbonatação em uma edificação revestida com argamassa cimentícia. Nota-se uma grande área de revestimento, interna e externa, exposta a ação do CO₂, a qual captura este gás durante o ciclo de vida da construção.



A carbonatação, e conseqüentemente a captura de CO₂, está atrelada à facilidade que o CO₂ tem para penetrar a matriz cimentante. Fatores relacionados aos materiais, em especial ao tipo e teor de cimento, e ao ambiente de exposição (umidade e concentração de CO₂) afetam esse avanço (EKOLU, 2016).

A umidade é um dos fatores mais influentes neste processo. Em geral, a profundidade de carbonatação é maior em ambientes externos protegidos do que externos desprotegidos, sendo que essas diferenças estão relacionadas ao grau de saturação dos poros devido à chuva e às mudanças de umidade que ocorrem no interior do concreto (GARCIA et.al., 2010). Possan et al (2017) avaliaram experimentalmente o efeito da umidade interna na profundidade de carbonatação em uma estrutura de concreto. Constatou-se que quanto maior a umidade interna menor a profundidade carbonatada, sendo que para material saturado (100% de umidade) a carbonatação é nula. A máxima carbonatação foi observada quando o concreto encontrava-se com umidade interna de 75 % a qual estava em equilíbrio com a umidade relativa do ar na região de estudo (73%) (POSSAN et al., 2017).

Como a carbonatação é um processo lento que ocorre de forma natural, e muitas vezes leva anos para que uma estrutura seja totalmente carbonatada, em alguns casos faz-se a utilização de ensaios de carbonatação acelerada, para seu estudo (KALIYAVARADHAN; LING, 2017). Contudo, para os revestimentos argamassados não é necessário acelerar este processo, pois estes materiais possuem estruturas facilmente carbonatáveis em ambiente natural. No estudo de Antonio (2018), em menos de 200 dias, amostras expostas em ambientes naturais de degradação já apresentavam profundidades de carbonatação superior a 20 mm.

2.3 MEDIÇÃO DA CARBONATAÇÃO

Existem diversos métodos para a terminação da profundidade de carbonatação de materiais cimentícios (difração de raio-X, termogravimetria, determinação de pH por meio de titulação, espectrofotometria no infravermelho, entre outros) (ELENI et al., 2014). Na sequência serão abordados o método com indicador químico de pH e o método termogravimétrico que serão os empregados neste estudo.

2.3.1 Método com indicador químico de pH

Devido à facilidade de utilização o procedimento empregando indicadores químicos de pH é bastante difundido, sendo a metodologia descrita pela RILEM CPC-18 (1998). A medição da profundidade de carbonatação pode ser conduzida com o uso de um paquímetro ou por análise de imagem. Para tal, primeiramente faz-se necessária à aspersão de um indicador ácido-base, como a solução de fenolftaleína em álcool etílico que torna incolor as áreas carbonatadas e faz com que as áreas não carbonatadas assumam uma cor vermelho-púrpura (NEVES, 2005).

Para medições um uso de paquímetro, após a aspersão do indicador químico, deve ser tomadas diferentes medidas da profundidade carbonatada (região incolor), sendo ao menos uma em cada face da amostra para corpos de prova prismáticos (Figura 4).



Figura 4: Medição da carbonatação com paquímetro digital
Fonte: Autoria própria (2019).

Já o método de medição de carbonatação por imagem consiste na obtenção de fotografias que são analisadas por meio de ferramentas de análise de imagens que facilitam a visualização e nitidez. Ferramentas de aproximação, ajustes de brilho, de contrastes e de traçados, são utilizadas para contorno das áreas carbonatadas (Figura 5), fornecendo medidas de área e perímetro (DILONARDO et al., 2015).

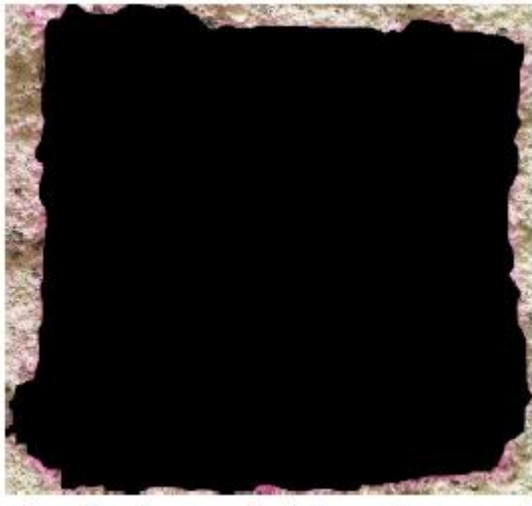


Figura 5: Contorno de áreas
Fonte: Dilonardo et al., (2015).

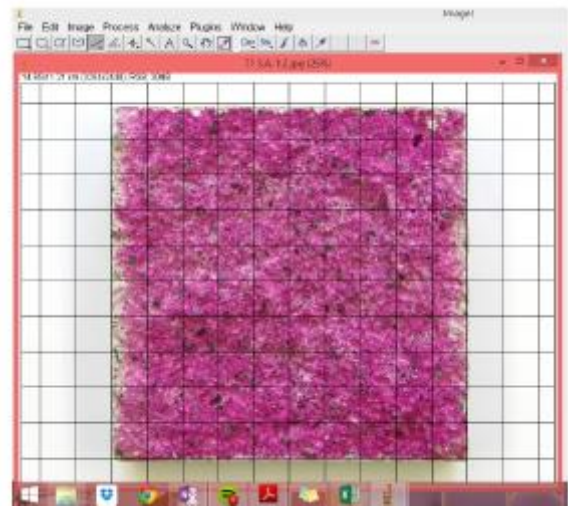


Figura 6: Ferramenta Grid
Fonte: Dilonardo et al., (2015).

A fotografia deve ser acompanhada de uma escala ou utensílio métrico (régua, paquímetro, etc), para que o valor mensurado seja representativo. Também é interessante manter a mesma distância focal para todas as imagens, pois, caso contrário, a cada nova análise a escala deverá ser ajustada.

Já a ferramenta Grid, que consiste em uma malha cujas dimensões são reguláveis e que se sobrepõe a imagem (Figura 6), facilita as medições definindo pontos e auxiliando o operador com as linhas verticais e horizontais. Com o método por imagem há um ganho na precisão das medidas em comparação com o método tradicional (DILONARDO et al.,2015).

2.3.2 Método por termogravimetria

A análise térmica é o conjunto de técnicas que têm como objetivo analisar as propriedades físicas e químicas de uma amostra em função da temperatura ou tempo. Dentre as técnicas mais utilizadas se destacam a Análise Termogravimétrica (TGA), a Termogravimétrica Derivativa (DTG) e a Análise Térmica Diferencial (DTA) (DENARI; CAVALHEIRO, 2012). Dentre as áreas de atuação da análise térmica destacam-se: a decomposição térmica; a determinação da umidade, resíduos, e voláteis e teor de cinzas; a cinética de reação de cura e cristalização; a oxidação térmica; o diagrama de fases; a determinação de calor específico; a determinação de

fusão; a transição vítrea; o tempo de armazenamento; dentre outros (MOTHÉ; AZEVEDO, 2009).

A Análise Termogravimétrica (TGA) apresenta a variação de massa de uma amostra, em função do tempo ou da temperatura. Essa variação de massa pode ser resultante de uma transformação física, seja ela por sublimação, condensação ou evaporação, ou ainda por uma transformação química de degradação, oxidação ou decomposição (MOTHÉ; AZEVEDO, 2009). Em alguns casos a perda da massa de uma amostra em função do tempo ou temperatura pode corresponder ao CO₂ da reação que sai como gás (GARCIA et.al., 2010; NEVES JUNIOR et al., 2019).

O equipamento utilizado para o TGA é composto por uma termobalança que é um instrumento que permite a pesagem da amostra em função da temperatura, à medida que é resfriada ou aquecida. O equipamento pode mudar de configuração de um fabricante para o outro, mas os fundamentos são iguais (DENARI; CAVALHEIRO, 2012). As curvas oriundas das termobalanças permitem tirar conclusões sobre a estabilidade térmica e compostos da amostra, dos compostos intermediários e dos resíduos. As termobalanças modernas são compostas basicamente por suporte da amostra, forno com programador de temperatura e controlador de atmosfera e balança registradora com sensor de temperatura (IONASHIRO, 2004).

As técnicas analíticas como a termogravimetria e termogravimetria derivativa (TG/DTG), podem ser ferramentas interessantes para auxiliar na determinação da quantidade de CO₂ capturado através da carbonatação (NEVES JUNIOR, 2014). Em materiais cimentícios, a liberação de CO₂ acontece em temperaturas acima de 600°C (SCRIVENER; SNELLINGS; LOTHENBACH, 2016). O uso conjunto da termogravimetria (TG) e a análise térmica diferencial (DTA) permite um estudo da carbonatação e absorção de CO₂ de amostras de materiais à base de cimento analisando a decomposição do carbonato de cálcio (GARCIA et.al., 2010; NEVES JUNIOR, 2014; NEVES JUNIOR et al., 2019).

Em materiais cimentícios a análise termogravimétrica geralmente é utilizada como técnicas complementares a outras técnicas como Fluorescência de Raios X (FRX) e Difrações de Raios X (DRX) que são utilizadas para identificar os componentes químicos e confirmar a presença de fases cristalinas e amorfas (SCRIVENER; SNELLINGS; LOTHENBACH, 2016). A Difração de Raio-X permite verificar o grau de carbonatação dos materiais (ELENI et al., 2014).

A Análise Termogravimétrica Derivativa (DTG) é utilizada para uma melhor visualização e avaliação das curvas de TG, pois elas registram automaticamente a derivada das curvas de TG, e no lugar da curva dos degraus são visualizados uma série de picos e a área destes picos é proporcional ao total de massa perdida pela amostra (MOTHÉ; AZEVEDO, 2009).

A faixa de temperatura é influenciada por diversos fatores sendo eles instrumentais, que variam dependendo da termobalança, como a taxa de aquecimento da amostra ou atmosfera em que a amostra é analisada e, ainda, fatores dependentes da amostra, como quantidade, tamanho das partículas e natureza da amostra (GARCIA et.al., 2010, IONASHIRO, 2004).

3 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

A construção civil não é apenas uma das maiores geradoras de resíduos, ela também consome cerca de 40% de todos os recursos naturais extraídos, sendo assim essencial intervir para incentivar práticas de construção mais sustentáveis (NENO; BRITO; VEIGA, 2014). Com a acelerada industrialização e urbanização, muitas regiões podem sofrer com o esgotamento dos recursos minerais e escassez de locais para a eliminação de resíduos (XUAN; POON, 2019).

No processo de fabricação de produtos (bens ou serviços), normalmente são gerados inúmeros resíduos que são depositados na natureza e ocasionam problemas ambientais. Para evitar que esses resíduos sejam descartados incorretamente é necessário criar tecnologias para seu reaproveitamento (GONÇALVES, 2001, NENO; BRITO; VEIGA, 2014).

Os resíduos da indústria da construção civil são oriundos das perdas de materiais nos canteiros de obras e materiais desperdiçados durante o processo de execução de um serviço, além das demolições e reformas (KOCHEM, 2016). Esses resíduos correspondem a 50% de todos os resíduos sólidos urbanos, (CONTRERAS et al 2016) sendo geralmente descartados em lugares impróprios ou dispostos em aterros e, às vezes, reciclados.

Os resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil no ano de 2017 foram de 60,6 milhões de toneladas, chegando a 166.000 toneladas/dia, com média de 347kg/dia/hab (SNIS, 2019). O volume de resíduos de construção e demolição coletados foi de 45 milhões de toneladas, cerca de 123.421 t/dia e 0,594 kg/hab/dia (ABRELPE, 2017). Estima-se que a geração de resíduos nas indústrias de construção chegará em 27 bilhões de toneladas por metro no ano de 2050 (SINGH e SINGH, 2016).

Os resíduos de construção e demolição da construção civil são os resíduos provenientes de construções, reparos, reformas, escavações e demolições de obras civis, podendo ser: solo, rocha, tijolo, concreto, colas, tintas, argamassas, telhas, etc. Segundo a resolução CONAMA (2002), os RCD são classificados em quatro classes (A, B, C e D). Os resíduos “Classe A”, constituídos basicamente por concreto, argamassas e materiais cerâmicos são passíveis de reciclagem para a produção de agregados reciclados. Estes podem ser empregados para diferentes finalidades na indústria da construção civil, desde pavimentação até produção de argamassas e

concretos não estruturais. Os resíduos “Classe B”, são os plásticos, papel/ papelão, vidro que são recicláveis para outras destinações. Os resíduos “Classe C” não possuem tecnologias de reciclagem/ recuperação (ex: gesso) e os “Classe D” são os resíduos perigosos, prejudiciais à saúde (ex: tintas, óleos, solventes).

Kochem (2016) fez a classificação dos RCD's da cidade de Cascavel no Estado do Paraná, e concluiu que a maior parte dos RCD's (86,4%) era composta por resíduos passíveis de reciclagem pertencentes à classe A. Destes, 36,6% eram compostos por argamassas, 33,3% de material cerâmico e 16,5% por concreto. Oliveira et al. (2011), determinaram a composição dos RCD's no Ceará e concluíram que a argamassa era o principal constituinte dos resíduos, seguido por resíduos de concreto e cerâmica vermelha, todos também pertencentes a Classe A, os quais apresentam grande potencial de reaproveitamento por meio da reciclagem, principalmente para confecção de agregados e artefatos para a construção civil.

Os resíduos de construção e demolição na grande maioria das vezes são formados por uma mistura de vários materiais de construção, geralmente argamassas, tijolos, concreto, cerâmica, areia, rocha, entre outros (LOVATO et al., 2012). Contudo, dependendo das características da matéria-prima de entrada na planta de produção, os agregados produzidos podem ser compostos predominantemente por algum tipo de material. Segundo Araújo (2014), os agregados cinza compostos predominantemente por resíduos de concretos, agregados e argamassas. Já os agregados vermelhos são compostos, principalmente por resíduos de alvenarias, tijolos e materiais cerâmicos. Por sua vez os agregados mistos são formados pela mescla dos resíduos citados.

No Brasil os resíduos mais utilizados como agregado reciclado para a produção de concretos e argamassas são os resíduos cerâmicos e mistos (ANDRADE et al., 2018), devido sua maior disponibilidade na maioria das plantas de processamento de agregados de RCD.

Segundo pesquisa da Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON, 2015), no Brasil existem aproximadamente 310 usinas de reciclagem de RCD. Todavia, apenas 21 % de todo o resíduo coletado no país é reciclado nestas centrais, ou seja, processado para a produção de agregados reciclados (brita, areia, rachão, etc.) para uso em construções. O restante (79 %) é geralmente depositado em aterros ou bota-foras. Segundo Contreras et al (2016), a fração fina (material com diâmetro menor que 4,8 mm), obtida no

processamento do RCD representa 40 % da massa total de RCD processado, a qual geralmente possui baixa demanda de utilização.

Um dos empregos para a fração fina do RCD pode ser a produção de argamassas. Kaliyavaradhan e Ling (2017) constataram que agregado fino à base de argila, concreto e restos de argamassas, provenientes de trituração, oferece excelente qualidade às argamassas de assentamento e revestimento de alvenaria. No estudo de Neno, Brito e Veiga (2014), analisou-se a viabilidade da utilização de agregado de concreto reciclado fino como substituição da areia natural para a produção de argamassas, com diversas proporções de substituição. Os autores constataram que as argamassas com RCD necessitam de mais água na mistura para alcançar a trabalhabilidade das argamassas convencionais devido à maior porosidade dos agregados reciclados.

Martínez et. al. (2015) analisaram a incorporação de frações finas de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição em argamassas de alvenaria à base de cimento, em teores de substituição de 50%, 75% e 100% para três tipos de agregados reciclados e os resultados do estudo sugerem a possibilidade de substituir 100% da areia natural pelo agregado reciclado.

Cabe destacar que a reciclagem dos RCD se tem mostrado uma importante aliada ao meio ambiente, pois resulta em redução de custos, preservação dos recursos naturais com a diminuição da matéria-prima virgem extraída, além da minimização dos problemas com gerenciamento de resíduos sólidos urbanos (KOCHEM, 2016). Além disso, recentemente tem-se discutido na literatura (ZHAO et al., 2015, KALIYAVARADHAN, LING, 2017, ANDRADE et al, 2018) que os agregados reciclados de RCD e os materiais que os utilizam em sua fabricação possuem maior potencial para a captura de CO₂⁴ devido ao processo de carbonatação em relação aos agregados naturais.

A maioria das estruturas de concreto antes de sua demolição não são totalmente carbonatadas durante sua vida útil. Quando essas estruturas são demolidas, os resíduos de construção e demolição decorrentes formam um novo ciclo de absorção de

⁴ Em junho de 2019, em *Marne la Vallée*, França, correrá o primeiro workshop internacional sobre captura e estocagem de CO₂ (*Internacional Workshop CO₂ Storage in concrete - CO2STO2019*), que reunirá especialistas na área de carbonatação de concreto e reciclagem de resíduos de construção e demolição (CDW) de todo o mundo. <http://co2sto2019.ifsttar.fr>.

dióxido de carbono, tendo em vista as superfícies recém-fraturadas e expostas ao CO₂ (LAGERBLAD, 2005). Como a carbonatação e, conseqüentemente a captura de CO₂ é função direta da área de superfície exposta a ação desse gás (POSSAN et al, 2017), no processo de reciclagem de concretos e argamassas a área superficial é elevada de maneira considerável. Neste alinhamento, Andrade e Sanjuán (2018) citam a importância da consideração da relação m²/m³ (superfície exposta a ação do CO₂/"volume de material empregado na produção do elemento) no estudo do balanço de emissões de materiais a base de cimento.

Para Kaliyavaradhan e Ling (2017) e Zhao et al. (2015), o tamanho das partículas influencia na taxa de carbonatação e absorção do CO₂. O uso de RCD aumenta a área específica exposta ao CO₂. Assim esses resíduos quando incorporados a novos materiais aumentam o valor agregado e a captura do CO₂ (Figura 7).

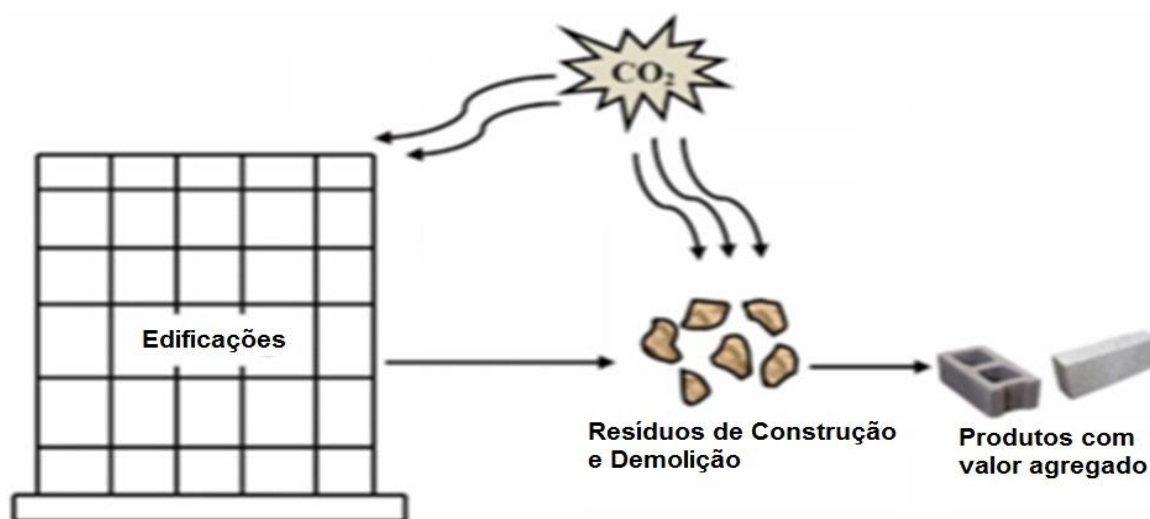


Figura 7: Potencialidade de captura de CO₂ do resíduo de construção e demolição
Fonte: Kaliyavaradhan e Ling (2017).

A substituição do agregado natural pelo resíduo de construção e demolição altera as propriedades físicas e mecânicas das argamassas, e ainda auxilia no aumento da profundidade de carbonatação e captura de CO₂ (ANDRADE et al., 2018). Ainda segundo os autores, o uso dos resíduos de construção e demolição como agregados finos em construções tem se demonstrado uma alternativa sustentável, visto que reduz a demanda de matéria-prima, reaproveita esses materiais que quando demolidos na maioria das vezes não são reutilizados e sim descartados em aterros e bota-foras.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A fim de determinar o potencial de captura de CO₂ de argamassas produzidas com e sem RCD o presente estudo será estruturado em oito etapas (ver Figura 8), a saber:

- Etapa 1: Projeto de experimento;
- Etapa 2: Seleção e caracterização dos materiais;
- Etapa 3: Caracterização das argamassas
- Etapa 4: Carbonatação das argamassas;
- Etapa 5: TG e DTG
- Etapa 6: Determinação das emissões referentes à produção das argamassas;
- Etapa 7: Determinação da captura de CO₂ devido à carbonatação;
- Etapa 8: Cálculo do balanço das emissões.

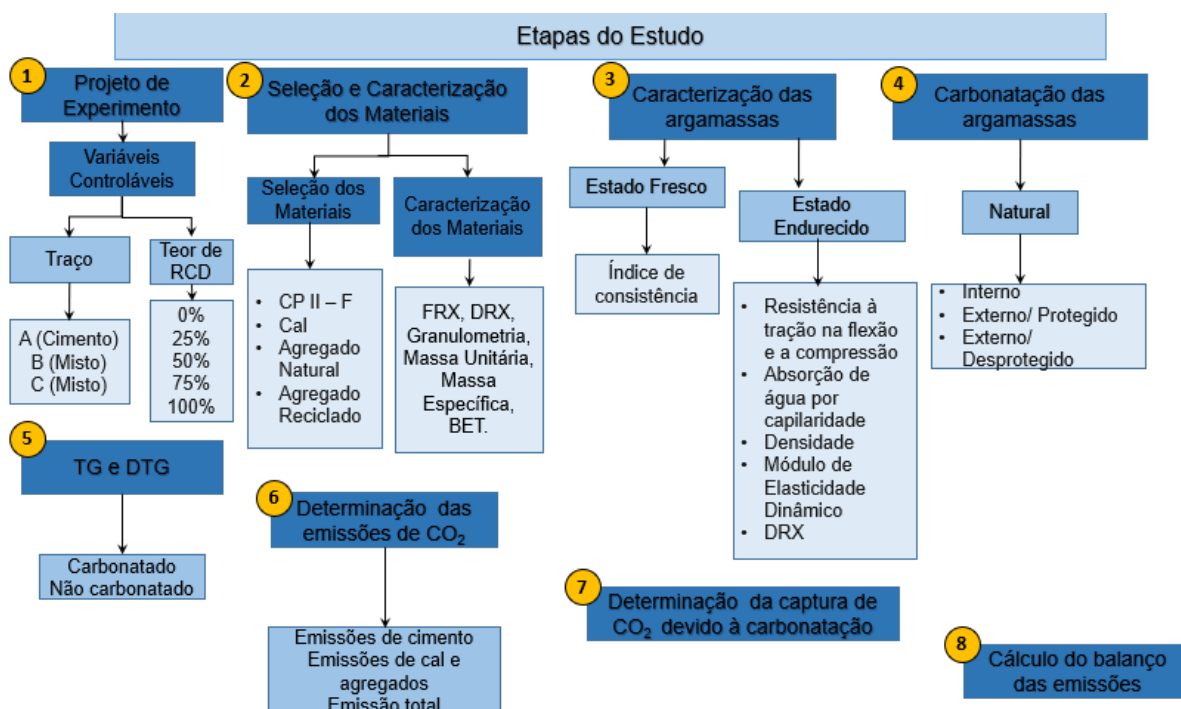


Figura 8: Etapas do Projeto
Fonte: Autoria própria (2019).

4.1 ETAPA 1 - PROJETO DE EXPERIMENTO

Nesta etapa, foi feita a definição do projeto experimental, sendo definidas as variáveis controláveis do estudo (traço e teor de substituição de areia natural por areia reciclada de RCD). Para tal foram definidos três diferentes traços de argamassas, sendo um apenas de cimento e dois mistos com cimento e cal. O traço de cimento foi nominado traço A (1:6 em massa), e os mistos traço B (1:1:6 em massa) e C (1:2:6 em massa). Para todos os traços foram avaliados cinco teores de substituição, em massa, de agregado natural por agregado reciclado de RCD (0, 25, 50, 75 e 100 %). As quantidades de material foram calculadas para cada traço considerando os teores de substituição em massa, totalizando 15 dosagens (Tabela 1).

Tabela 1: Proporção de materiais para produção de 1m³ de argamassa

Nomenclatura das misturas	Materiais (kg)					a/c	Índice de Consistência
	Cimento	Cal	Areia	RCD	Água		
A-0	266,0	0,0	1595,9	0,0	251,0	0,94	263
A-25	266,0	0,0	1196,9	399,0	260,0	0,98	263,7
A-50	266,0	0,0	797,9	797,9	295,2	1,11	267,43
A-75	266,0	0,0	399,0	1196,9	327,7	1,23	256,3
A-100	266,0	0,0	0,0	1595,9	360,4	1,35	269,9
B-0	225,0	225,0	1350,2	0,0	267,9	1,19	252,8
B-25	225,0	225,0	1012,6	337,5	300,5	1,34	253,3
B-50	225,0	225,0	675,1	675,1	318,5	1,42	251,6
B-75	225,0	225,0	337,5	1012,6	368,1	1,64	260
B-100	225,0	225,0	0,0	1350,2	391,0	1,74	255,6
C-0	190,0	380,0	1139,9	0,0	313,8	1,65	260
C-25	190,0	380,0	854,9	285,0	342,3	1,80	250
C-50	190,0	380,0	570,0	570,0	351,5	1,85	253
C-75	190,0	380,0	285,0	854,9	382,7	2,01	251,3
C-100	190,0	380,0	0,0	1139,9	411,8	2,17	250,3

Fonte: Autoria própria (2019).

Para determinar se o traço, teor de substituição de areia natural por areia reciclada, ambiente de exposição e idade possuem efeito significativo nas propriedades físicas,

mecânicas e profundidade de carbonatação das argamassas, conduziu-se a análise de variância (ANOVA). Para tal utilizou-se o software Statistica 8.0.

Por meio do teste F na ANOVA determinou se existem diferenças significativas entre os valores médios das propriedades. Se o p-valor do teste-F for menor que 0,05 a mudança no fator é considerada como significativa para um nível de confiança de 95% e não significativa se o p-valor for maior que 0,05.

4.2 ETAPA 2 - SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.2.1 Seleção dos materiais

Nesta pesquisa empregou-se como aglomerante o Cimento CP II – F⁵ 32, e a cal hidratada tipo III, devido a disponibilidade na região de estudo. Como agregado miúdo natural empregou-se areia quartzosa oriunda do rio Guairá, Paraná. Como agregado miúdo reciclado utilizou-se o agregado proveniente da trituração dos resíduos de construção e demolição Classe A, passante na peneira 4,8 mm, oriundo da empresa Future, da cidade de Cascavel, PR. O Agregado miúdo reciclado empregado (ver Figura 9) é composto por diversos materiais como cimento, argamassa, areia, tijolo, pedra, entre outros, sendo considerado do tipo misto.

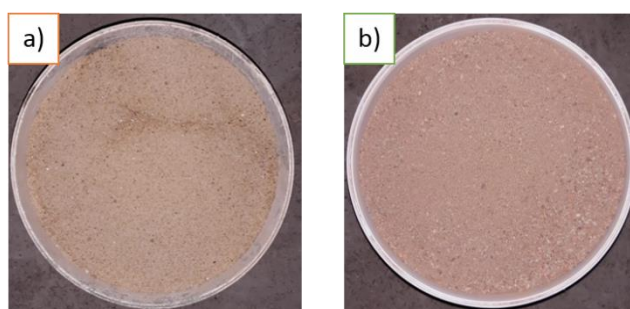


Figura 9: Agregados utilizados no preparo das argamassas: a) areia Natural b) areia reciclada de RCD
Fonte: Autoria própria (2019).

⁵ Em 03/07/2018 houve uma atualização da Norma Técnica do Cimento Requisitos ABNT 16697:2018, porém o cimento foi adquirido antes desta data e não se enquadra nestas mudanças.

4.2.2 Caracterização dos materiais

Os materiais do estudo foram caracterizados, conforme relação apresentada no Quadro 1, seguindo as normas vigentes para sua execução.

Ensaio	NBR's/ Procedimento	Areia natural	Areia Reciclada	Cimento	Cal
Massa específica	NBR 9776	X	X		
	NBR NM 23			X	X
Granulometria	NBR NM 248	X	X		
Granulometria a laser	-			X	X
Massa unitária	NBR NM 45	X	X		
	Mattana (2013)			X	X
FRX	-		X	X	X
Absorção	-	X	X		
DRX	-		X	X	X
BET	-			X	X

Fonte: Autoria própria (2019).

4.2.2.1 Massa específica

As análises de massa específica foram efetuadas seguindo os padrões da NBR 9776 (ABNT, 1987) para areia e RCD, com o uso do método de frasco de Chapman, e para o cimento e cal empregou-se o descrito na NBR 6474 NM 23 (ABNT, 2000), com o uso do frasco volumétrico de Le Chatelier. As análises foram realizadas no Laboratório de Tecnologia do Concreto da Itaipu Binacional (LTCl).

4.2.2.2 Granulometria

O ensaio de granulometria foi realizado por peneiramento mecânico para a areia e o RCD conforme o descrito na NBR NM 248 (ABNT, 2003), e executado no Laboratório de Tecnologia do Concreto da Itaipu Binacional (LTCl).

4.2.2.3 Massa unitária

A determinação da massa unitária para a areia natural e reciclada foi realizada conforme a NBR NM 45 (ABNT, 1991). Para a cal e o cimento a massa unitária foi determinada de acordo com o procedimento proposto por Mattana (2013), onde foi utilizado um funil com abertura de 1 cm e um recipiente cilíndrico de 400 cm³. Para a realização do ensaio o funil é posicionado de tal forma que a abertura fique a 8 cm da borda do cilindro, o que garante que o material, seja despejado no recipiente com uma altura e vazão de queda constantes (Figura 10).

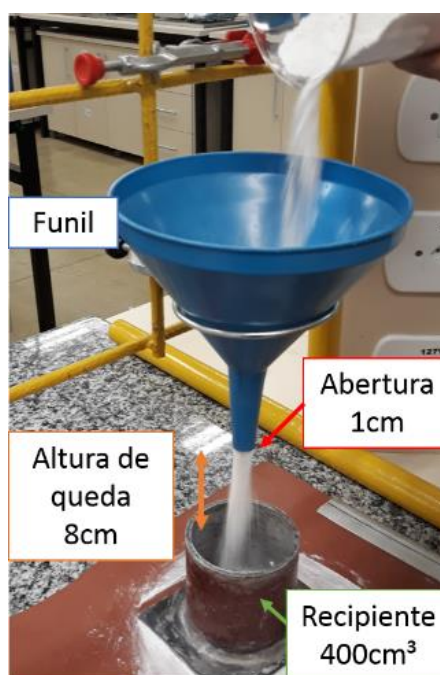


Figura 10: Ensaio de massa unitária da cal e do cimento
Fonte: Autoria própria (2019).

4.2.2.4 Espectrometria de fluorescência de raios-X - FRX

A Análise química semiquantitativa total por espectrometria de fluorescência de raios-X, em pastilha fundida foi conduzida no equipamento Espectrômetro PANalytical Axios Max, junto ao Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR) da

Universidade Federal do Paraná (UFPR.) Antes do ensaio fez-se a determinação da perda ao fogo (PF).

4.2.2.5 Área superficial BET e Granulometria a Laser

O ensaio de granulometria a laser e BET foram realizados no Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais (LADEMA) da Universidade Federal da Integração Latino Americana (UNILA). Para determinação da área superficial BET utilizou-se o analisador da marca da Quantachrome, modelo NOVA 3200 (Figura 11a). Conforme recomendação de Scrivener, Snellings e Lothenbach, (2016) a degaseificação da amostra de cimento e cal foi realizada a vácuo a temperatura de 40°C por três horas. Para o resíduo empregou-se temperatura de 80°C, uma vez que os compostos já se encontravam hidratados.

O ensaio de granulometria a laser foi conduzido no equipamento da marca Cilas, Modelo 1190 (Figura 11b), com faixa de leitura de 0,04 a 2,500 µm. As análises foram conduzidas no módulo líquido em triplicada empregando-se água como meio dispersante, com índice de obscuração de 10 a 20%. O modelo de análise utilizado para a cal foi o de Fraunhofer e para o cimento o modelo Mie.

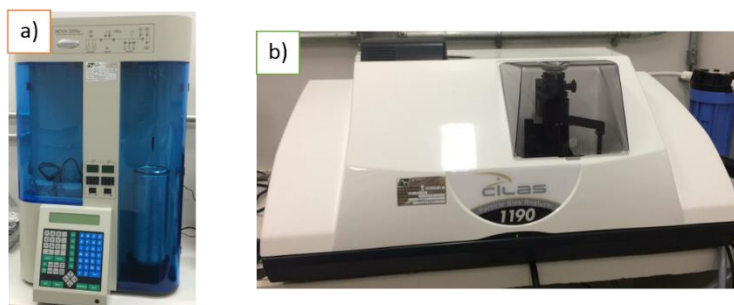


Figura 11: Equipamentos: a) BET e b) Granulometria a laser
Fonte: Autoria própria (2019).

4.3 ETAPA 3 – CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS

No estado fresco, fez-se a determinação do índice de consistência seguindo a NBR 13276 (ABNT, 2005), buscando-se o alvo de 260 mm \pm 20, o ensaio foi

realizado utilizando a mesa de queda livre (Figura 12) e a mistura das argamassas foi realizada com uma argamassadeira da marca Hobart com velocidade de 300 RPM.



Figura 12: Determinação do Índice de consistência
Fonte: Autoria própria (2019).

No estado endurecido foram conduzidos os seguintes ensaios:

- a) Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão – NBR 13.279 (ABNT,2005);
- b) Determinação da densidade de massa no estado endurecido – NBR 13.280 (ABNT. 2005);
- c) Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica (sem norma técnica);
- d) Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de Capilaridade - NBR 15.259 (ABNT, 2005);
- e) DRX - Difração de raio X;

Para o ensaio de absorção de água foram produzidos corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Para os demais ensaios corpos de provas prismáticos com dimensões de 160 mm de comprimento e com seção transversal de 40 x 40 mm (Figura 13). As amostras cilíndricas foram moldadas

conforme NBR 7215 (ABNT, 1996), e as prismáticas segundo a NBR 13279 (ABNT, 2005).

Nas argamassas mistas, houve a pré-mistura da areia, cal e metade da água em período de 24 horas para a maturação da cal, conforme a NBR 13276 (ABNT, 2005), para posterior mistura do cimento e o restante da água.

As argamassas permaneceram no molde por 24 horas, até ganharem resistência suficiente para serem desmoldadas. Os corpos de prova foram armazenados para processo de cura em ambiente de laboratório livre de umidade e mudanças bruscas de temperatura (Figura 14), e posteriormente eram conduzidos e para os ensaios físicos, mecânicos e de carbonatação.



Figura 13: Corpos de prova cilíndricos e prismáticos
Fonte: A autoria própria (2019).



Figura 14: Corpos de prova em período de cura
Fonte: A autoria própria (2019).

4.3.1 Resistência à tração na flexão

Para o ensaio de resistência à tração na flexão seguiu-se os procedimentos da NBR 13279 (ABNT, 2005), para cada mistura foram utilizados três corpos de prova prismáticos, com dimensões de 40 mm x 40 mm x 160 mm, com idades de 28 e 63 dias. O ensaio foi realizado no Laboratório de Tecnologia do Concreto da Itaipu Binacional, com o uso de uma prensa hidráulica com acionamento elétrico e leitor digital, de marca Time com capacidade de ensaios até 1000 KN. Os corpos de prova foram posicionados horizontalmente no dispositivo de apoio da prensa de modo que

a face rasada não ficasse em contato nem com os dispositivos de apoio e nem com o dispositivo da carga.

4.3.2 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado seguindo a NBR 13279 (ABNT, 2005). Para cada mistura foram utilizados os seis pedaços oriundos dos três corpos de prova do ensaio de resistência à flexão. O ensaio foi realizado com 28 e 63 dias, nas dependências do Laboratório de Tecnologia do Concreto da Itaipu Binacional, utilizando a mesma prensa hidráulica do ensaio de tração na flexão. Os corpos de prova foram posicionados horizontalmente sobre os dispositivos de apoio da prensa hidráulica, de modo, que a parte rasada não ficasse em contato com o dispositivo de carga e nem o dispositivo de apoio.

4.3.3 Densidade de massa endurecida

O ensaio da densidade seguiu as determinações da NBR 13280 (ABNT, 2005), decorrente da média da relação entre massa e volume de três corpos de provas prismáticos, com idade de 28 dias. As medidas de largura, altura e comprimento foram efetuadas em duas posições, com o auxílio de um paquímetro digital. Com uma balança de precisão de 0,1 g foi quantificado o peso de cada corpo de prova.

4.3.4 Módulo de Elasticidade dinâmico

O Módulo de Elasticidade dinâmico foi realizado Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais (LADEMA) da Unila, com o auxílio de um equipamento da ATCP Engenharia Física e do software Sonelastic 3.0. Foi utilizado o suporte de amostras do modelo AS-BC, usando um pulsador automático IED (Figura 15), e uma balança

digital de marca Explorer, com precisão de 0,1 g, utilizada para determinar o peso de cada corpo de prova.

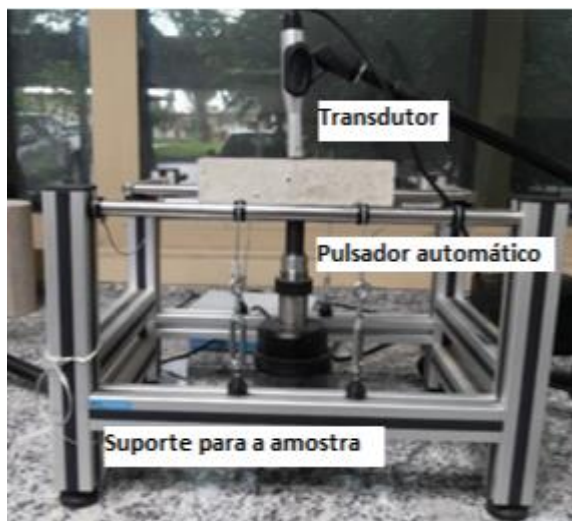


Figura 15: Suporte para amostra e Pulsador automático
Fonte: Autoria própria (2019).



Figura 16: Software Sonelastic 3.0
Fonte: Autoria própria (2019).

O ensaio tem como objetivo avaliar o comportamento elástico das argamassas e fornecer informações a respeito da sua deformabilidade e rigidez, propriedades que estão diretamente ligadas aos fenômenos patológicos, como as fissuras.

No ensaio foram utilizados três corpos de prova prismáticos com dimensões de 40 mm x 40 mm x 160 mm, com idade de 28 dias. A determinação do módulo é de forma direta através do software Sonelastic 3.0 (Figura 16).

A técnica utilizada foi de excitação por impulso (TEI), no qual um corpo de prova sofre um impacto de curta duração e começa a vibrar de acordo com suas frequências naturais de vibração. Com auxílio de um transdutor o equipamento capta a resposta acústica e a frequência de ressonância. A partir destes dados e das características do corpo de prova (dimensões, forma e massa) utiliza-se o software Sonelastic para calcular o módulo de elasticidade dinâmico (COSSOLINO e PEREIRA, 2010).

4.3.5 Absorção de Água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado nas dependências do Laboratório de Tecnologia do Concreto da Itaipu Binacional, seguindo a NBR 9779 (ABNT, 1995), foram ensaiados três corpos de prova para cada mistura sendo eles de molde cilíndrico com dimensões de 50 mm x 100 mm e com idades de 28 dias.

Os corpos de prova foram secos em estufa até atingirem constância de massa (Figura 17), então se fez a medição da massa no estado seco. Os intervalos de tempo para leitura das massas foram reduzidos em comparação com a norma, como as argamassas são mais porosas que o concreto as leituras foram feitas em intervalos menores segundo recomendações de Casali, Gava e Prudêncio (2006), sendo realizadas aos 15 min, 30min, 45 min, 1h, 1h e 30 min, 2 h, 3h e 24 horas, com o auxílio de uma balança de precisão de 0,1g (Figura 18).



Figura 17: Secagem em estufa
Fonte: Autoria própria (2019).



Figura 18: Pesagem
Fonte: Autoria própria (2019).

4.3.6 Difração de raio X – DRX

A análise de difração de raios-X (DRX) foi realizada no Laboratório Interdisciplinar de Ciências Físicas da Unila. Para tal, empregou-se o Difratômetro de marca Panalytical modelo Empyrean (Figura 19), radiação $\text{CuK}\alpha$, $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$, entre 10°

e 80° de 2θ . A interpretação do espectro foi realizada por meio de comparação com padrões do banco de dados COD (Crystallography Open Database).⁶



Figura 19: Difratômetro
Fonte: Autoria própria (2019).

Para as análises das argamassas foram utilizadas amostras extraídas de três regiões do corpo de prova, sendo da região carbonatada, semicarbonatada e não carbonatada. Este material foi identificado e inserido em pequenos porta amostras, que foram fechados e mantidos em laboratório até a condução das análises. Antes do início do ensaio, as amostras foram trituradas com auxílio de um almofariz e pistilo cerâmicos (Figura 20), sendo então inseridas no porta amostras do equipamento (Figura 21).

As amostras coletadas foram analisadas em temperatura ambiente e após serem submetidas a queima em temperaturas de 350°C e 800°C , para verificar a decomposição dos hidróxidos e carbonatos. Para a queima, as amostras foram dispostas em uma mufla com controle de temperatura em cadinho de porcelana (Figura 22 e 23), com taxa de aquecimento de $10^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$.

⁶ <http://www.crystallography.net>



Figura 20: Moagem da amostra para DRX
Fonte: Aatoria própria (2019).



Figura 21: Porta amostra utilizado
Fonte: Aatoria própria (2019).



Figura 22: Amostras em cadinho de porcelana
Fonte: Aatoria própria (2019).



Figura 23: Amostras dispostas na Mufla
Fonte: Aatoria própria (2019).

Além das argamassas também se fez a caracterização mineralógica dos materiais empregados na produção das mesmas (Cimento Portland, cal hidratada, areia natural e areia reciclada de RCD), apenas para a temperatura ambiente.

Todas as análises conduzidas no Difratorômetro (argamassas e materiais) foram realizadas por spin, com tempo médio de leitura de 30 minutos por amostra.

4.4 ETAPA 4 - CARBONATAÇÃO DAS ARGAMASSAS

Para o ensaio de carbonatação natural foram utilizados os corpos de prova prismáticos com dimensões de 40 mm x 40 mm x 160 mm. Duas amostras por traço foram inseridas em cada um dos três ambientes de exposição: a) externo desprotegido da chuva; b) externo protegido da chuva; e, c) ambiente laboratorial (Figura 24).

A fim de simular a condição de cura de um revestimento argamassado convencional, logo após a desmoldagem as amostras foram submetidas aos ambientes de exposição.

A profundidade de carbonatação foi medida nas idades de 28, 63, 96, 148 e 266 dias, para todos os ambientes, em superfície fraturada do corpo de prova, após aplicação de solução contendo 1% de fenolftaleína dissolvida em álcool etílico a 70% e água destilada a 30%. No procedimento, os corpos de prova foram fraturados em fatias de aproximadamente 2,5 cm com o auxílio de uma prensa hidráulica, sendo aplicada solução de fenolftaleína sobre a superfície recém fraturada da amostra. Após alguns minutos foram realizadas as medições da profundidade de carbonatação com o auxílio de um paquímetro digital, nos quatro lados de cada amostra (para dois exemplares de cada ambiente). O valor médio foi então calculado. Este procedimento foi realizado para todos os níveis de substituição de agregado reciclado e os três traços estudados.

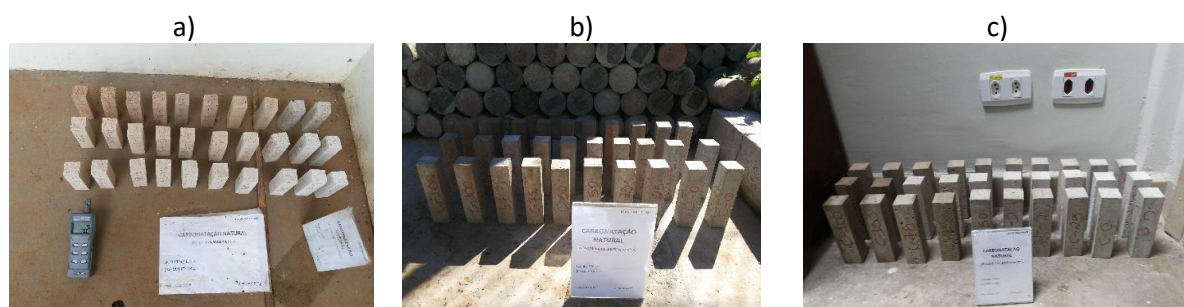


Figura 24: Exposição das amostras em ambiente a) externo protegido da chuva b) externo desprotegido da chuva c) laboratório
Fonte: Autoria própria (2019).

4.5 ETAPA 5 - TG e DTG

A análise termogravimétrica (ATG) e a termogravimetria derivada (DTG) foram realizadas no Laboratório de Análises Térmicas e Espectrometria de Combustíveis e Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Medianeira. Para tal, empregou-se o equipamento de análise térmica simultânea (STA) marca Perckin Elmer modelo STA 6.000 (Figura 25), em cadinho aberto de platina, sob atmosfera de nitrogênio, com fluxo de 20 mL.min⁻¹ e taxa de aquecimento do forno de 20°C.min⁻¹, para o intervalo de temperatura entre 90°C a 850°C. Para retirada da umidade as amostras foram pré-aquecidas dentro do equipamento à temperatura de 120°C, por 5 minutos.

Para o estudo da carbonatação das argamassas, a coleta das amostras ocorreu na idade de 96 dias, as quais foram retiradas dos corpos de prova prismáticos de 40 mm x 40 mm x 160 mm fraturados para o ensaio de carbonatação. Extraiu-se uma pequena parcela de amostra da região carbonatada e outra da região não carbonatada. As amostras coletadas foram inseridas em pequenos porta amostras identificados, que foram fechados e mantidos em laboratório até a realização das análises (Figura 26). As amostras foram coletadas antes da aplicação do indicador químico, tomando-se como referência para coleta nas regiões carbonatadas e não carbonatadas o resultado obtido no segundo corpo de prova da duplicata.



Figura 25: Equipamento de análise térmica
Fonte: Autoria própria (2019).



Figura 26: Pó guardado em porta amostras
Fonte: Autoria própria (2019).

Uma amostra de aproximadamente 10 mg foi coletada para cada análise de TG/DTG. Tomou-se cuidado na coleta e armazenagem das amostras com o contato com a atmosfera, a fim de evitar a reação de carbonatação.

Também foram realizadas análises térmicas para os materiais empregados na dosagem das argamassas (cimento, cal hidratada e areia reciclada de RCD), submetidas as mesmas condições de ensaio que as amostras de argamassas.

4.6 ETAPA 6 - DETERMINAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂ REFERENTE A PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS

Nesta etapa são consideradas as emissões na produção do cimento, cal (caso haja), agregado natural e reciclado.

4.6.1 Emissões de cimento

As emissões para a produção do cimento são oriundas do processo de produção do clínquer (descarbonatação e aquecimento de fornos) e da geração de energia elétrica. Para quantificar as emissões da produção do cimento (E_{cim}) utiliza-se a Equação (3).

$$E_{cim} = E_{clinker} \times \%C_{cim} + E_{energ} \times FE \quad \text{Equação (3)}$$

No qual:

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

$E_{clinker}$ = Emissão do clínquer, em kgCO₂/t;

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

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

FE = Fator de emissão da energia elétrica, em KgCO₂/kWh.

Os valores da emissão para a produção do clínquer e da emissão por energia elétrica foram obtidos no GNR Projetc do Brasil (WBCDS, 2019), sendo 866 kgCO₂/t e 109 kWh/t, respectivamente. A porcentagem de clínquer obtida no cimento empregado no estudo⁷ (CP II F – 32) varia de 90– 94%, segundo a NBR 11578 (1991). O fator de emissão da energia elétrica utilizado foi de 0,08 KgCO₂/kWh, disponibilizado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicação (MCTIC, 2016).

4.6.2 Emissões de cal

Para a estimativa das emissões decorrentes da produção da cal são usados valores encontrados por John, Punhagui e Cincotto (2014), esses valores foram obtidos por meio de dados levantados das emissões pela descarbonatação do calcário e quantidade de cal produzida e resultaram em emissões de 466 e 766 kgCO₂/t. neste estudo foram utilizados a emissão mínima (466), média (616) e máxima (766).

4.6.3 Emissões de agregado natural e reciclado

Para a estimativa das emissões decorrentes da produção dos agregados naturais são usados indicadores encontrados por Moraes e Punhagui (s/d)⁸, que em sua pesquisa compilaram diversos trabalhos que estimam a quantidade de CO₂ emitido para a produção de diferentes materiais de construção. Segundo as pesquisas a emissão para a fabricação da areia natural pode variar de 4 a 86 kgCO₂/t, e o valor adotado pelos autores foi de 15 kgCO₂/t, que corresponde a mediana.

Para o agregado reciclado não foram encontradas estimativas de emissão na literatura, então se assumiu que ela se assemelha com a da produção da brita, que

⁷ Ver nota de rodapé nº5.

⁸ Dados compilados pelos autores no projeto de pesquisa PID1386-2018, cadastrado na PRPPG/Unila.

segundo Moraes e Punhagui (s/d)⁸ pode variar de 9 a 86 kgCO₂/t. Tendo em vista a variação dos resultados neste estudo adotou-se a mediana de 9 kgCO₂/t.

4.6.4 Emissões totais para revestimentos argamassados

A emissão total para o revestimento argamassado é dada pela Equação (4), onde as emissões são multiplicadas pelo consumo de cada material.

$$E_{argm} = E_{cim} \times Q_{cim} + E_{areia} \times Q_{areia} + E_{RCD} \times Q_{RCD} + E_{cal} \times Q_{cal} \quad \text{Equação (4)}$$

No qual,

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

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

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

Q_{areia} = consumo de areia para produzir um m³, em kg.

4.7 ETAPA 7 - DETERMINAÇÃO DA CAPTURA DE CO₂ DEVIDO À CARBONATAÇÃO

4.7.1 Estimativa empregando a profundidade carbonatada

Para a estimativa da captura com base na profundidade de carbonatação é necessário determinar a quantidade de alvenaria (m²) que pode ser revestida com 1 m³ de argamassa. Como as argamassas produzidas neste trabalho podem ser utilizadas para revestir tanto paredes internas como externas, foram feitas simulações para espessuras de 10, 20, 30, 40 e 50 mm, porém utilizou-se como base a espessura de 20 mm, como mostra a Figura 27.

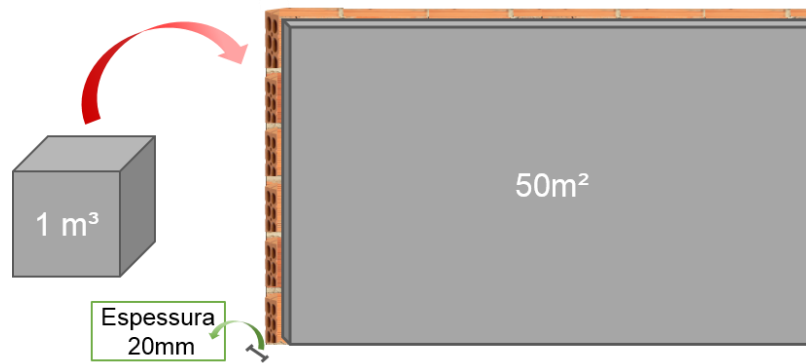


Figura 27. Relação entre 1 m³ de argamassa e sua área aplicável considerando espessura média de 20 mm

Fonte: Aatoria própria (2019).

A quantidade de CO₂ que os revestimentos argamassados são capazes de retirar do meio ambiente é determinada pela Equação 5 adaptada da normativa BRE EM 15804 (2014):

$$Cap_{CO_2} = e_c \times (CaO_{cim} \times Q_{cim} \times \%C_{cim} \times \%CaO_{cim} + CaO_{ag} \times Q_{ag} \times \%CaO_{ag} + CaO_{cal} \times Q_{cal} \times \% CaO_{cal}) \times A \times M \quad \text{(Equação 5)}$$

Onde:

e_c = profundidade de carbonatação, obtida a partir dos dados experimentais (mm)

Q_{cim} = teor de cimento em 1 m³ (kg)

Q_{ag} = conteúdo agregado reciclado em 1 m³ (kg)

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

CaO_{cim} = quantidade de óxido de cálcio contido no cimento (60,3%)

CaO_{ag} = quantidade de óxido de cálcio contido nos agregados reciclados (8,2%)

CaO_{cal} = quantidade de óxido de cálcio contido na cal (41,5%)

$\% CaO_{cim}$ = proporção de CaO que é totalmente carbonatada para o teor total de CaO no cimento, isto é, é transformada em CaCO₃ (Segundo literatura 75%).

$\% CaO_{ag}$ = proporção de CaO totalmente carbonatada para o teor total de CaO no agregado reciclado, isto é, é transformada em CaCO₃ (Segundo literatura 35%).

$\% CaO_{cal}$ = proporção de CaO totalmente carbonatada para o teor total de CaO na cal, isto é, é transformada em CaCO₃ (Segundo literatura 60%, 80% e 100%).

$\% C_{cim}$ = porcentagens de clínquer contido no cimento (%) (A porcentagem de clínquer obtida no cimento em estudo (CP II F – 32), varia de 90– 94%, segundo a NBR 11578 (1991).

M = fração molar química CO₂ / CaO (0,786), referente a estequiometria da química.
A = área da seção transversal exposta ao CO₂ (m²).

O valor da profundidade de carbonatação (*ec*) que deve ser utilizado é o obtido no item 5.2.3, os valores de *Q_{cem}*, *Q_{ag}* e *Q_{cal}* correspondem às quantidades de cimento, RCD e cal utilizada na fabricação das argamassas, representados na Tabela 1. A quantidade de óxido de cálcio contida no cimento (*CaO_{cim}*), na cal (*CaO_{cal}*) e no agregado reciclado (*CaO_{ag}*) é obtida por meio do FRX (item 5.1.3). A razão de CaO totalmente carbonatada dos materiais foi obtida por meio da literatura, para o cimento (% *CaO_{cim}*) foram utilizados o valor de 75% (ANDRADE, et al.,2018), para a cal (% *CaO_{cal}*) valores mínimo de 60%, médio 80% e máximo 100% (STANMORE e GILLOT, 2005) e para os agregado reciclado (% *CaO_{ag}*) o valor equivale a 35% (YOU, et al., 2011).

4.7.2 Estimativa empregando análise térmica

Para a estimativa da captura de CO₂ por análise térmica é necessário encontrar a perda de massa de cada pico de decomposição do gráfico da derivada (DTG) conforme Equação 6.

$$PMp = \frac{Ap \times PMt}{At} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde,

PMp: Perda de massa do pico em análise (%);

Ap: Área do pico (encontrada pela DTG, com o auxílio do programa Origin 8)

At: Área total da amostra (somatório dos Ap, Ex: Ap₁+ Ap₂ +...+ Ap_n)

PMt: Perda de massa total da amostra (obtida no gráfico de TG)

A perda de massa encontrada para cada pico corresponde aos compostos degradados àquela temperatura. Para os casos em estudo, nos picos de decomposição dos hidróxidos a perda de massa corresponde à liberação de água e

na decomposição dos carbonatos a perda de massa representa o CO₂ liberado na reação.

A quantidade de carbonatos e hidróxidos de cada amostra é obtida por meio da estequiometria das reações, empregando regra de três simples (Equação 7):

$$\%Material = \frac{PMp}{100} \times \frac{MM\ material}{MM\ CO_2\ ou\ H_2O} \quad \text{(Equação 7)}$$

Onde,

%Material: Quantidade de carbonatos e hidróxidos (%);

PMp: Perda de massa do pico (%);

MM material: Massa molar do material decomposto (hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio, carbonato de cálcio ou carbonato de magnésio);

MM CO₂ ou H₂O: Massa molar da água (para os hidróxidos), ou do CO₂ (para os carbonatos).

4.8 ETAPA 8 - CÁLCULO DO BALANÇO DAS EMISSÕES

O balanço de CO₂ das argamassas de revestimento é obtido pela diferença entre o total de CO₂ emitido para a produção das argamassas (item 4.6.4) e a quantidade de CO₂ absorvida ao longo do tempo (item 4.7), conforme a Equação 8:

$$B_{CO_2} = E_{argm} - Cap_{CO_2} \quad \text{Equação (8)}$$

Onde:

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

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

Cap_{CO₂} = captura de CO₂ ao longo do ciclo de vida, em kg.

O balanço de CO₂ também pode ser expresso em porcentagem de CO₂ absorvido com relação ao emitido no processo de produção (Equação.9).

$$Captura_{CO_2}(\%) = \left(\frac{Cap_{CO_2}}{E_{argm}} \right) \times 100 \quad \text{Equação (9)}$$

5 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios de caracterização dos materiais e das argamassas no estado fresco e endurecido. Na sequência são apresentados os resultados da captura de CO₂, com base na profundidade de carbonatação das argamassas, análise térmica e análise mineralógica. Por fim, apresenta-se o balanço das emissões para as argamassas produzidas.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

5.1.1 Propriedades físicas

Os resultados obtidos da massa específica e unitária dos materiais estão expressos na Tabela 2, os valores detalhados se encontram no Apêndice A. Observa-se que o RCD apresenta menor massa específica e unitária que a areia natural. Tal fato deve-se, conforme literatura, (Cabral et al. 2009, Neno, Brito e Veiga, 2014, Angulo e Figueiredo, 2016) à sua maior porosidade.

Tabela 2: Resultados de massa específica e unitária

Massa (g/cm ³)	Areia Natural	RCD	Cimento	Cal
Massa específica	2,80	2,43	3,10	2,60
Massa unitária	1,65	1,25	1,14	0,62

Fonte: Autoria própria (2019).

A superfície específica BET do cimento Portland e da cal hidratada foi de 6,283 m²/g e 25,02 m²/g respectivamente. Observa-se que os materiais empregados apresentam elevada área superficial, o que pode aumentar a demanda da água para obtenção da consistência desejada.

Pela análise da granulometria a laser constatou-se que o Cimento Portland (Figura 28) e a cal hidratada (Figura 29) possuem partículas com diâmetro médio (v, 0,5) inferiores a 18,77 μm e 8,58 μm , respectivamente. Tais resultados corroboram com o resultado de BET, os quais indicaram que a cal possui maior área superficial, ou seja, possui partículas com maior finura que o cimento.

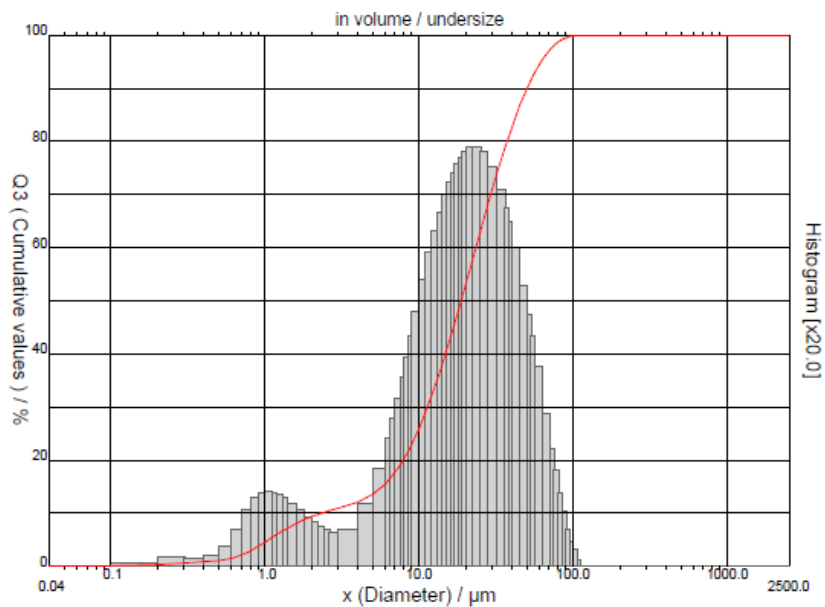


Figura 28: Curva granulométrica do cimento Portland CP II F- 32
Fonte: Autoria própria (2019).

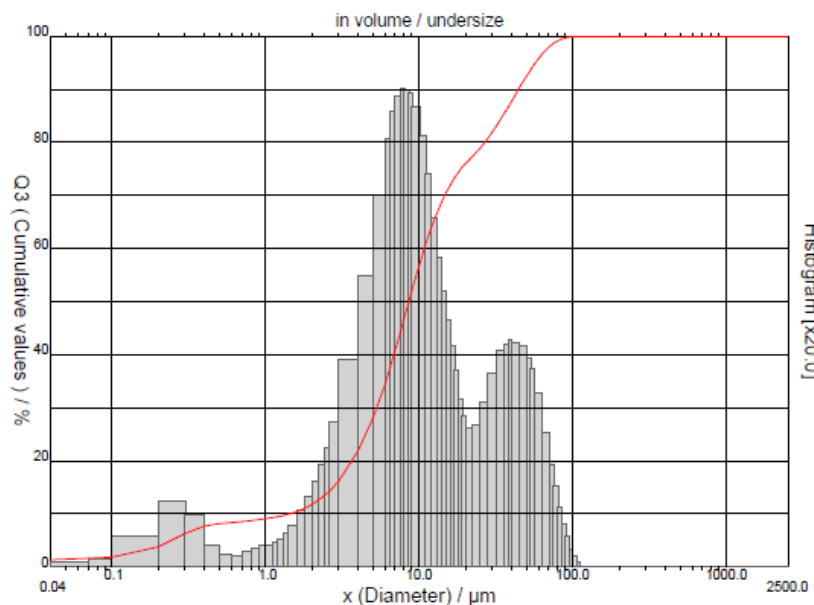


Figura 29: Curva granulométrica da Cal Hidratada
Fonte: Autoria própria (2019).

O cimento possui curva de frequência polimodal (dois picos), enquanto que para a cal hidratada a curva é trimodal (3 picos). A maior quantidade de partículas de cimento encontra-se distribuída no pico da direita, enquanto da cal no pico central.

Para a areia natural e reciclada, os resultados da composição granulométrica estão expressos na Tabela 3.

Tabela 3: Granulometria da areia natural e reciclada

Ensaio Granulometria						
Abertura peneira (mm)	Areia Natural			Areia Reciclada		
	Massa retida (g)	% Retida	% Retida acumulada	Massa retida (g)	% Retida	% Retida acumulada
4,75	2,3	0,46	0,46	0,515	0,103	0,103
2,36	13,33	2,666	3,126	49,73	9,946	10,049
1,2	41,47	8,294	11,42	62,05	12,41	22,459
0,6	111,515	22,303	33,723	86,41	17,282	39,741
0,3	166,87	33,374	67,097	141,09	28,218	67,959
0,15	136,19	27,238	94,335	103,46	20,692	88,651
0,075	23,14	4,628	98,963	31,04	6,208	94,859
Fundo	2,73	0,546	100	26,715	5,343	100

Fonte: Autoria própria (2019).

A curva granulométrica da areia natural e da areia reciclada (RCD) estão representadas na Figura 30. Na Tabela 4 encontram-se as demais características dos agregados.

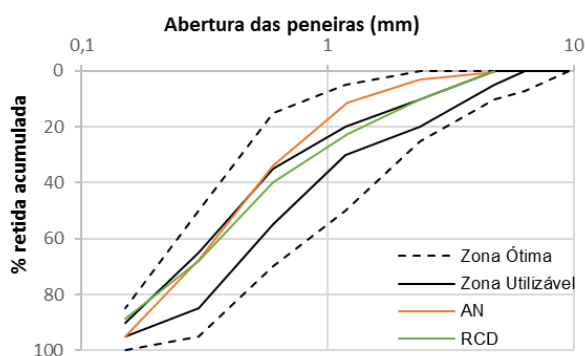


Tabela 4: Caracterização dos agregados

Característica	Natural	RCD
Teor de Material Pulverulento (%)	0,9	8,7
Dimensão máxima (mm)	2,36	4,75
Módulo de Finura (%)	2,11	2,29
Massa específica (g/cm ³)	2,80	2,43
Massa unitária (g/cm ³)	1,65	1,25
Absorção (%)	<2	7,4

Figura 30: Curva granulométrica da areia natural e RCD

Fonte: Autoria própria (2019).

Fonte: Autoria própria (2019).

Como no Brasil não há uma norma técnica para classificação de agregados para a produção de argamassas, utilizou-se as referências da norma de concreto NBR 7211 (ABNT, 2009).

5.1.2 FRX e DRX

Observa-se na Tabela 5 os resultados do FRX dos materiais, a cal possui em sua composição química grandes concentrações de óxido de cálcio (CaO), seguido de óxido de magnésio (MgO), podendo ser classificada como dolomítica/magnesiana. O cimento é composto basicamente por 60,3 % de óxido de cálcio, e o RCD por 66,6% de sílica (SiO₂).

Tabela 5: Resultados FRX

Compostos (%)	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	K ₂ O	SO ₃	Na ₂ O	P ₂ O ₅	MnO	ZrO ₂	SrO	P.F
RCD	66,6	8,2	5,8	5,7	2	1,1	0,5	0,3	0,3	0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	9,33
Cal	4,3	41,5	0,2	0,2	26,9		0,1							26,75
Cimento	16,4	60,3	3,9	3,3	5,7	0,3	1	2,4	0,3	0,1	0,1	0	0,2	6,01

Fonte: Autoria própria (2019).

No difratograma dos materiais (Figura 31), é possível visualizar que a areia natural é composta apenas por quartzo, o RCD por quartzo, carbonato de cálcio e Goethita, a cal é composta basicamente por hidróxido de cálcio e magnésio. O cimento é composto majoritariamente por silicatos tricálcicos (C₃S) e silicatos bicálcico (C₂S), contendo carbonato de cálcio, aluminato tricálcico e ferro aluminato tetracálcico.

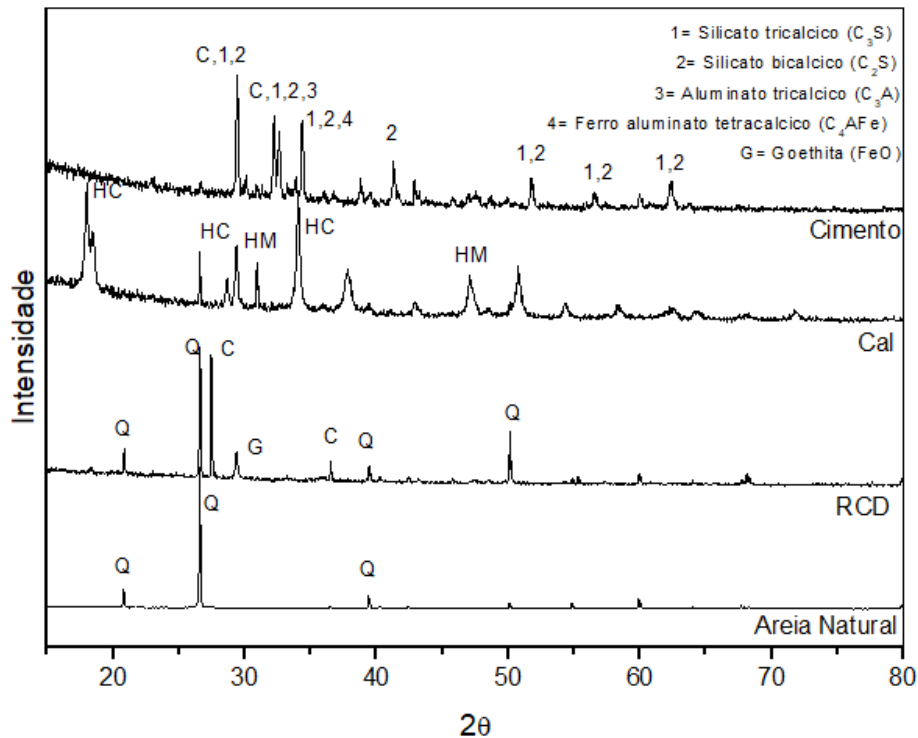


Figura 31: Difratoograma dos materiais
Fonte: Autoria própria (2019).

5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS

Para a caracterização das argamassas produzidas foram realizados os ensaios de densidade, absorção de água por capilaridade, resistência à compressão e à tração na flexão, módulo de elasticidade dinâmico. Também foi verificada a profundidade de carbonatação.

Para os resultados obtidos a análise de variância (ANOVA), para todas as variáveis de resposta em estudo indicou que todos os fatores isolados bem como as interações analisadas são significativos (ver tabela 6), para um nível de confiança de 95% (valor-p menor que 0,05).

As variáveis traço, % de RCD, idade e ambiente de exposição e suas interações tem influência estatisticamente significativa na profundidade de carbonatação das argamassas. Pela análise do teste F, a variável de maior influência na carbonatação foi a idade, seguida do ambiente de exposição, teor de RCD e, por último o traço.

Tabela 6: ANOVA para os parâmetros utilizados

Variável de resposta	Variável controlada	SS	DF	MS	F-test	p-valor
Densidade	% RCD	0,4039	4	0,1010	178,2	0,000000
	Traço	0,1928	2	0,0964	170,1	0,000000
	% RCD*Traço	0,0419	8	0,0052	9,2	0,000003
	Error	0,0170	30	0,0006		
Absorção de água	% RCD	365,05	4	91,26	3228,0	0,000000
	Traço	253,42	2	126,71	4481,9	0,000000
	% RCD*Traço	5,89	8	0,74	26,0	0,000000
	Error	0,85	30	0,03		
Resistência à compressão	% RCD	79,515	4	19,879	107,69	0,000000
	Traço	428,545	2	214,272	1160,83	0,000000
	Idade	33,699	1	33,699	182,57	0,000000
	% RCD*Traço	86,177	8	10,772	58,36	0,000000
	% RCD*Idade	2,547	4	0,637	3,45	0,013277
	Traço*Idade	10,178	2	5,089	27,57	0,000000
	Error	11,075	60	0,185		
Resistência à tração na Flexão	% RCD	2,7672	4	0,6918	18,37	0,000000
	Traço	29,6704	2	14,8352	393,87	0,000000
	Idade	3,6094	1	3,6094	95,83	0,000000
	% RCD*Traço	5,3543	8	0,6693	17,77	0,000000
	% RCD*Idade	0,1067	4	0,0267	0,71	0,049694
	Traço*Idade	0,7116	2	0,3558	9,45	0,000271
	Error	2,2599	60	0,0377		
Módulo de Elasticidade	% RCD	423,447	4	105,862	250,88	0,000000
	Traço	459,163	2	229,581	544,09	0,000000
	% RCD*Traço	181,058	8	22,632	53,64	0,000000
	Error	12,659	30	0,422		
Profundidade de carbonatação	% RCD	227,091	4	56,773	1277,7	0,000000
	Traço	103,103	2	51,551	1160,2	0,000000
	Ambiente	191,640	2	95,820	2156,5	0,000000
	Idade	763,765	2	381,882	8594,6	0,000000
	% RCD*Traço	72,476	8	9,059	203,9	0,000000
	% RCD*Ambiente	1,424	8	0,178	4,0	0,000272
	Traço*Ambiente	7,073	4	1,768	39,8	0,000000
	% RCD*Idade	18,828	8	2,353	53,0	0,000000
	Traço*Idade	35,552	4	8,888	200,0	0,000000
	Ambiente*Idade	7,418	4	1,854	41,7	0,000000
Error	5,998	135	0,044			

Nota: Propriedades = Variável de resposta ou variável dependente, SS = Soma dos quadrados, DF = graus de liberdade, MS = Quadrado médio.

* Fator com significância estatística.

Fonte: Autoria própria (2019).

Para as propriedades de resistência à compressão e à tração na flexão, as variáveis traço, teor de RCD e idade e suas interações, foram significativas. Para a densidade, absorção de água e módulo de elasticidade as variáveis traço e teor de RCD possuem influência estatisticamente significativa. Para estas variáveis, pela

análise do teste F, a influência do traço é maior do que do teor de RCD para quase todas as propriedades estudadas, exceto para a densidade.

Na sequência, os resultados de cada variável de resposta serão apresentados e discutidos em detalhe.

5.2.1 Avaliação das propriedades físicas

Como pode ser observado na Tabela 6, o teor de RCD e o traço possuem influência significativa sobre a densidade no estado endurecido das argamassas. Em relação à influência das variáveis controladas % de RCD e Traço sobre a variável resposta densidade (Figuras 32 e 33), nota-se que quanto maior a adição de RCD's menor a densidade. As argamassas com cal (traço B e traço C) possuem densidades menores que as argamassas de cimento (A).

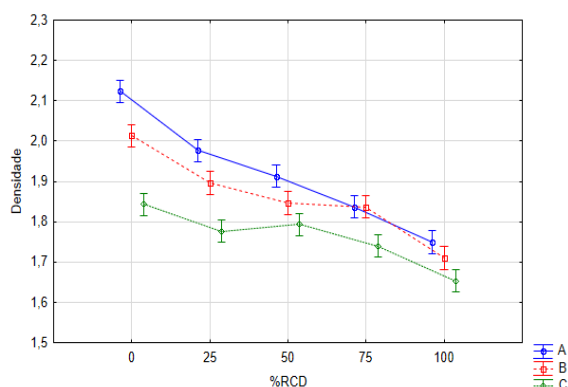


Figura 32: Influência do teor de RCD na variável resposta densidade
Fonte: Autoria própria (2019).

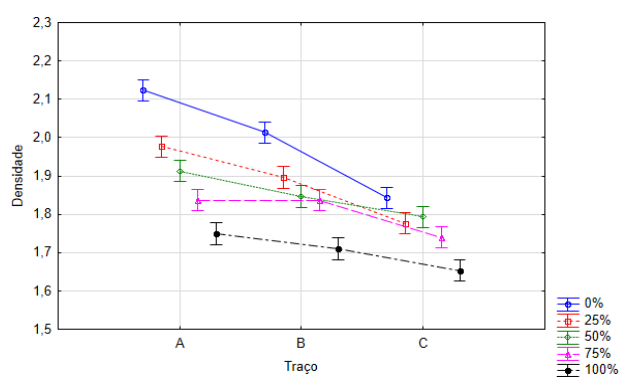


Figura 33: Influência do traço na variável resposta densidade
Fonte: Autoria própria (2019).

Segundo Neno, Brito e Veiga (2014) a adição de agregados reciclados na produção de argamassas pode reduzir sua densidade, pois as partículas dos RCD's possuem densidade inferior às do agregado natural. Zhao et al. (2015) também afirmam que a redução da densidade das argamassas com substituição de areia natural por reciclada acontece devido à menor densidade da areia reciclada. Andrade

et al. (2018) e Martínez et al. (2016) encontraram uma diminuição linear na densidade aparente das argamassas com taxa de substituição de RCD em comparação com as argamassas de areia natural.

Observa-se na Figura 34 que a redução da densidade das argamassas investigadas também possui tendência linear (com R^2 entre 0,8633 a 0,9787), reduzindo à medida que a areia natural é substituída pela reciclada. As argamassas fabricadas com 100% de RCD possuem densidade cerca de 17,92% menor em comparação com as argamassas fabricadas apenas com areia natural. Isso acontece devido à menor densidade dos grãos do agregado reciclado, o qual tem maior porosidade o que eleva também a demanda de água para alcance da consistência desejada.

Também nota-se uma pequena redução na densidade das argamassas com cal, em comparação com as de cimento, sendo até 13,21% inferiores. Segundo Silva e Campiteli (2006) as argamassas mistas apresentam densidade menor que as argamassas de cimento, pois em seu processo de fabricação é necessário maior quantidade de água para a maturação da cal. No endurecimento destas argamassas ocorre a perda desta água e com isso tem-se maior quantidade de vazios e, conseqüentemente, uma redução na densidade.

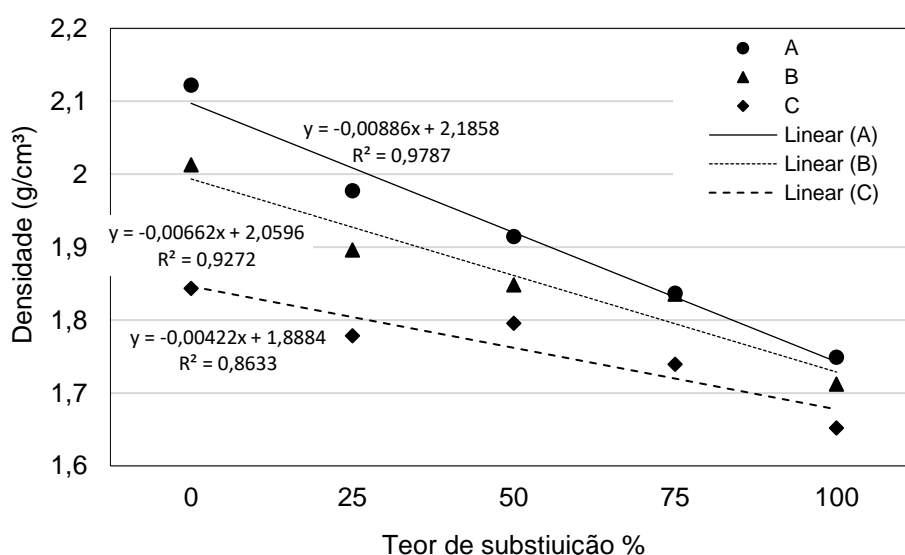


Figura 34: Densidade (g/cm³) em função do teor de substituição de RCD
Fonte: Autoria própria (2019).

Para a propriedade absorção de água por capilaridade as variáveis traço e teor de RCD, e as interações entre elas também foram significativas. Verificou-se que o aumento da adição de RCD e de cal eleva a absorção de água das argamassas (Figura 35 e 36).

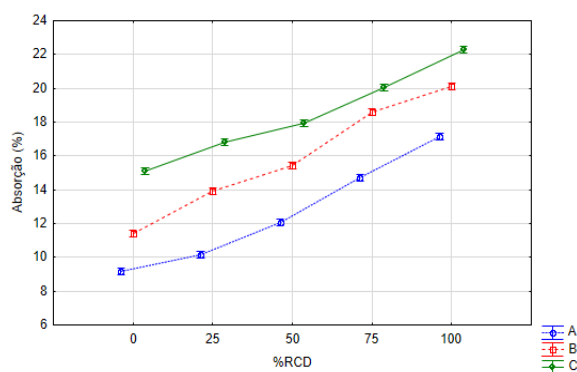


Figura 35: Influência do teor de RCD, na absorção de água por capilaridade
 Fonte: Autoria própria (2019).

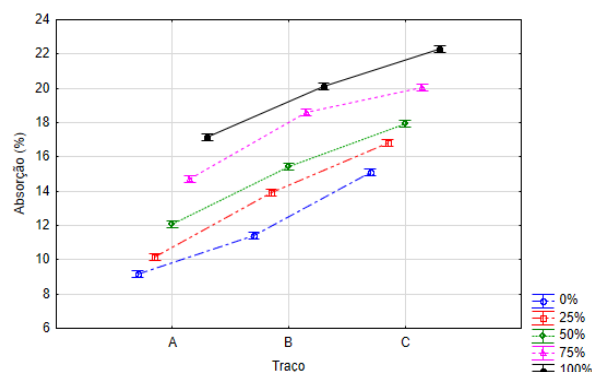


Figura 36: Influência do traço na absorção de água por capilaridade
 Fonte: Autoria própria (2019).

Cabral et al. (2009) e Neno, Brito e Veiga (2014) afirmam que agregados reciclados são mais porosos que os agregados naturais, e por esse motivo os materiais fabricados com estes agregados apresentam uma maior absorção de água. Angulo e Figueiredo (2016) comprovaram que em concretos com adição de RCD a porosidade total sempre é maior e, portanto, a absorção de água pode dobrar, saindo dos usuais 6-8% para 12-14%. Andrade et al. (2018) e Martínez et al. (2016) também concluíram que a substituição do agregado natural por RCD aumenta a absorção de água e a porosidade das argamassas, encontrando valores de absorção de água das argamassas com agregado cerâmico de 20,7% a 23,3% aos 28 dias.

De fato, os resultados obtidos no ensaio normatizado de absorção, a areia reciclada de RCD empregada no estudo possui absorção de água de 7,4%, enquanto que a areia natural tem valores de absorção abaixo de 2%, justificando uma maior absorção de água em algumas argamassas produzidas com esse material.

Nos traços com cal (B e C) acontece um aumento na absorção de água em relação à argamassa de cimento (traço A). Na Figura 37 é possível observar que as argamassas com traços B e C com 100% de RCD tiveram, respectivamente, uma

absorção cerca de 2,97% e 5,18% maior em relação às argamassas de cimento. Silva e Campiteli (2006) destacam que as argamassas com cal hidratada apresentam maiores coeficientes de capilaridade que as argamassas sem cal, o que eleva a absorção de água.

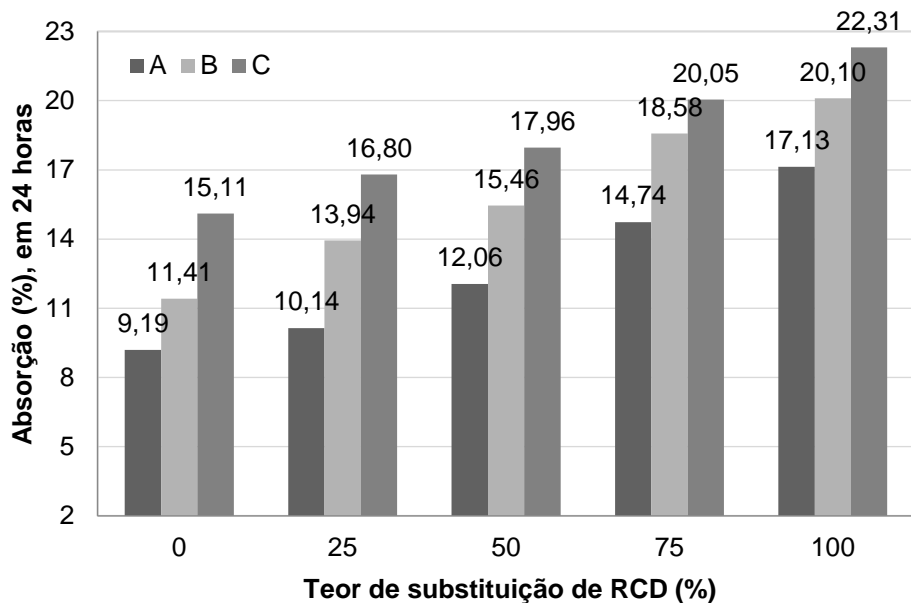


Figura 37: Absorção de Água Total em função do teor de substituição de RCD
Fonte: Autoria própria (2019).

Na Figura 38 é possível observar a absorção de água das argamassas em função do tempo de ensaio. Nota-se que nas argamassas com cal hidratada, a absorção de água inicial é maior em comparação com as argamassas de cimento.

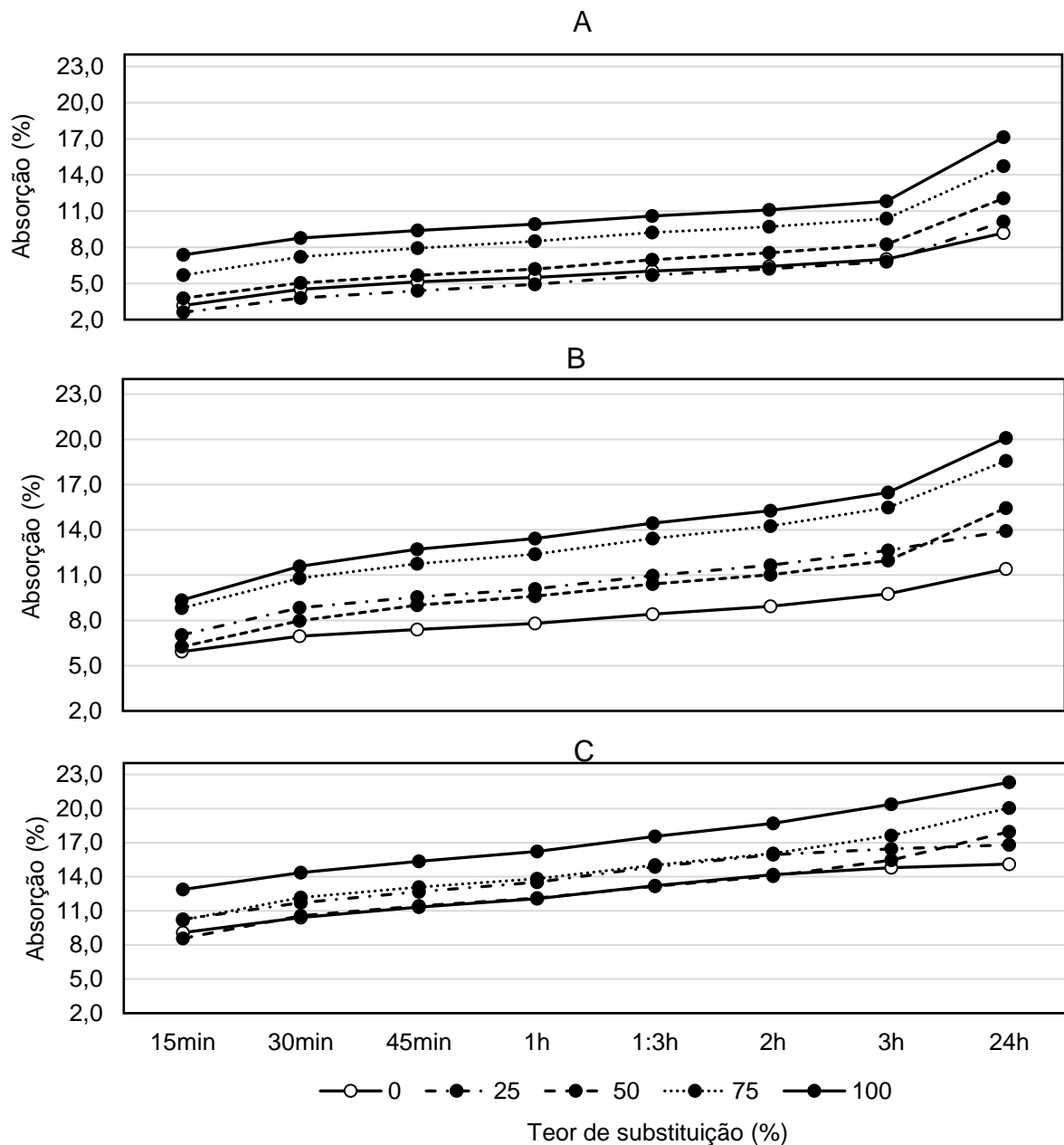


Figura 38: Absorção de água das argamassas em função do tempo de ensaio
 Fonte: Autoria própria (2019).

Nas Figuras 39a, 39b e 39c, é possível observar a relação entre densidade e absorção de água das argamassas, sendo que quanto maior o teor de substituição da areia natural por areia reciclada de RCD maior é absorção de água e menor a densidade. Nas argamassas com cal nota-se que a absorção de água por capilaridade é ainda maior e a densidade menor. No Apêndice A se encontram os valores detalhados da absorção de água e densidade.

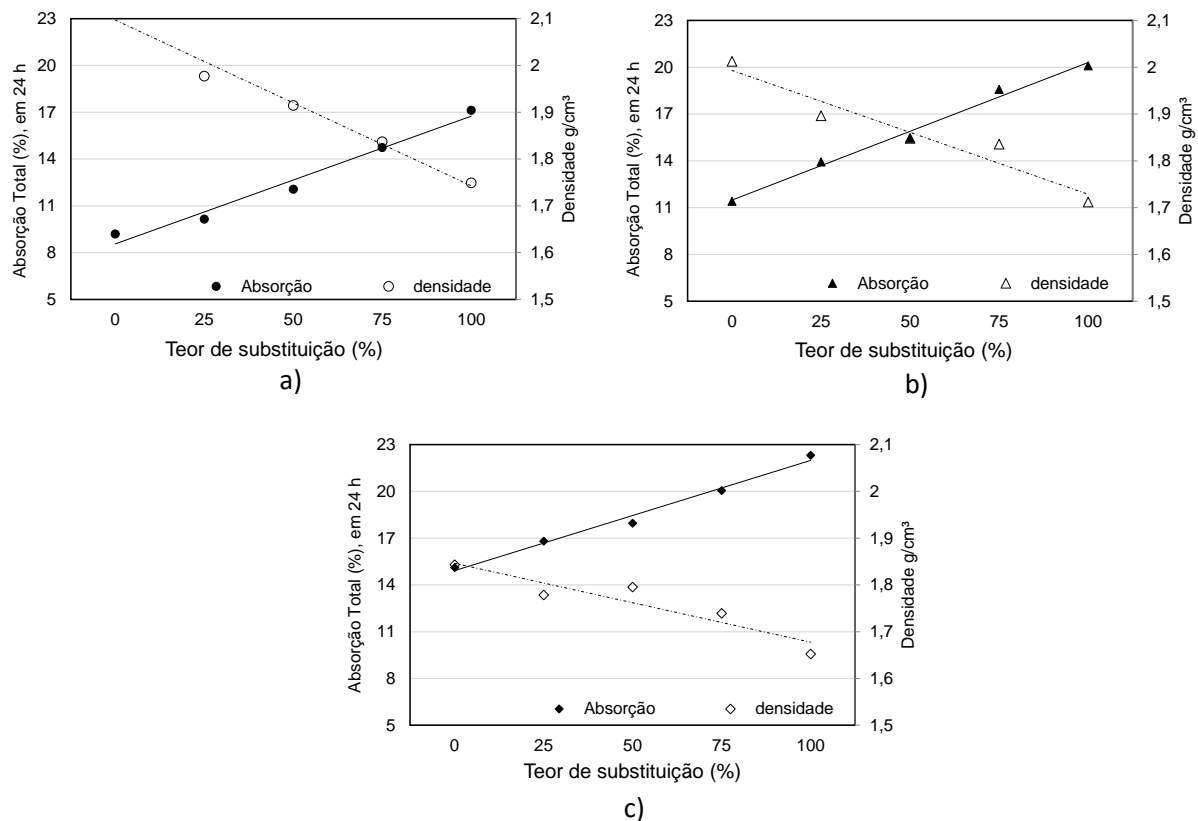


Figura 39: Absorção de água e densidade em função do teor de substituição de RCD a) Argamassa tipo A b) Argamassa tipo B c) Argamassa tipo C
 Fonte: Autoria própria (2019).

5.2.2 Avaliação das propriedades mecânicas

Na análise estatística (Tabela 6), as variáveis traço, teor de RCD e idade e suas interações tiveram influência significativa na resistência à tração na flexão. Nota-se na Figura 40 que a adição dos RCD's nas argamassas tem influência negativa na resistência à tração na flexão. Em estudos, Kruger, Souza e Konofal (2013), Zhao et al. (2015) e Muñoz-Ruiperez et al. (2016), também encontraram redução na resistência à tração na flexão das argamassas com adições de resíduos de construção.

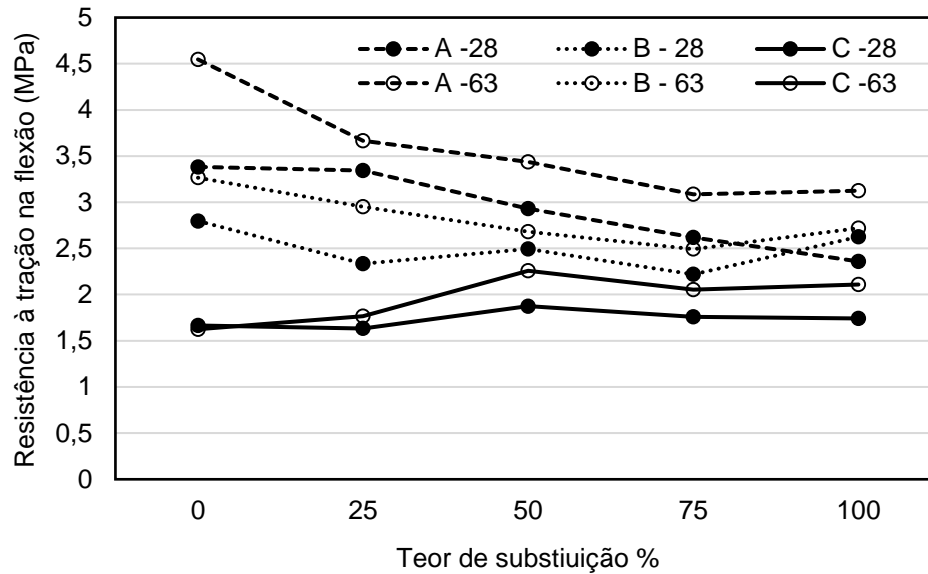


Figura 40: Resistência à Tração na Flexão (MPa)
Fonte: Autoria própria (2019).

As argamassas produzidas com cal hidratada (traço B e traço C) apresentam valores menores de resistência à flexão que as argamassas de cimento (traço A) isso ocorre devido ao menor teor de cimento na sua composição e à maior quantidade de água (ver Tabela1) empregada na dosagem para obtenção da consistência alvo. Já a adição de RCD's nas argamassas com cal é benéfica para alguns teores de substituição, gerando um pequeno aumento na resistência, o que também foi encontrado por Ferreira (2017) e Andrade et al. (2018). Ferreira (2017) constatou que o aumento da resistência à tração na flexão em argamassas mistas fabricadas com areia reciclada aconteceu em percentuais superiores a 50% de substituição.

Em estudos, Rudnitski, Nakanishi e Mohamad (2014) encontraram valores de resistência à tração na flexão de 2,13 MPa em argamassas com 25% de substituição de areia natural por RCD vermelho, valores que foram ficando cada vez menores com o aumento das adições. Para essa pesquisa os valores encontrados em 25% de adição foram valores próximos aos de Rudnitski, Nakanishi e Mohamad (2014), ficando em cerca de 2,34 MPa.

Como verificado na análise estatística, a variável controlada idade tem influência significativa na variável resposta resistência à tração na flexão, aos 63 dias as argamassas de cimento obtiveram resistência à tração na flexão cerca de 34,4% maior do que a resistência aos 28 dias (Figura 40), considerado um mesmo nível de

substituição de RCD, pois em idades mais avançadas ocorre um aumento no grau de hidratação.

Nos ensaios de resistência à compressão realizados aos 28 e 63 dias (Figura 41) notou-se que as argamassas com RCD possuem menor resistência à compressão em comparação com argamassas de referência, exceto para as argamassas mistas, tipo C, a qual apresentou um aumento na resistência com teores de substituição de 25%, 50% e 75%. Porém, com 100% de RCD a resistência voltou a diminuir. Nas argamassas de cimento (traço A) observou-se maior diferença na resistência à compressão, sendo que nas argamassas sem RCD a resistência foi cerca de 39,65% maior em relação àquelas com 100% de RCD. Para as argamassas com cal hidratada a resistência à compressão foi menor, devido à menor quantidade de cimento e a maior quantidade de água empregada na sua fabricação (Tabela 1).

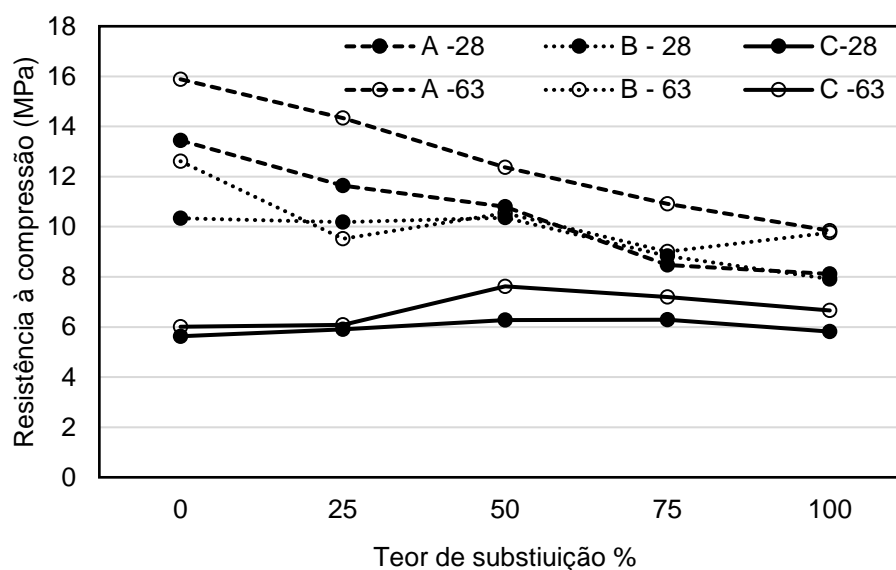


Figura 41: Resistência à Compressão (MPa)
Fonte: Autoria própria (2019).

A redução da resistência à compressão em argamassas com RCD também foi verificada por Zhao et al., (2015), Andrade et al. (2018), Martínez et al., (2016), Muñoz-Ruiperez et al., (2016), segundo os autores essa queda está diretamente relacionada com o aumento da quantidade de água necessária para obtenção da consistência, que implica em maior porosidade do material no estado endurecido e, conseqüente redução da resistência. Martínez et al. (2016) indicaram que as argamassas de

cimento com RCD possuem valores de resistência à compressão menores que as argamassas fabricadas apenas com areia natural. Para o traço de 1:4, com 100% de RCD, a menor resistência encontrada por Martínez et al. (2016) foi de 9,07 MPa. valor próximo ao encontrado nesse trabalho para argamassas de cimento (traço A), onde, a menor resistência à compressão foi de 8,1 MPa, para a mistura com 100% de RCD.

Em argamassas mistas (B e C) a resistência à compressão é menor em comparação com a argamassa de cimento (A). Resultados semelhantes foram encontrados por Silva e Campiteli (2006), que estudaram a influência dos finos e da cal nas argamassas, concluindo que a adição da cal reduz a resistência à compressão, devido ao menor teor de cimento total da mistura final.

Como confirmado na análise estatística, além do traço e teor de RCD, a idade também tem influência significativa na resistência à compressão. Na Figura 41 é possível verificar que as argamassas com 63 dias de idade possuem resistências maiores que as com 28 dias. A influência positiva da idade para o aumento da resistência à compressão em argamassas com agregados reciclados também foi observada por Silva e Campiteli (2006), Muñoz-Ruiperez et al. (2016) e Andrade et al. (2018). Muñoz-Ruiperez et al. (2016) encontraram um aumento na resistência à compressão aos 3 meses em comparação com os 28 dias de 15% para as argamassas com agregado reciclado, e aos 365 dias o aumento foi de 40% em relação àquela dos 28 dias.

As variáveis teor de RCD e traço tiveram influência significativa para o módulo de elasticidade dinâmico (Tabela 6), onde observa-se (Figura 42) uma redução desta propriedade para argamassas produzidas com RCD.

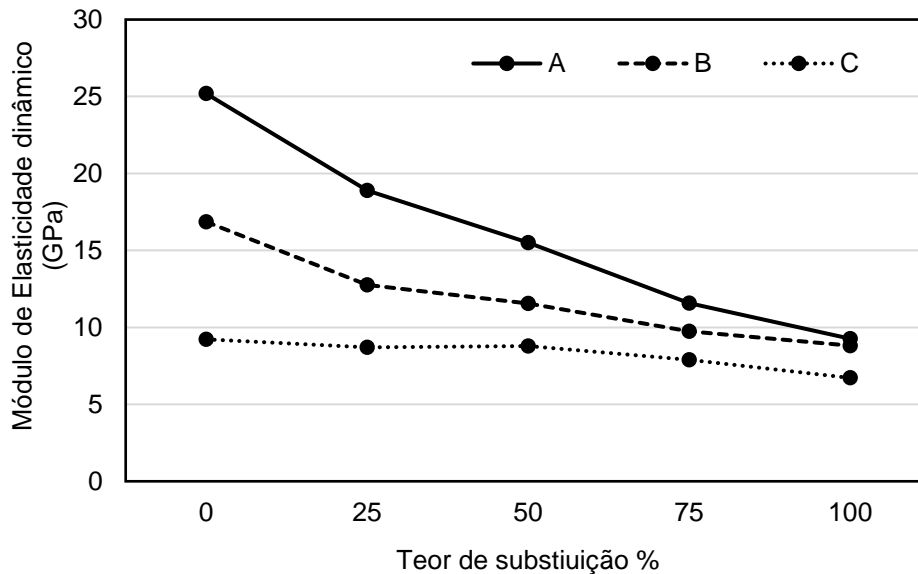


Figura 42: Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa)
Fonte: Autoria própria (2019).

É possível verificar uma redução no módulo de elasticidade para as argamassas que contém cal hidratada, a qual é cerca de 63,4 % inferior em relação à argamassa de cimento. John (2003) também encontrou redução no módulo de elasticidade em argamassas de cimento com a adição de cal hidratada, segundo o autor a adição da cal aumenta a porosidade e eleva o tamanho dos poros, afetando significativamente as propriedades das argamassas, tornando-as menos densas, com mais vazios e maior deformabilidade.

Segundo Angulo e Figueiredo (2011) o módulo de deformação é totalmente afetado pela porosidade do material; como os agregados de RCD estão microfissurados pela britagem, eles aumentam a porosidade das argamassas, e conseqüentemente a absorção de água, reduzindo a densidade, o módulo de elasticidade e a resistência mecânica.

Para Leite (2001), o uso de agregados reciclados em concretos aumenta a porosidade do material e, conseqüentemente, reduz o módulo de deformação. Cabral et al. (2009) verificaram que a substituição de agregado miúdo natural pelo miúdo reciclado de cerâmica vermelha em teores de 50% diminui cerca de 6% o módulo de deformação dos concretos, e em teores de 100% essa redução chega a 11%. Os autores afirmam, ainda, que os agregados miúdos e graúdos de cerâmica vermelha são mais porosos que os agregados naturais, uma vez que apresentam maior absorção e menor massa específica.

Silva, Brito e Veiga (2007), perceberam uma ligeira redução no módulo de elasticidade em argamassas fabricadas com incorporação de finos de tijolos vermelho, segundo os autores essa redução pode ser uma tendência positiva para vários tipos de aplicação das argamassas. Araújo, (2014) destaca que, diferentemente da resistência à compressão, a redução no módulo de elasticidade é favorável, uma vez que reduz a rigidez do material, permitindo maiores deformações e melhorando o desempenho contra fissuração.

Os valores encontrados para as propriedades mecânicas se encontram detalhados no Apêndice A.

5.2.3 Avaliação da profundidade de carbonatação

Pela análise estatística, as variáveis teor de RC (% RCD), traço, idade e ambiente de exposição têm influência significativa sobre a profundidade de carbonatação das argamassas. Os resultados obtidos no estudo de carbonatação dos 28 e 266 dias (Figuras 43 e 44), indicaram que quanto maior o teor de substituição de RCD, maior a profundidade de carbonatação das argamassas. Andrade et al. (2018) observaram que o aumento do conteúdo de agregado reciclado em argamassas aumenta a profundidade de carbonatação. Lovato et al (2012), verificaram resultados semelhantes na carbonatação de concretos com diferentes teores de RCD.

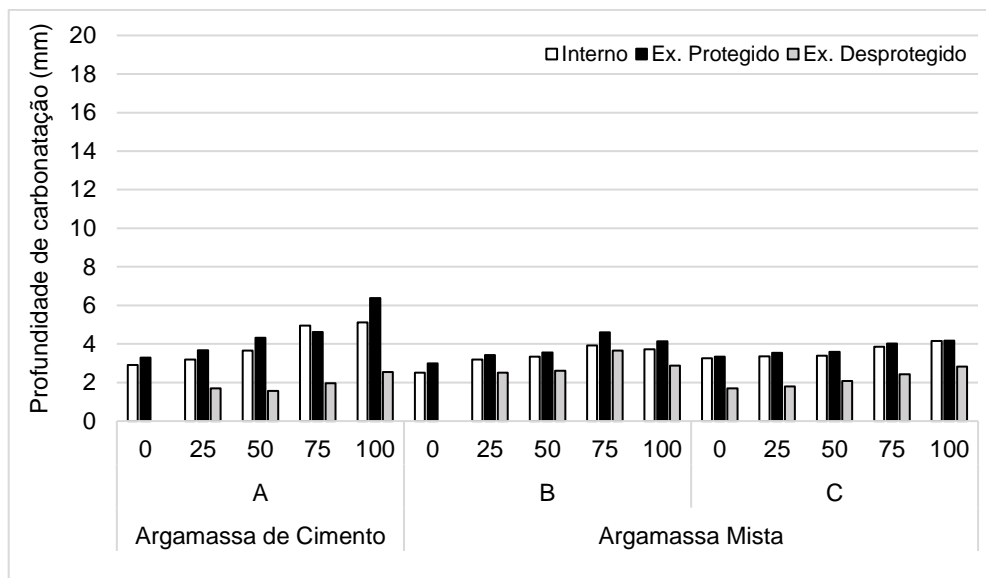


Figura 43: Profundidade de Carbonatação das argamassas aos 28 dias
Fonte: Autoria própria (2019).

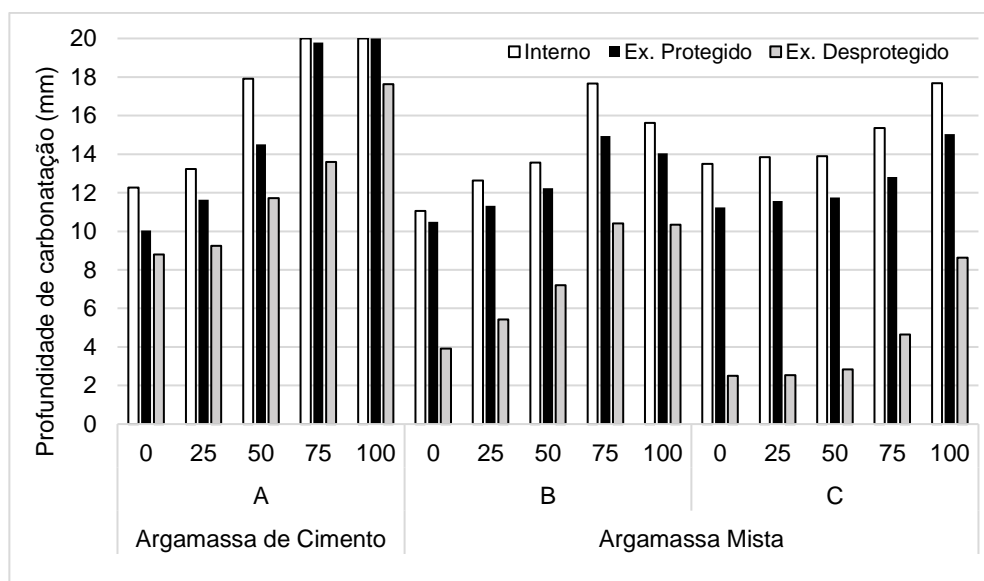


Figura 44: Profundidade de Carbonatação das argamassas aos 266 dias
Fonte: Autoria própria (2019).

As argamassas de cimento aos 266 dias em ambiente interno chegaram a atingir a profundidade máxima de carbonatação (20 mm), enquanto as mistas ficaram em torno de 15 e 17 mm (Figura 44). Logo, é possível concluir que as argamassas de cimento (Traço A) apresentam maior profundidade de carbonatação em relação às mistas (traço B e traço C), o que pode ser atribuído à maior reserva alcalina das argamassas com cal hidratada, uma vez que possuem maior quantidade de hidróxido

de cálcio, além de hidróxido de magnésio, disponível para a reação química com o CO_2 , fazendo com que a frente de carbonatação seja mais lenta.

Os ambientes que mais contribuíram para o aumento da carbonatação foi o ambiente interno seguido do externo protegido da chuva (Figura 45). Na literatura, Leemann et al. (2015) e Pauletti, Possan e Molin (2007), relatam que os ambientes expostos à chuva interferem e dificultam a difusão do CO_2 , enquanto que em ambientes internos e protegidos da chuva há menor variação de umidade, fazendo com que o CO_2 se difunda facilmente e o material carbonata mais rapidamente.

Leemann et al. (2015) relataram que amostras expostas à chuva possuem pouca velocidade de difusão de CO_2 , pela presença de água, sendo que a carbonatação em locais expostos à chuva pode ser 1,5 vezes menor do que em ambientes protegidos. Pauletti, Possan e Molin (2007) afirmam que a umidade afeta significativamente a carbonatação; em condições de saturação de água a carbonatação será menor, pois a difusão de CO_2 nos poros será pequena, assim como em condições de baixa umidade onde não haverá água para dissolver o CO_2 .

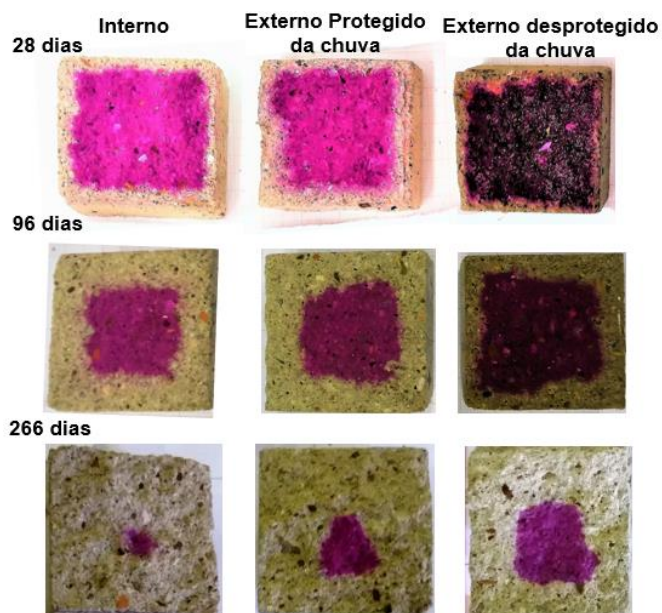


Figura 45: Argamassas de cimento (A) com 50% RCD aos 28, 96 e 266 dias de exposição natural
Fonte: Autoria própria (2019).

O incremento do teor de RCD aumenta a profundidade de carbonatação das argamassas (Figura 46). Na idade de 96 dias as amostras com 100% de RCD tiveram profundidades de carbonatação cerca de 5,6 mm maiores em comparação com as de 0%. Já aos 266 dias, quando as argamassas expostas em ambiente interno atingiram à profundidade de carbonatação máxima, a diferença da profundidade de carbonatação entre as argamassas com 100% de RCD e 0% de RCD atingiu 7,7 mm (Figura 47).

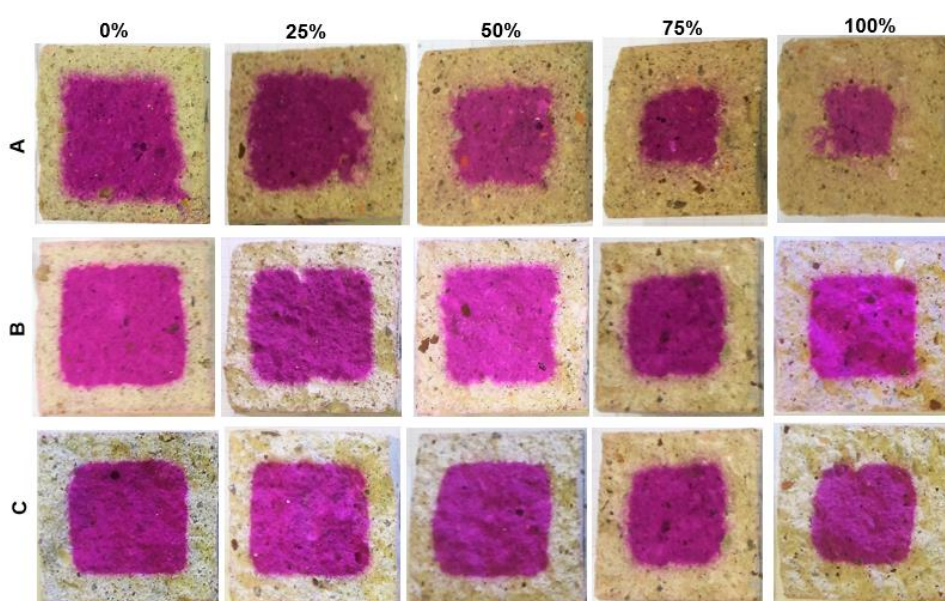


Figura 46: Amostras com diferentes teores de RCD, aos 96 dias, expostas em ambiente interno (laboratório)
Fonte: Autoria própria (2019).

A idade das amostras afeta positivamente a profundidade de carbonatação, quanto maior a idade maior a profundidade de carbonatação e, conseqüentemente, maior a captura de CO₂ (Figura 47). Na idade de 266 dias é possível constatar um aumento de 14,9 mm na profundidade de carbonatação das argamassas em ambiente interno em relação aos 28 dias.

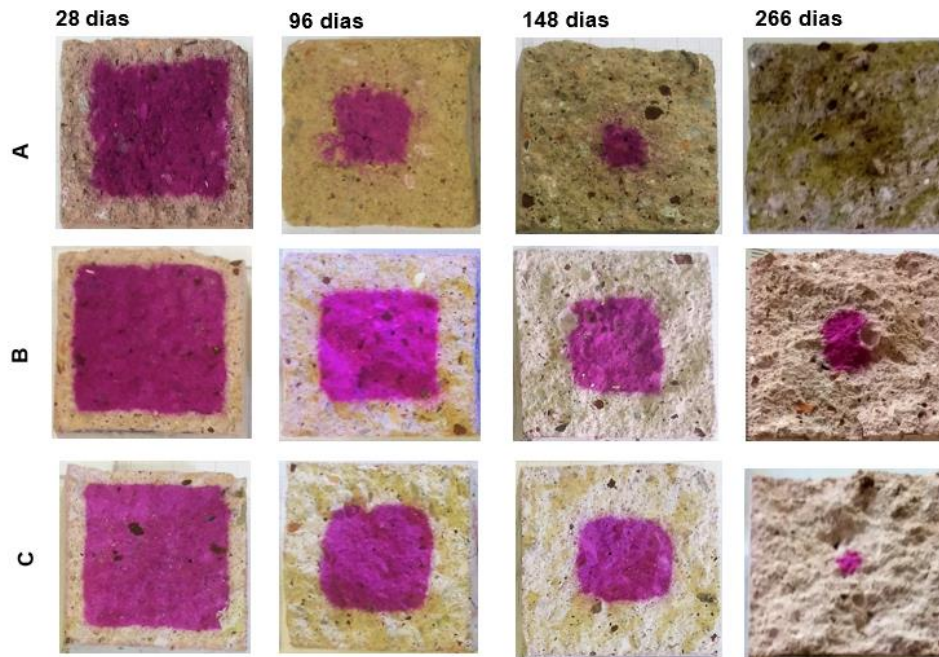


Figura 47: Amostras com 100% de RCD, em exposição ao CO₂ em ambiente interno
Fonte: Autoria própria (2019).

Os valores de profundidade de carbonatação encontrados em cada idade e ambiente de exposição se encontram detalhados no Apêndice A.

Nesta seção verificou-se que a substituição do agregado natural pelo agregado reciclado de RCD, reduz a resistência à compressão, à flexão, o módulo de elasticidade e a densidade, aumenta a absorção de água e a profundidade de carbonatação das argamassas, ainda, observamos que o ambiente de exposição que mais colabora com a profundidade de carbonatação é o ambiente interno, sendo que as argamassas que atingiram maiores profundidades de carbonatação foram as de cimento.

5.3 CAPTURA DE CO₂

O estudo da captura de CO₂ foi conduzido mediante a medição direta da profundidade de carbonatação como sugerem Pade e Guimarraes (2007), Andrade e Sanjuán (2018), Andrade et al. (2018). Também se fez a análise da captura de CO₂

com base em medições térmicas e estudos mineralógicos (XUAN, ZHAN e POON, 2016).

5.3.1 Estimativa da captura com base na profundidade de carbonatação.

Na Figura 48, estão representados os resultados obtidos para a captura de CO₂, de argamassas expostas em três ambientes diferentes, com idades de 266 dias. Nos gráficos as colunas representam a captura de CO₂ considerando a porcentagem média de clínquer contido no cimento (92 %), enquanto as barras de erro representam a captura considerando o teor máximo até o mínimo de clínquer (94 %), conforme NBR 11578 (ABNT, 1991). Para os valores de %CaO totalmente carbonatável utilizou-se a média de 80%. Os resultados detalhados da captura de CO₂ por m³ de argamassa se encontram no Apêndice A.

Nas barras de erro é possível visualizar que a diferença entre a captura máxima é mínima é pequena, isto acontece devido à baixa discrepância entre as porcentagens de clínquer do cimento utilizado (CP II F), que varia de 90 a 94% (com base na normativa anterior - NBR 11578 (ABNT, 1991). Segundo Garcia et al. (2010) à medida que a quantidade de clínquer aumenta, também aumenta a quantidade de CO₂ absorvida.

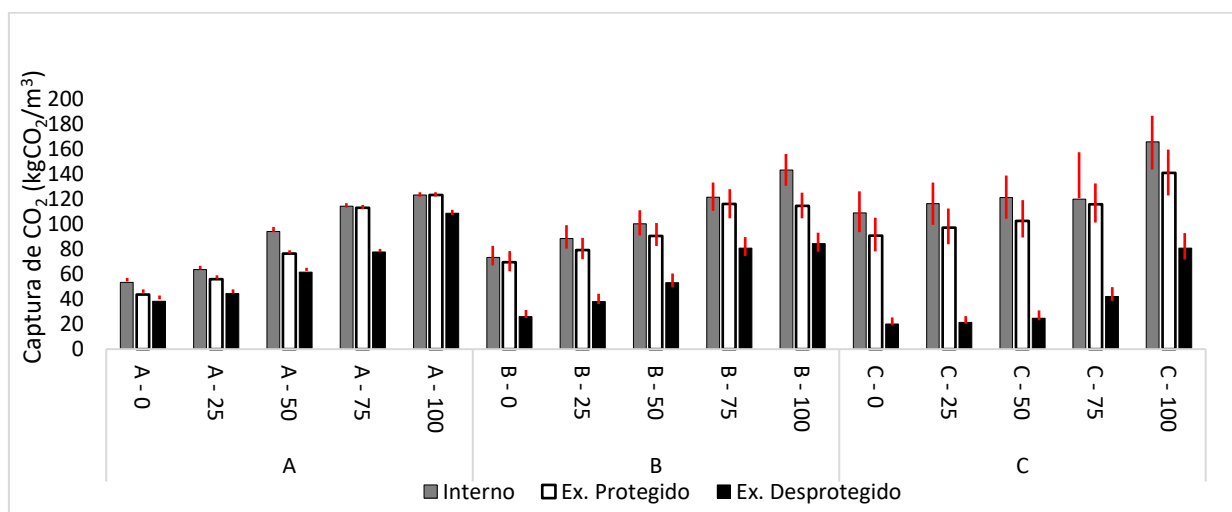


Figura 48: Captura de CO₂ das argamassas aos 266 dias
Fonte: Autoria própria (2019).

É possível observar que as argamassas contendo agregado reciclado de RCD capturam quantidades de CO₂ maiores que as argamassas fabricadas apenas com agregado natural, ainda podemos verificar que para os ambientes interno e externo protegido as argamassas com cal capturam valores de CO₂ maiores que as argamassas sem cal.

Na Figura 49 tem-se a captura de CO₂ das argamassas mistas tipo C com 100% de RCD ao longo do tempo para os três ambientes de exposição.

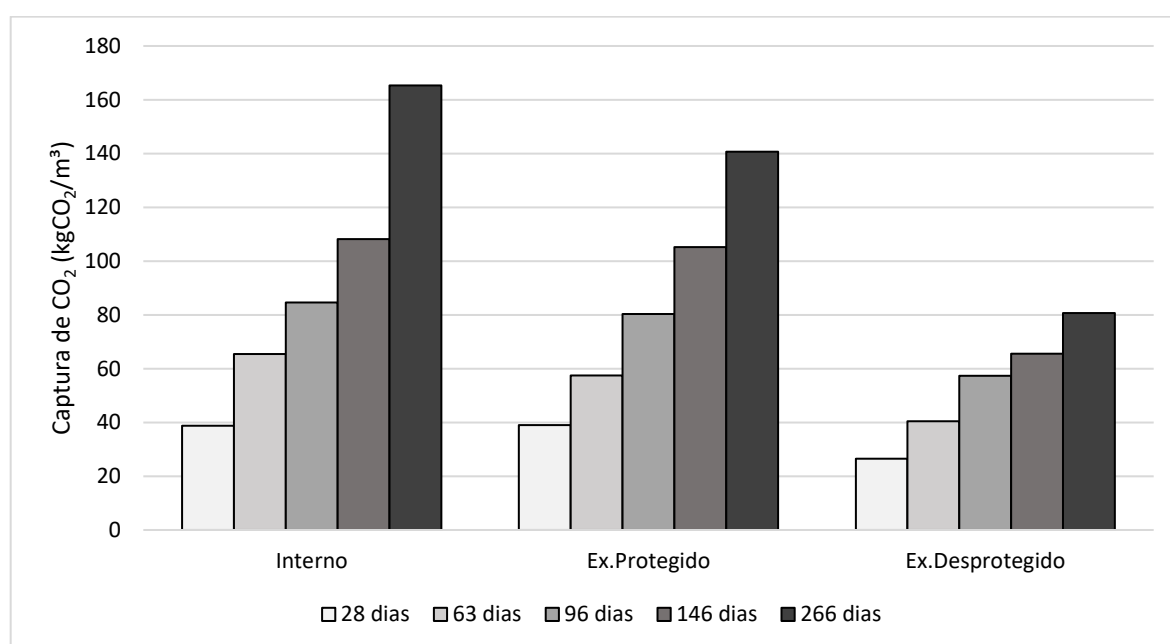


Figura 49: Influência do ambiente de exposição na Captura de CO₂ ao longo do tempo para argamassas mistas tipo C, com 100% de RCD
Fonte: Autoria própria (2019).

O ambiente que mais contribui para a captura de CO₂ é o ambiente interno, seguido do externo protegido e por último de externo desprotegido, o ambiente interno aumenta cerca de 2 vezes a captura de CO₂ em comparação com o externo desprotegido, chegando a um aumento de 84,7 kgCO₂/m³. Os ambientes internos favorecem a captura de CO₂, uma vez que ambientes fechados e com circulações de pessoas apresentam taxas elevada de CO₂ dissolvido no ar e teor de umidade adequado/ideal para a difusão do CO₂ no interior do material.

Dentre os ambientes externos, o protegido da chuva apresenta maior profundidade de carbonatação e conseqüentemente maior potencial de captura de CO₂, visto que não há a saturação dos poros permitindo a difusão do gás com maior facilidade (ANDRADE et al, 2018).

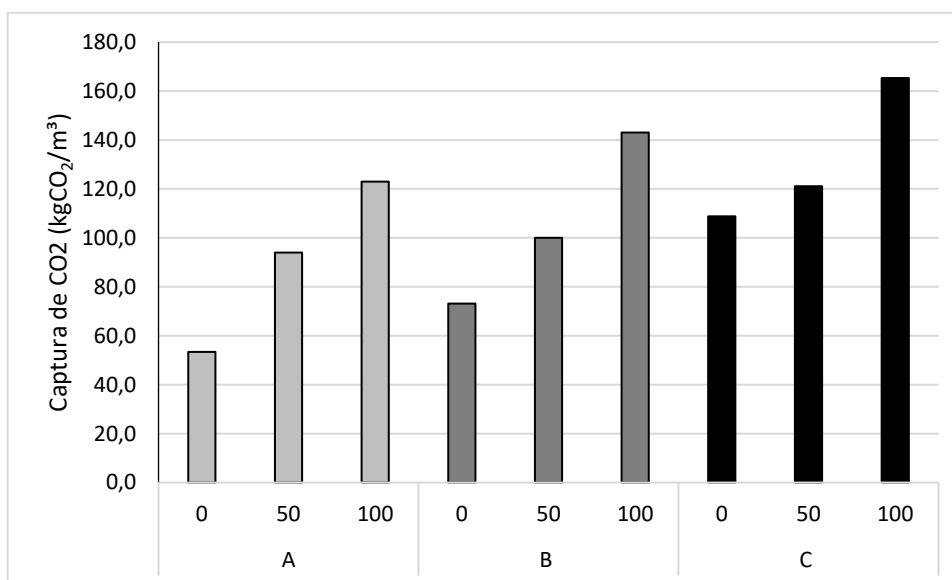


Figura 50: Influência do traço na captura de CO₂ das argamassas com 0, 50 e 100% de RCD, aos 266 dias, expostas em ambiente interno
Fonte: Autoria própria (2019).

Em ambiente interno, com 266 dias de exposição a argamassa de cimento (A) contendo 100% de RCD elevou a captura de CO₂ em 2,30 vezes em relação a de referência (sem RCD). Para as argamassas com cal hidratada (traço B e C), a captura de CO₂ das amostras com 100% de RCD foi 1,96 e 1,52 vezes maior que as sem resíduo.

Pela análise a partir da profundidade carbonatada (20 mm), aos 266 dias, com porcentagem de clínquer de 92%, em ambiente interno (ver Figura 50), a quantidade de CO₂ máxima capturada, ocorreu em amostra mista tipo C contendo 100 % de RCD, sendo 165,34 KgCO₂/m³ e a captura mínima foi de 53,4 KgCO₂/m³ para as argamassas de cimento com 0% de RCD.

O aumento da quantidade de CO₂ capturado em argamassas com RCD pode ser atribuído à pré-carbonatação dos agregados reciclados (ver termograma Figura 60 e difratograma Figura 30). Essa pré-carbonatação é decorrente do ingresso do CO₂

através da matriz cimentícia durante a vida útil da estrutura/edificação que deu origem ao resíduo. Também, após o fim da vida útil da estrutura/edificação tem-se a elevação da área superficial dos materiais pelo processo de demolição e britagem. Com isso os materiais à base de cimento podem absorver elevadas quantidades de CO₂ devido à carbonatação. A elevação do potencial de carbonatação, e consequente captura de CO₂, dos materiais no período pós-demolição é discutido por Pade e Guimares (2007) e Felix e Possan (2018).

Além disso, as argamassas produzidas com RCD tendem a apresentar maior porosidade, devido a porosidade inerente ao resíduo, o que facilita a difusão do CO₂ aumentando a taxa de carbonatação e, consequentemente, a captura de CO₂ (ANDRADE et al, 2018). Segundo pesquisas realizadas por Thomas et al, (2014) quanto maior a porcentagem de substituição de agregado natural por RCD, maior a relação a/c e mais elevada a porosidade, consequentemente, maior a quantidade de CO₂ absorvido.

A profundidade de carbonatação nem sempre está relacionada com a captura de CO₂. Neste estudo as argamassas de cimento possuem maior profundidade de carbonatação em comparação as mistas. Porém as argamassas que mais capturam CO₂ são as mistas, chegando a um aumento de 42,35 kgCO₂/m³. Estudos mostram que o dióxido de carbono também reage com o hidróxido de magnésio (Mg(OH)₂) presente na cal hidratada (MO e PANESAR, 2013), desta maneira para que o CO₂ avance para o interior das argamassas é necessário que esse reaja com dois compostos (Ca(OH)₂ e Mg(OH)₂), retardando assim o seu avanço. Assim, a quantidade de CO₂ aprisionada no interior das argamassas a base de cal, pode ser maior do que nas argamassas à base de cimento para uma mesma profundidade de carbonatação.

Assim, quando o CO₂ ingressa na estrutura sua velocidade de propagação é maior (profundidade de carbonatação maior), no entanto a captura de CO₂ é reduzida devido à quantidade de hidróxido de cálcio e de magnésio disponível para a reação química ser menor (no FRX dos materiais da Tabela 5 é possível observar que a cal contém uma porcentagem maior de óxido de magnésio em comparação com o cimento).

Com o aumento da idade a profundidade de carbonatação aumenta e, consequentemente a captura de CO₂. Aos 266 dias as argamassas tipo C com 100%

de RCD, expostas em ambiente interno, chegaram a capturar 126,5 kgCO₂/m³ a mais em comparação com os 28 dias (Figura 51).

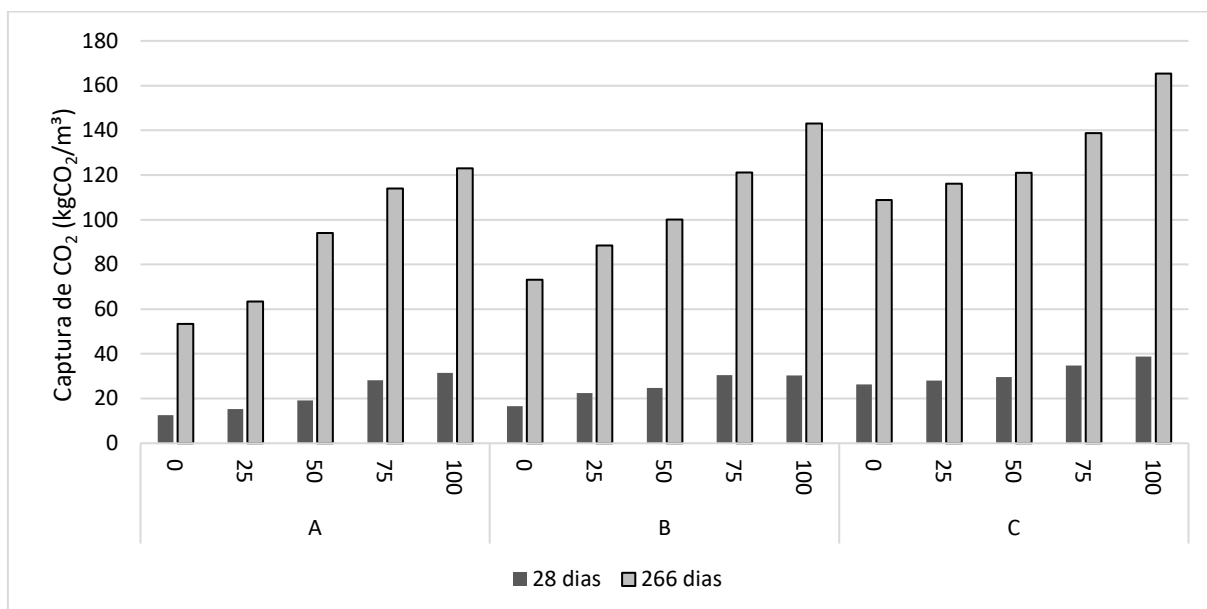


Figura 51: Captura de CO₂ aos 28 e 266 dias
Fonte: A autoria própria (2019).

Quando as argamassas atingem a profundidade de carbonatação máxima (20 mm), como é o caso das argamassas de cimento com 100% de RCD, expostas em ambiente interno a captura também é a máxima encontrada, por esse motivo com o passar do tempo a captura permanece a mesma, visto que a frente de carbonatação é igual a espessura do revestimento. A idade de 7300 dias (20 anos) foi adotada levando em consideração o tempo de vida útil de uma parede de vedação interna conforme NBR 15575 (ABNT, 2013), logo, pela estimativa de projeção, é possível observar que a captura com 266 dias é a mesma captura encontrada aos 20 anos (Figura 52). Sendo assim, dependendo do tempo em aberto (período desde a aplicação da argamassa de revestimento na alvenaria até a execução da proteção superficial) as argamassas podem ser totalmente carbonatadas durante a sua vida útil. Até o momento não se tem dados na literatura sobre o ingresso de CO₂ em superfícies protegidas superficialmente (com pintura ou outro tipo de revestimento), não sendo possível generalizar os resultados obtidos neste estudo para argamassas com proteção superficial.

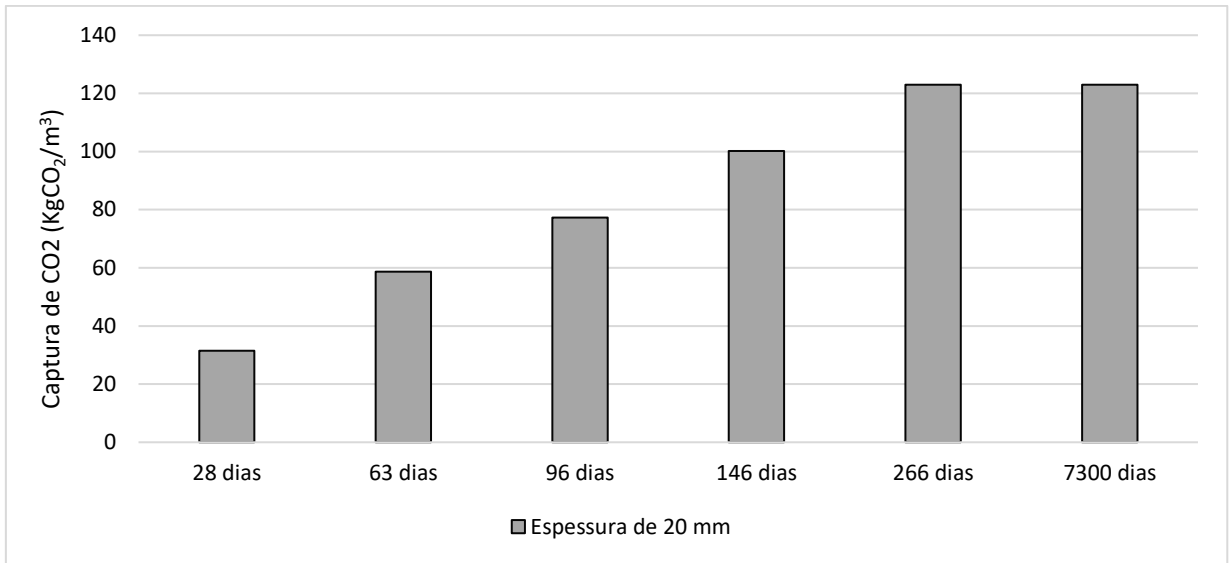


Figura 52: Captura de CO₂ ao longo do tempo, das argamassas de cimento com 100% de RCD, expostas em ambiente interno
 Fonte: A autoria própria (2019).

Na Figura 53, tem-se a amostra de argamassa mista tipo C, com 100% de RCD, em ambiente interno (as argamassas que mais contribuíram para a captura de CO₂). É possível observar que quanto maior a espessura do revestimento argamassado, menor é a captura do CO₂. Como a penetração do CO₂ acontece da superfície para o interior do material, em revestimentos com maior espessura a velocidade de penetração é reduzida e, portanto, a captura também será menor (ELENI et al., 2014).

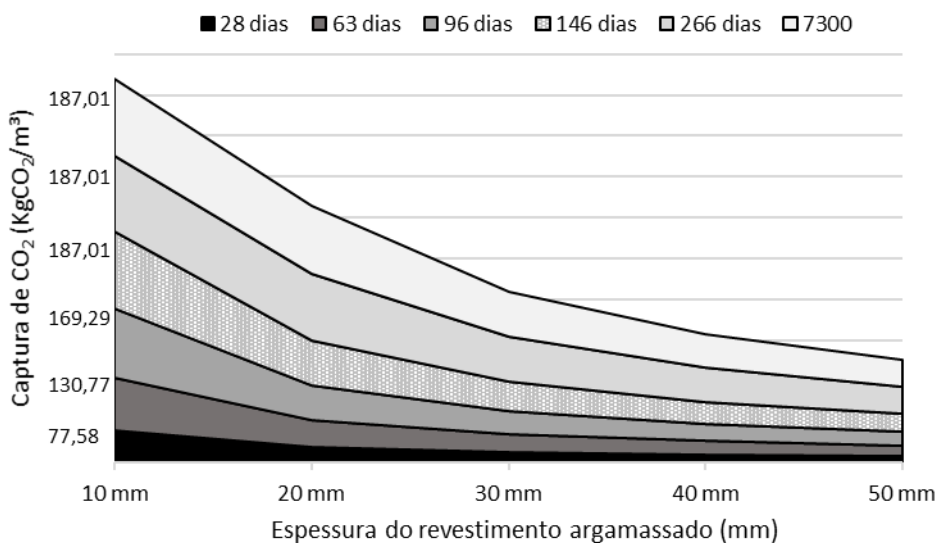


Figura 53: Captura de CO₂ em função do tempo de exposição e espessura do revestimento argamassado (Amostra C-100 ambiente interno)
 Fonte: A autoria própria (2019).

5.3.2 Estimativa da captura com base nas análises térmicas

Nas Figuras 54 a 61 têm-se os respectivos dados de TG e DTG dos materiais e das argamassas de cimento (A) e mistas (B e C), com os teores de substituição de areia natural por areia de RCD de 0, 50 e 100%. De cada amostra foram analisadas áreas carbonatadas (C) e não carbonatadas (NC).

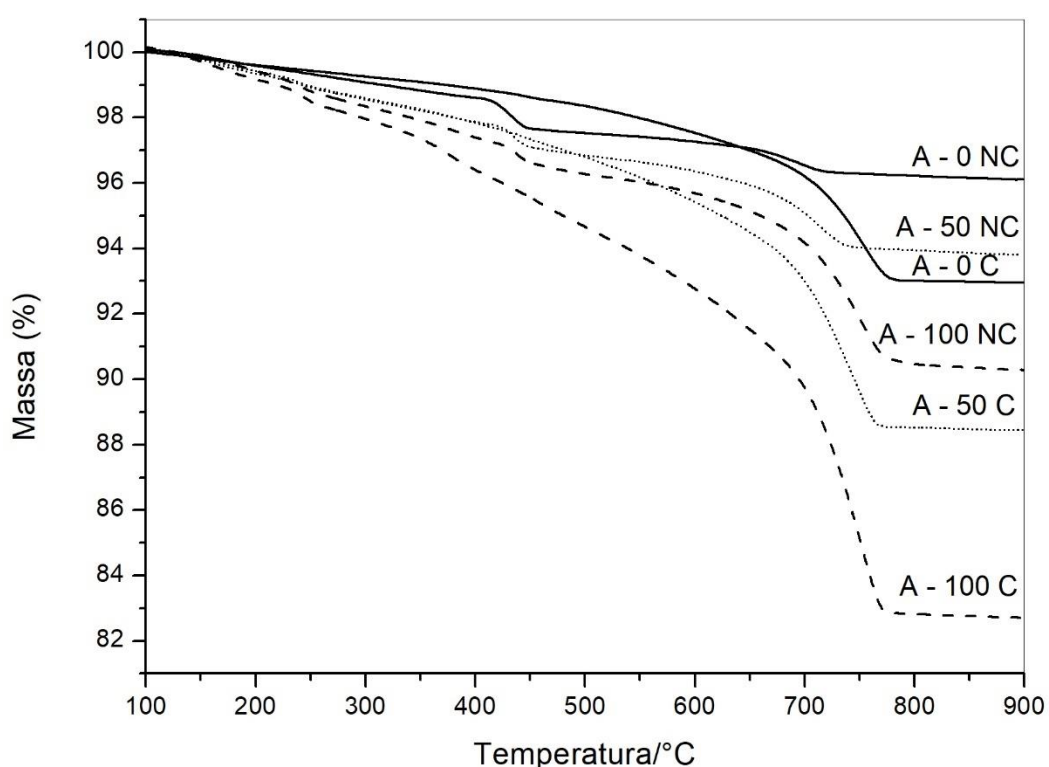


Figura 54: Gráfico termogravimétrico das argamassas de cimento carbonatadas (C) e não carbonatadas (NC)

Fonte: Autoria própria (2019).

Nota-se na Figura 54, que a perda de massa ocorre em três etapas distintas, sendo que a massa residual varia de acordo com cada amostra. É possível observar que as amostras carbonatadas possuem menor massa residual, em comparação as não carbonatadas (redução de 7,7 %). Para amostras com 100 % de RCD a massa residual chega a ser 10,2% menor em comparação com as amostras sem este resíduo.

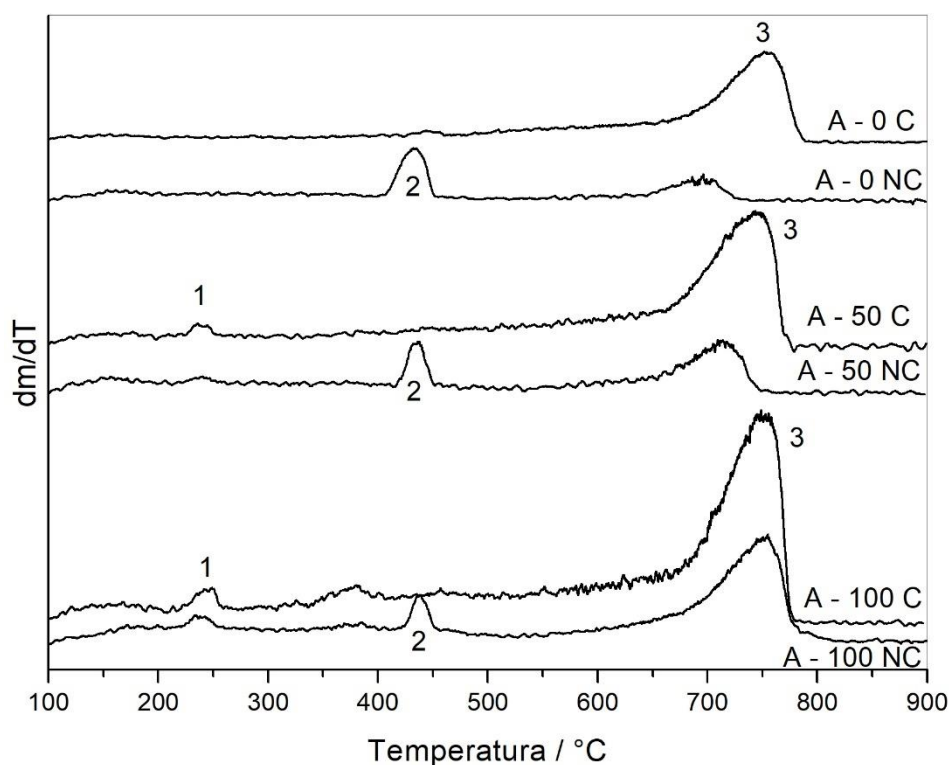


Figura 55: Curva termogravimétrica derivada das argamassas de cimento carbonatadas (C) e não carbonatadas (NC)
Fonte: Autoria própria (2019).

Na DTG (Figura 55), nota-se que a primeira perda de massa é menor em comparação com as demais, e ocorre em temperatura próxima a 250°C (pico 1). Essa perda acontece somente para as amostras com substituição de areia natural por resíduo de RCD. Cabe destacar que em geral os resíduos de construção desde a demolição até o processamento (britagem) e utilização, ficam expostos à ação de CO₂. Neste processo, a superfície específica do material é aumentada consideravelmente, podendo absorver maiores quantidades de CO₂. Sendo assim, o material ao ser inserido na dosagem das argamassas já se encontra previamente carbonatado, contendo CaCO₃. Ainda o RCD contém um pouco de monocarboaluminato de cálcio hidratado por ter teores de Al₂O₃ e CaO (ver Tabela 5), com isso a perda de massa do pico 1 se deve a perda de água de hidratação deste componente (GABROVSEK; VUK; KAUCIC, 2008).

A segunda perda de massa ocorre entre 300°C e 450°C (representada pelo pico 2), a qual deve-se à decomposição do hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) presente na matriz cimentante das argamassas. A última e maior perda de massa ocorre entre 650°C a 800°C (pico 3) é o resultado da decomposição do carbonato de cálcio

(CaCO₃) formado pela reação química de carbonatação (NEVES JUNIOR et.al.,2013; SCRIVENER; SNELLINGS; LOTHENBACH, 2016; NEVES JUNIOR et al., 2019).

Na Figura 54 é possível observar que as argamassas do tipo A (cimento) carbonatadas (C) possuem uma maior perda de massa em temperaturas entre 650°C a 800°C, em comparação com as não carbonatadas (NC). Isso se deve ao aumento da concentração de carbonato de cálcio, oriundo do processo de carbonatação das argamassas, onde o hidróxido de cálcio reage com o CO₂ e precipita como carbonato de cálcio (XUAN, ZHAN e POON, 2016). Como o hidróxido de cálcio é consumido na reação, para as amostras carbonatadas não existem picos (a derivada é constante) no intervalo de temperatura entre 300°C a 450°C (Figura 55).

Já para as argamassas não carbonatadas o pico 2 é mais elevado devido à maior quantidade de hidróxido de cálcio livre na matriz, tendo em vista que não houve a reação de carbonatação e a transformação do mesmo em carbonato de cálcio. Neves Junior, Filho e Dweck (2013) puderam verificar um consumo completo de Ca(OH)₂ e, conseqüentemente, um elevado pico de decomposição do CaCO₃ em pastas cimentícias com 24h de carbonatação e 24h de hidratação inicial.

Para as argamassas mistas com cal (tipo B), a perda de massa aconteceu basicamente em 4 etapas (Figuras 56 e 57).A primeira e menor perda de massa aconteceu para algumas amostras com resíduos em temperaturas próximas a 250°C (pico 1), devido à liberação da água de hidratação do monocarboaluminato de cálcio hidratado.

Conforme gráficos termogravimétricos das Figura 56 e 57, a segunda perda de massa (pico 2), acontece na temperatura aproximada de 350°C (que para as amostras não carbonatadas representa a decomposição do hidróxido de magnésio (Mg(OH)₂) presente no material devido à adição da cal e para as amostras carbonatadas representa a decomposição do carbonato de magnésio (MgCO₃) (MO e PANESAR, 2013), que foi formado pela reação de carbonatação, onde o hidróxido de magnésio reagiu com o CO₂, formando o carbonato de magnésio.

A terceira perda de massa (pico 3), ocorreu em temperaturas entre 400 e 450°C para as amostras não carbonatadas a qual representa a decomposição do hidróxido de cálcio. A quarta perda de massa (pico 4), foi verificada entre 650°C a 800°C sendo atribuída a decomposição do carbonato de cálcio (SCRIVENER; SNELLINGS; LOTHENBACH, 2016).

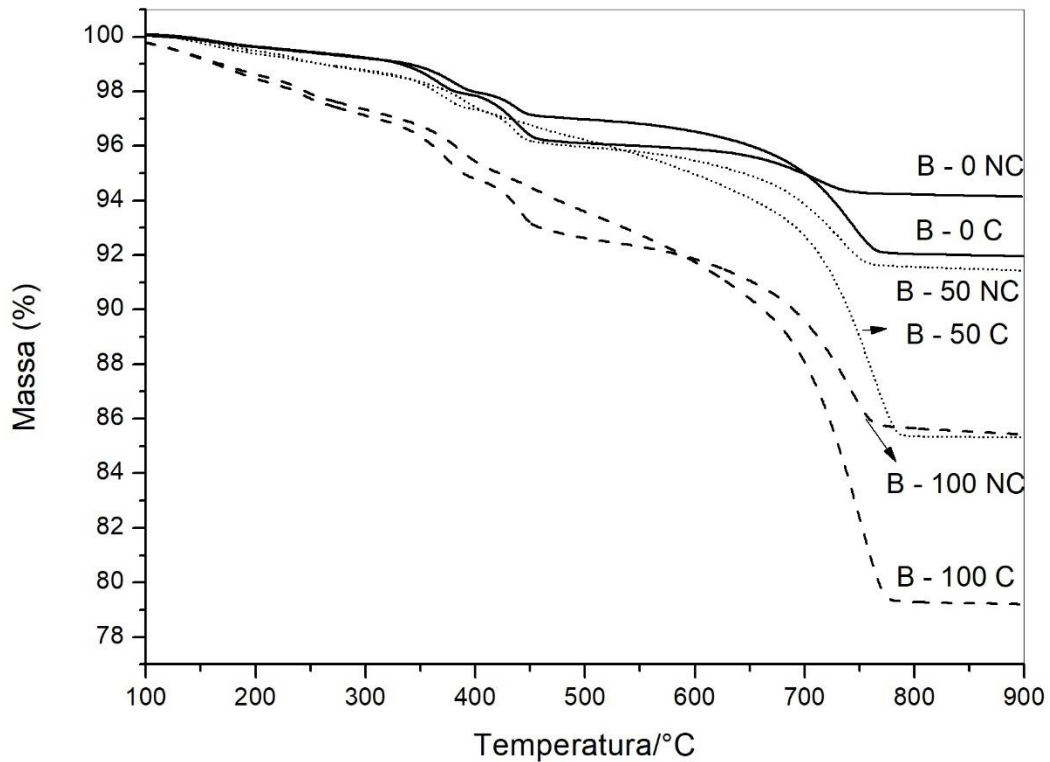


Figura 56: Gráfico termogravimétrico das argamassas mistas tipo B carbonatadas (C) e não carbonatadas (NC)
 Fonte: Autoria própria (2019).

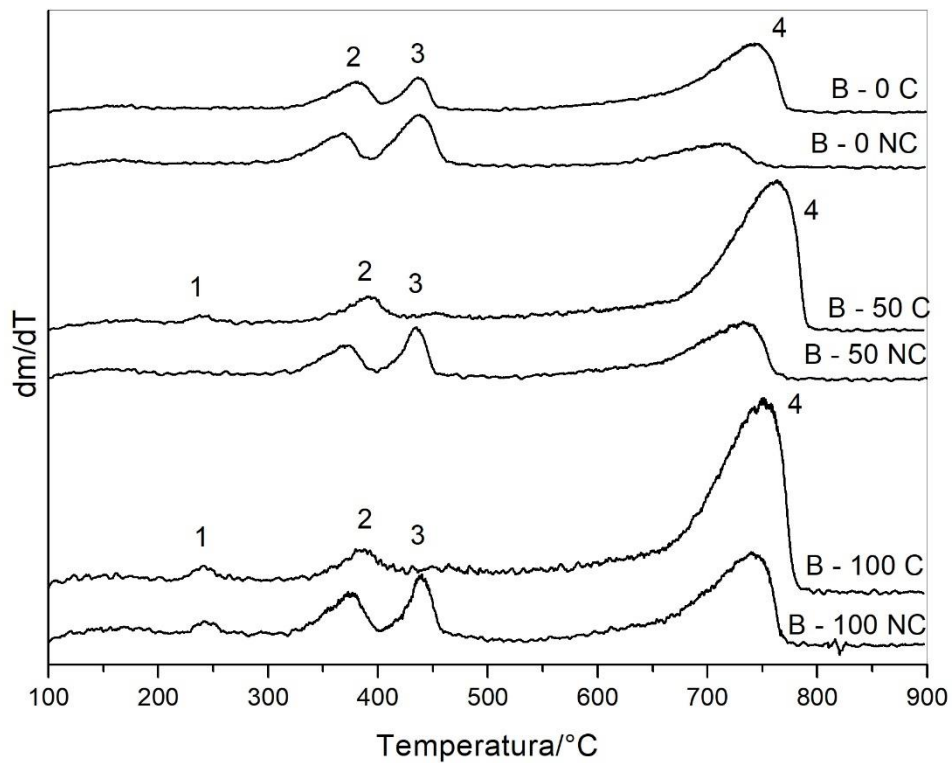


Figura 57: Curva termogravimétrica derivada das argamassas mistas tipo B carbonatadas (C) e não carbonatadas (NC)
 Fonte: Autoria própria (2019).

Na Figura 57 para a amostra B - 0 C (carbonatada), nota-se um pico de decomposição em temperaturas entre 400 a 450°C (pico 3). Este pico se deve a decomposição do carbonato de cálcio, indicando que possivelmente essa amostra pode ter sido retirada de uma região semi-carbonatada.

Para as argamassas mistas tipo C (Figura 58 e 59), a perda de massa acontece em três etapas distintas, e a massa residual varia dependendo de cada amostras, sendo as argamassas com RCD e carbonatadas as de menor massa residual.

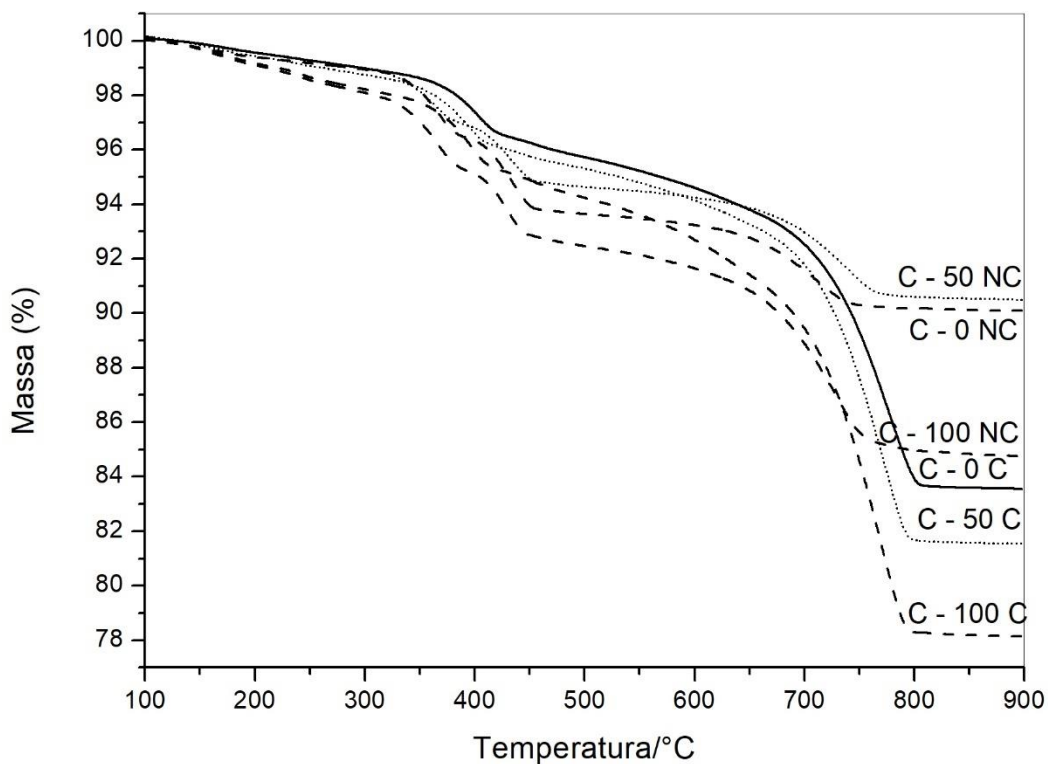


Figura 58: Gráfico termogravimétrico das argamassas mistas tipo C carbonatadas (C) e não carbonatadas (NC)

Fonte: Autoria própria (2019).

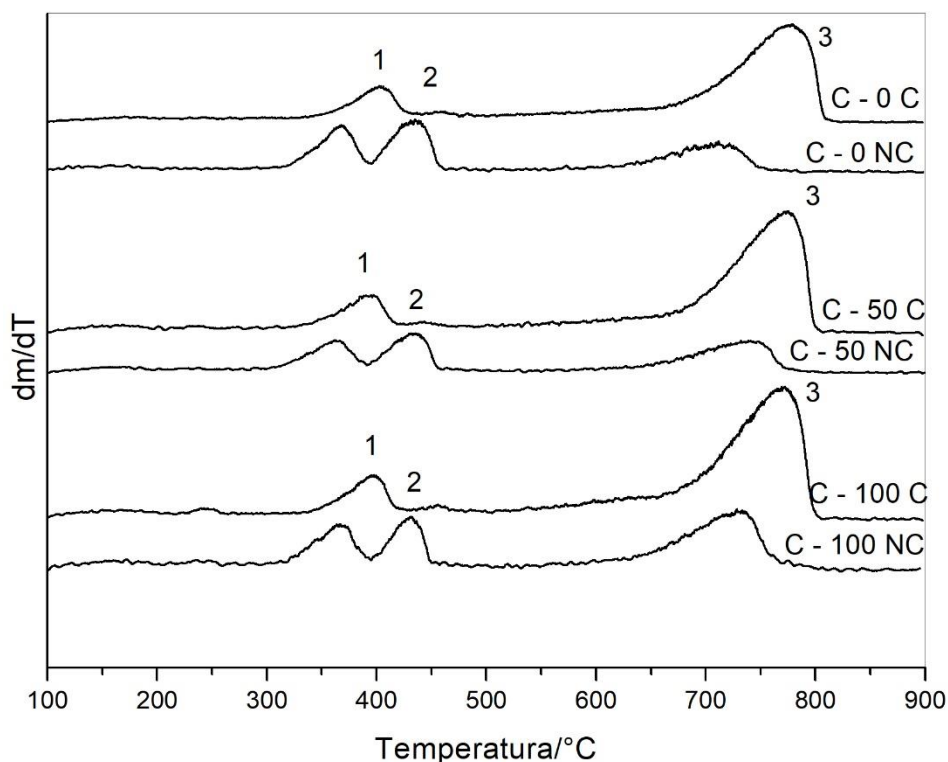


Figura 59: Curva termogravimétrica derivada das argamassas mistas tipo C carbonatadas (C) e não carbonatadas (NC)
Fonte: Autoria própria (2019).

Como comentado anteriormente o pico 1, para as argamassas não carbonatadas, representa a decomposição do hidróxido de magnésio e para as regiões carbonatadas, a decomposição do carbonato de magnésio. O pico 2 representa a decomposição do hidróxido de cálcio, que reage com o CO_2 e forma o carbonato de cálcio (pico 3) (XUAN, ZHAN e POON, 2016). Por esse motivo o pico 2 é inexistente para as argamassas não carbonatadas, pois o hidróxido de cálcio reage totalmente com o CO_2 , formando apenas o carbonato de cálcio

Para todos os tipos de argamassas é possível verificar que as amostras com 100% de RCD possuem maior perda de massa e picos mais elevados em temperaturas de 650°C a 800°C, ou seja, quanto maior a adição do RCD, maior a carbonatação e, conseqüentemente, mais elevada a quantidade de carbonato de cálcio para ser decomposto com o aumento da temperatura.

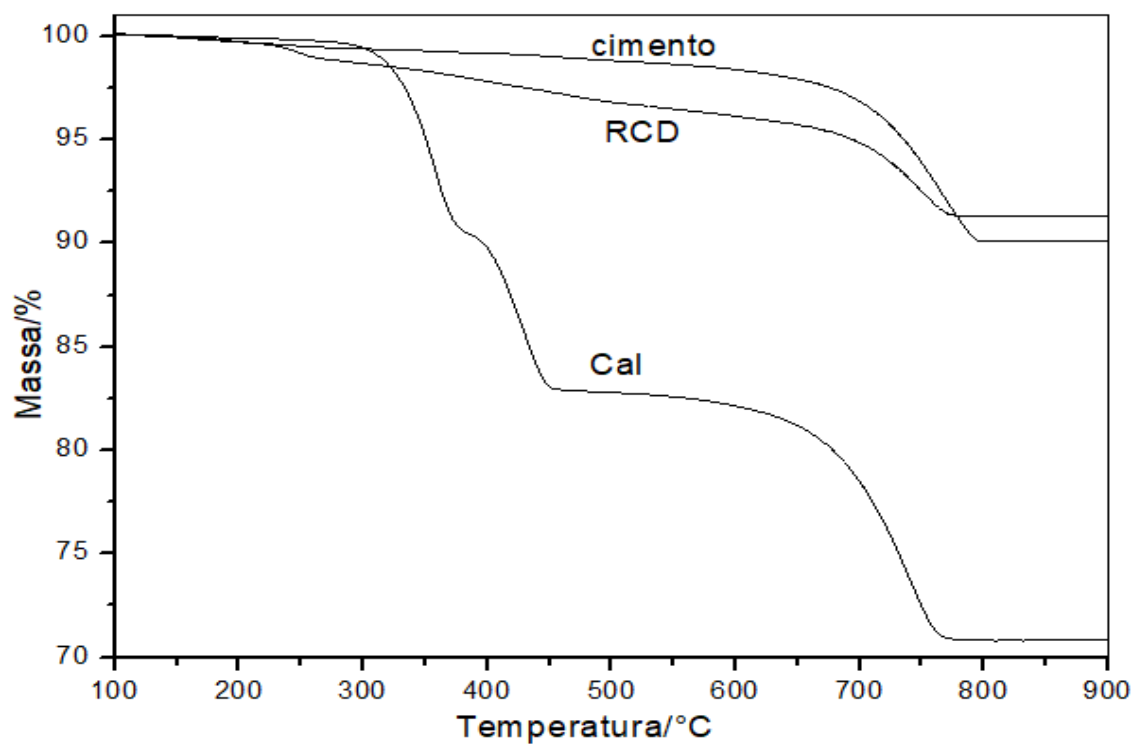


Figura 60: Termograma da cal, RCD e cimento
 Fonte: Autoria própria (2019).

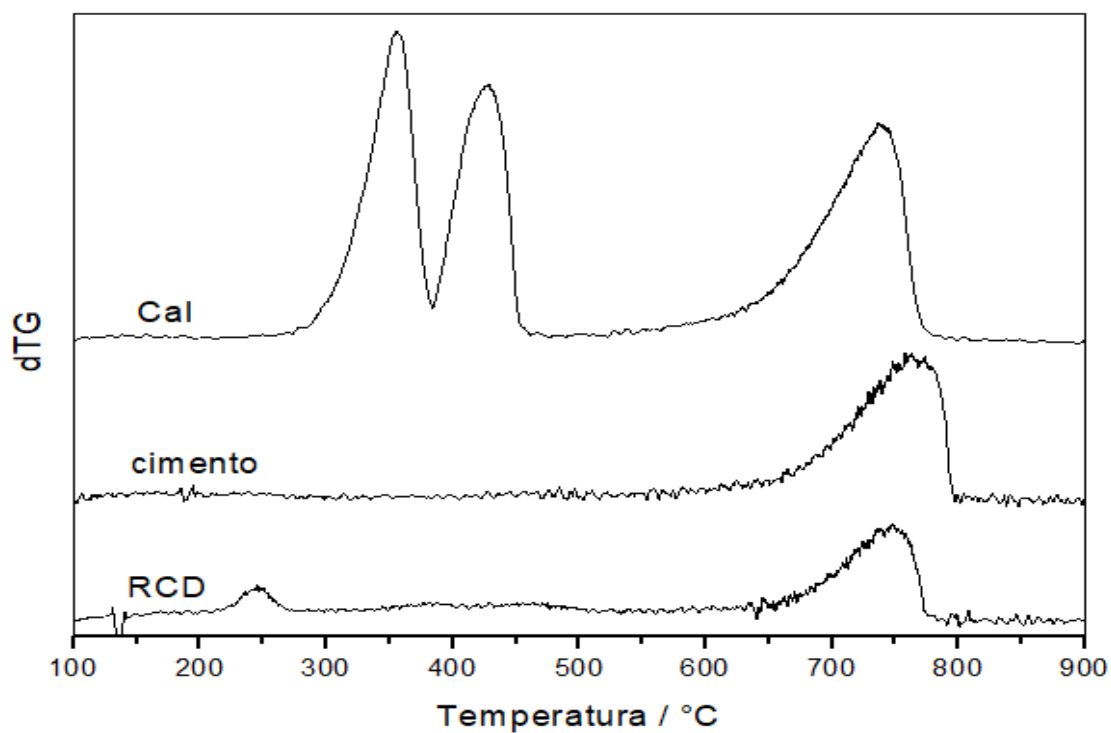


Figura 61: Curva termogravimétrica derivada da cal, RCD e cimento
 Fonte: Autoria própria (2019).

A partir dos resultados da TG e DTG dos materiais empregados no estudo (Figura 60 e 61) é possível afirmar que o RCD possui uma pré-carbonatação, tendo em vista a liberação de CO₂ combinado (temperatura em torno de 750°C) na análise térmica do material. Ainda no RCD é possível verificar a liberação da água de hidratação do monocarboaluminato de cálcio hidratado (250°C).

Este fato foi evidenciado em amostras não carbonatadas de argamassas produzidas com RCD, onde se constatou a existência pequenos picos na derivada nas temperaturas aproximadas de 750°C, os quais devem-se à liberação de CO₂ advinda dos materiais empregados na produção das argamassas.

Pela estequiometria das reações químicas da matriz cimentícia (Tabela 7) é possível observar que na decomposição térmica dos carbonatos e hidróxidos ocorre a liberação de CO₂ e H₂O, respectivamente:

Tabela 7: Estequiometria das reações químicas

	Carbonatação	Descarbonatação
Argamassa de cimento	$\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	$\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
Argamassa mista	$\text{Mg(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{MgCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	$\text{MgCO}_3 \rightarrow \text{MgO} + \text{CO}_2$

Fonte: Autoria própria (2019).

Pela termogravimetria de amostras de hidróxido de cálcio e de magnésio (Figura 62), é possível visualizar a perda de massa em duas etapas, a primeira em temperaturas próximas à 350°C, que se refere a decomposição do hidróxido de magnésio e a segunda em temperaturas próximas à 435°C que se refere a decomposição do hidróxido de cálcio, ambas as decomposições liberam H₂O, na primeira decomposição foi liberado 4,39% e na segunda 18,21%. Esses resultados convergem com os resultados obtidos nas amostras estudadas.

Com a obtenção da quantidade de H₂O e CO₂ liberado, a partir das curvas termogravimétricas foi possível obter o percentual de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio, carbonato de magnésio e carbonato de cálcio presente em cada amostra (Tabela 8).

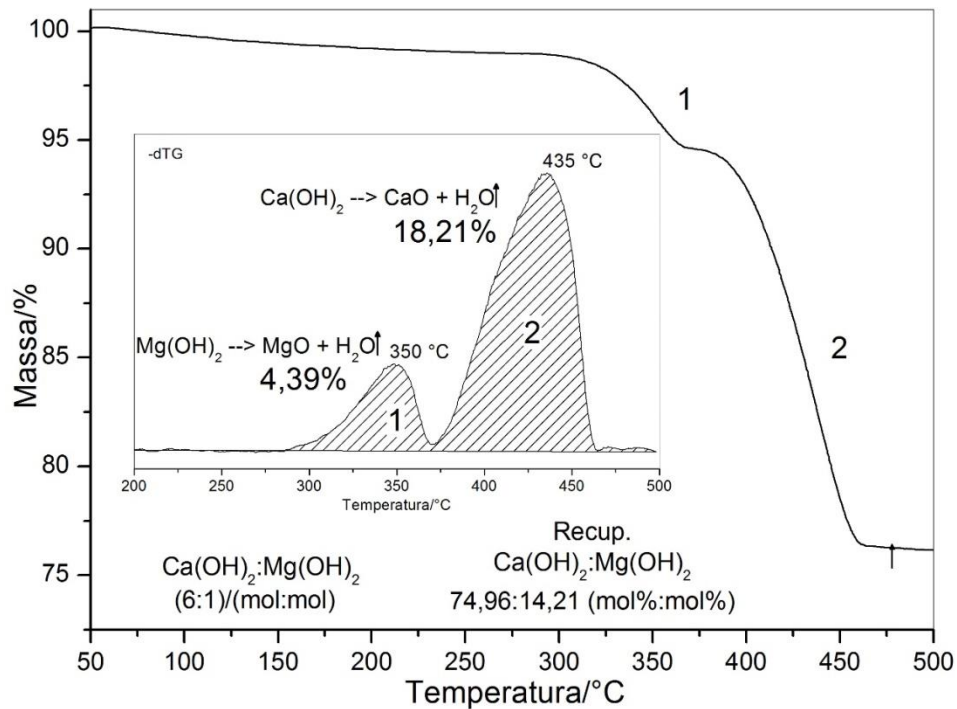


Figura 62: TG e DTG do hidróxido de cálcio e magnésio
 Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 8: Quantidade de óxido de cálcio e magnésio, carbonato de cálcio e magnésio e quantidade de H₂O e CO₂ liberada em cada amostra

Amostras	Quantidade na amostra (%)				Quantidade Liberada (%)	
	Mg(OH) ₂	MgCO ₃	Ca(OH) ₂	CaCO ₃	H ₂ O	CO ₂
A - 0 C				16,03		7,05
A - 0 NC			9,34	3,78	2,27	1,66
A - 50 C				21,41	2,21	9,41
A - 50 NC			6,32	9,76	1,96	4,29
A - 100 C				37,24	1,01	16,37
A - 100 NC			3,51	19,16	1,35	8,42
B - 0 C		2,51		15,33		8,05
B - 0 NC	5,6		9,38	4,33	4,01	1,91
B - 50 C		2,43		29,87	0,32	14,4
B - 50 NC	5,66		6,8	11,94	3,4	5,25
B - 100 C		2,85		41,85	0,62	19,89
B - 100 NC	8,85		9,63	19,75	5,65	8,68
C - 0 C		3,73		33,09		16,95
C - 0 NC	9,97		18,83	7,87	6,44	3,46
C - 50 C		3,92		37,51		18,53
C - 50 NC	8,74		11,18	9,47	5,42	4,16
C - 100 C		5,48		43,5		21,98
C - 100 NC	11,76		13,02	19,37	6,79	8,51
Cal	31,81		33,42	25,57		11,24
RCD				18,14	0,75	7,97
Cimento				22,54		9,91

Fonte: Autoria própria (2019).

As tendências para os resultados obtidos por análise térmica (Tabela 8) convergem com as encontradas no estudo da captura de CO₂ por meio da avaliação da profundidade carbonatada. Contudo, os quantitativos de CO₂ capturado são distintos, sendo os obtidos via avaliação da profundidade carbonatada superiores aos encontrados na análise térmica.

Tanto pela profundidade de carbonatação como pelas análises térmicas as argamassas que mais capturam o CO₂ são as mistas (cimento e cal), com maior quantidade de RCD incorporado.

5.3.3 Análise mineralógica

Nas Figuras 63 a 66, são apresentados os difratogramas das argamassas em estudo, sendo avaliadas regiões carbonatadas, semi carbonatadas e não carbonatadas.

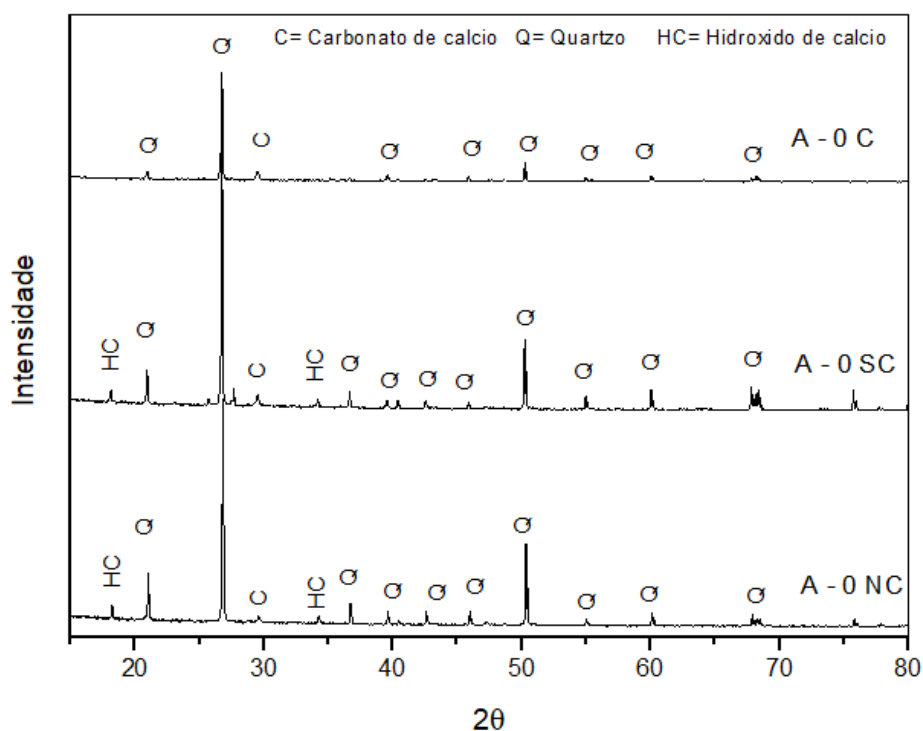


Figura 63: Difratograma das três áreas (carbonatada, semi carbonatada e não carbonatada) das argamassas de cimento, sem resíduo (A - 0)
Fonte: Autoria própria (2019).

Para a argamassa de cimento sem RCD (A-0) é possível observar (ver Figura 63) que existe diferença entre os difratogramas das amostras carbonatadas (C), semi carbonatadas (SC) e não carbonatadas. (NC). Constatou-se que na reação química de carbonatação todo o hidróxido de cálcio presente na matriz cimentante da argamassa reagiu com o CO_2 e formou carbonato de cálcio. Nas amostras carbonatadas nota-se a presença predominante de quartzo (SiO_2) e carbonato de cálcio (CaCO_3). Já nas semi carbonatadas e não carbonatadas, tem-se hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), carbonato de cálcio (CaCO_3) e quartzo (SiO_2).

No Difratograma da Figura 64, nota-se a presença predominante de quartzo, tanto para as argamassas com e sem RCD. Isso pode ser explicado pela composição química do RCD que é composto por 66,6% de quartzo (Tabela 5). Observa-se ainda que as amostras NC, com e sem RCD, possuem hidróxido de cálcio, o qual foi totalmente consumido pela reação de carbonatação, pois este composto não está presente nos difratogramas das amostras carbonatadas.

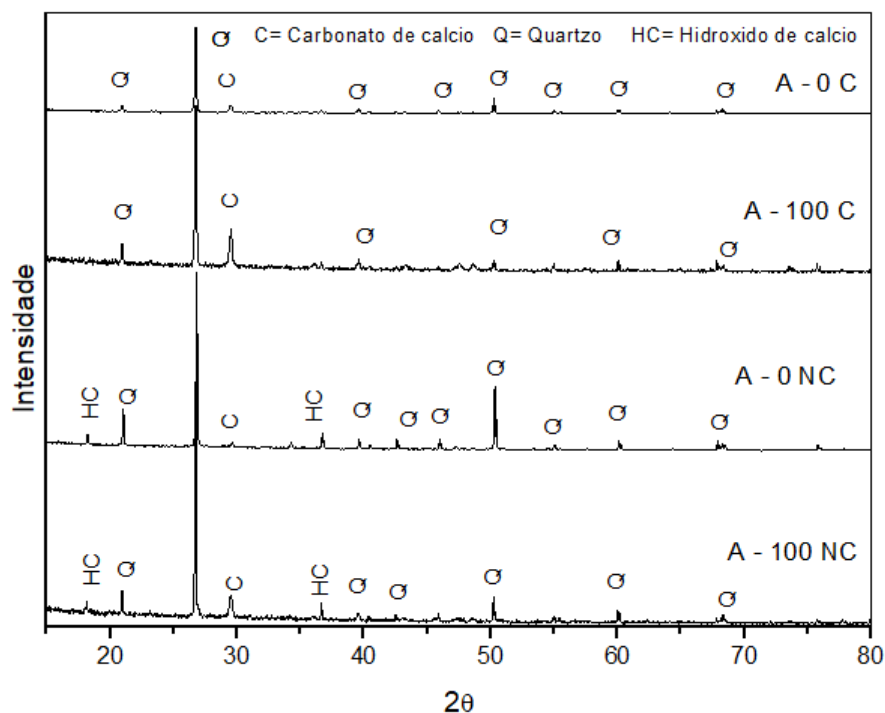


Figura 64: Difratograma das argamassas de cimento, sem resíduo e com 100% de resíduos, carbonatadas e não carbonatadas
Fonte: A autoria própria (2019).

Para as argamassas mistas não carbonatadas (Figura 65) é possível observar a presença de hidróxido de cálcio, quartzo e hidróxido de magnésio ($Mg(OH_2)$). Na amostra carbonatada existe a presença quartzo, de carbonato de magnésio ($MgCO_3$) e carbonato de cálcio. A cal hidratada empregada neste estudo possui 26,9% de óxido de magnésio (MgO) e 41,5 % de óxido de cálcio em sua composição química (ver Tabela 5). Estes óxidos quando hidratados dão origem ao hidróxido de magnésio e de cálcio, (encontrados no difratograma da cal - Figura 30) que na reação de carbonatação reagem com o CO_2 formando o carbonato de magnésio e o carbonato de cálcio, respectivamente.

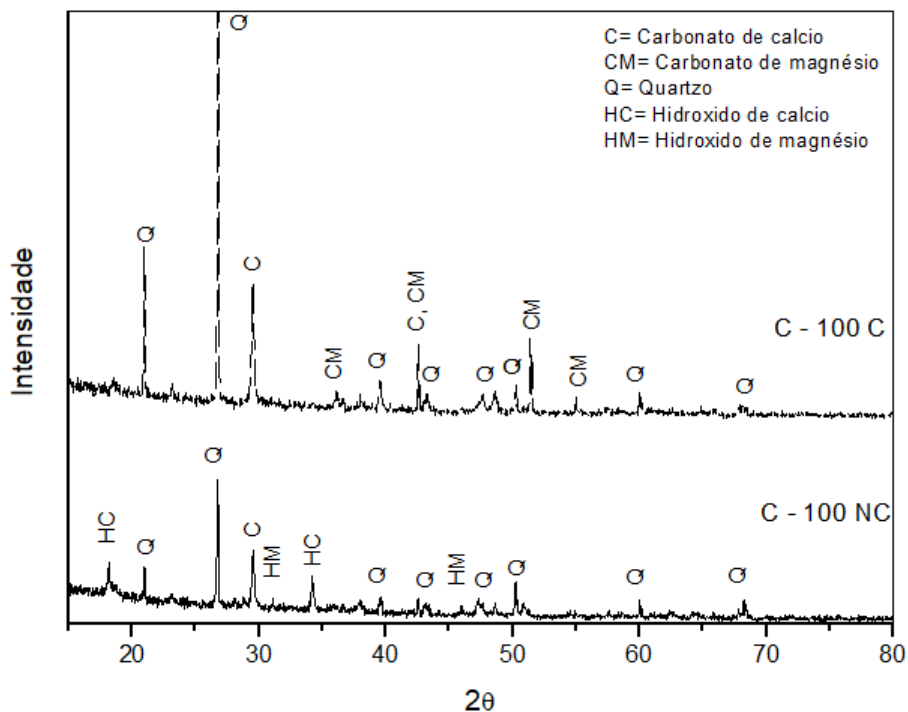


Figura 65: Difratograma das argamassas mistas, tipo C, com 100% de resíduos, carbonatadas e não carbonatadas

Fonte: Autoria própria (2019).

Nos difratogramas da Figura 66, tem-se os espectros das amostras em três temperaturas (ambiente, aquecidas a $350^{\circ}C$ e a $800^{\circ}C$). Em temperatura ambiente as amostras carbonatadas contêm carbonato de cálcio e quartzo, e as não carbonatadas quartzo, carbonato de cálcio e hidróxido de cálcio.

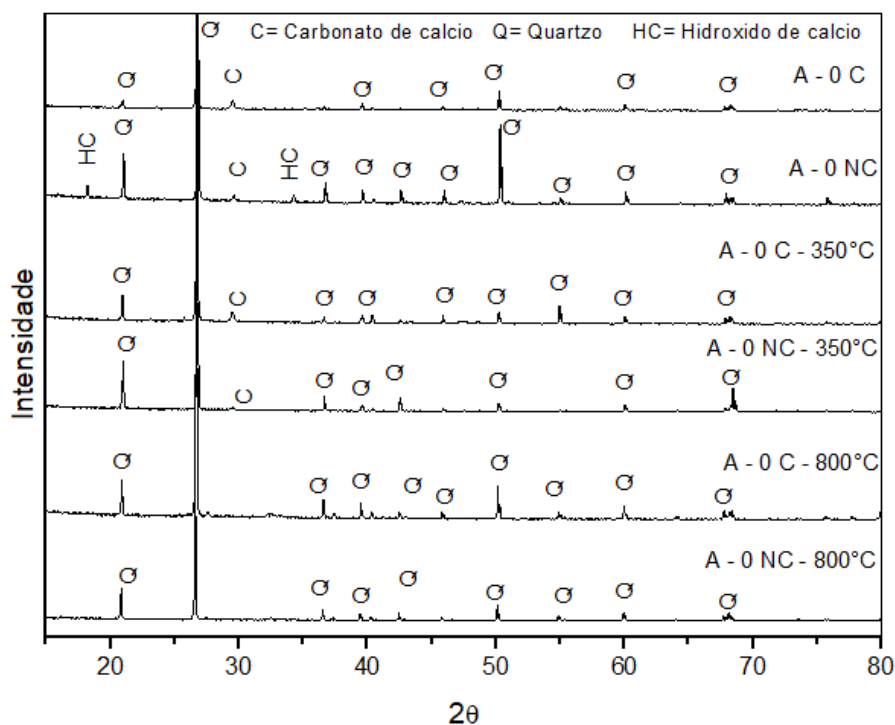


Figura 66: Difratoograma das argamassas de cimento, sem resíduos, em três temperaturas
Fonte: Autoria própria (2019).

Com a elevação da temperatura para 350°C é possível visualizar que não existe mais a presença do hidróxido de cálcio. Em 800 °C o carbonado de cálcio também é ausente. Segundo Neves Junior et.al. (2013) e Scrivener, Snellings e Lothenbach (2016), em torno de 300°C ocorre à decomposição do hidróxido de cálcio e em 800°C ocorre a decomposição do carbonato de cálcio.

Pelo difratograma é possível observar a ausência do pico correspondente a estes materiais com a relação à temperatura de exposição da amostra. Estes resultados convergem com os resultados obtidos pelas análises de TG e DTG.

5.4 BALANÇO DAS EMISSÕES

Para se conduzir o balanço das emissões, faz-se necessário conhecer as emissões associadas à produção das argamassas em estudo, que leva em

consideração as emissões do processo de produção o cimento, cal hidratada e agregados naturais e reciclados.

Os resultados das emissões de CO₂ mínimas (considerado 90% de clínquer no cimento), médias (92% de clínquer no cimento) e máximas (94% de clínquer no cimento), do processo de fabricação de 1 m³ de argamassa estão apresentados na Figura 67. Os resultados detalhados se encontram no Apêndice A.

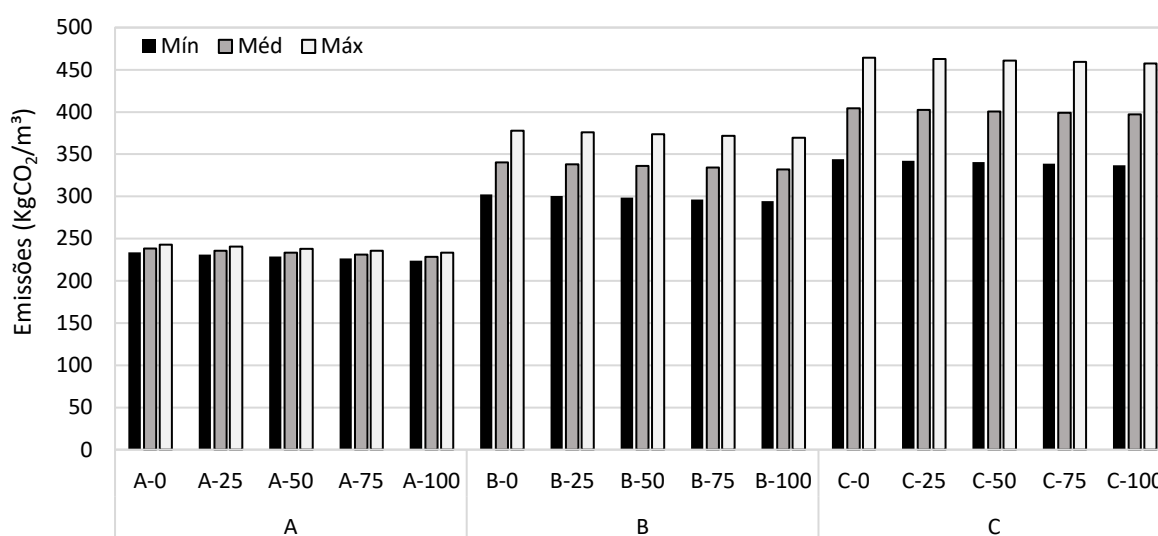


Figura 67: Emissões totais por m³ de argamassa
Fonte: Autoria própria (2019).

A emissão máxima encontrada foi de 464,5 kgCO₂/m³, sendo ela para a argamassa mista tipo C com 0% de RCD e a emissão mínima foi 224 kgCO₂/m³, para a argamassa de cimento tipo A com 100% de RCD (Figura 67).

É possível notar que nas argamassas de cimento (A) as emissões são menores em comparação com as mistas (B e C), chegando a ser 224,4 kgCO₂/m³ inferior. Isso acontece devido à grande quantidade de cal utilizada na fabricação destas argamassas. Por mais que as emissões oriundas do processo produtivo do cimento são maiores que as emissões da cal, nas argamassas mistas a quantidade de cal adicionada foi bem maior que a redução da quantidade de cimento.

A substituição do agregado natural pelo RCD reduz em cerca de 9,6 kgCO₂/m³ as emissões, isto se deve ao fato de que as emissões oriundas da produção do agregado de RCD são menores em comparação com as emissões da produção do agregado natural.

Considerando o tempo de vida útil de 40 anos para vedações externas e 20 anos para vedações internas como é considerado pela NBR 15575 (ABNT, 2013), fixou-se o tempo de vida útil para o cálculo de 20 anos, tanto para emissões, como para a captura.

O balanço das emissões foi realizado com base nas emissões e capturas médias das argamassas (com % de clínquer de 0,92 e %CaO_{cal} de 80%), considerou-se a espessura do revestimento de 20 mm e que as argamassas atingiram ao longo dos 20 anos a profundidade máxima de carbonatação.

As argamassas com cal emitem maior quantidade de CO₂, porém seu potencial de captura também é maior. A substituição da areia natural pelo RCD além de contribuir para a redução das emissões ainda aumenta a captura de CO₂, tornando benéfica a produção de argamassas com RCD (Figura 68).

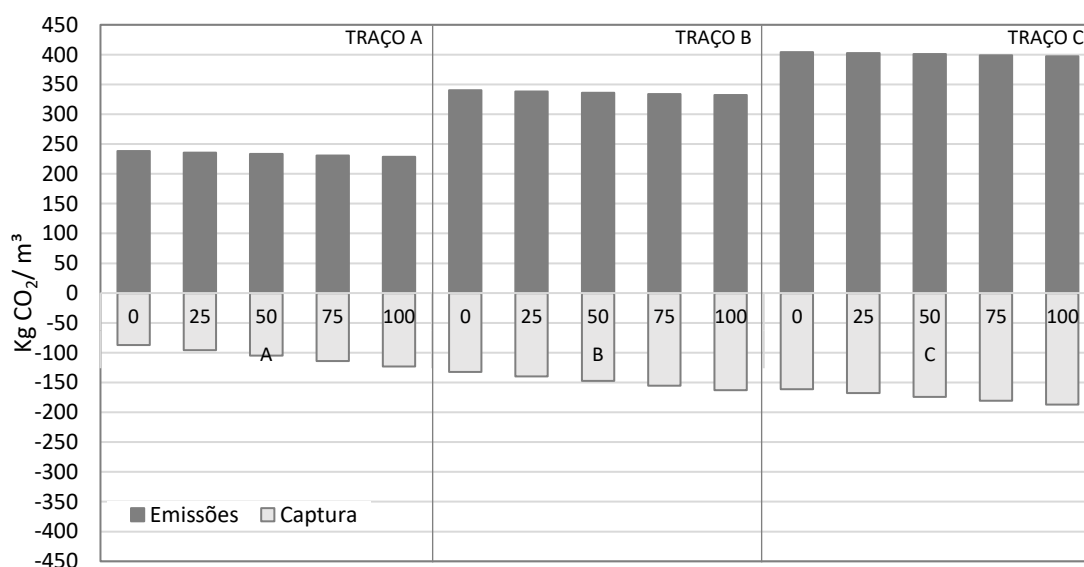


Figura 68: Balanço das emissões
Fonte: Autoria própria (2019).

Na Figura 69, está representado as porcentagens de CO₂ que cada argamassa captura em relação a quantidade de CO₂ que é emitido na produção das mesmas.

Pela análise da profundidade carbonatada, as argamassas são capazes de capturar de 36,5% a 53,8% do CO₂ emitido, dependendo da presença ou não de cal hidratada e da quantidade de RCD utilizado no proporcionamento. As porcentagens

máximas de absorção são as mesmas para todos os ambientes de exposição, o que altera entre eles é o tempo necessário para que isso ocorra. No caso do presente trabalho, as argamassas à base de cimento com 75% e 100% de RCD, atingiram a profundidade de carbonatação máxima de 20 mm aos 266 dias, e, conseqüentemente, a captura máxima de CO₂ possível.

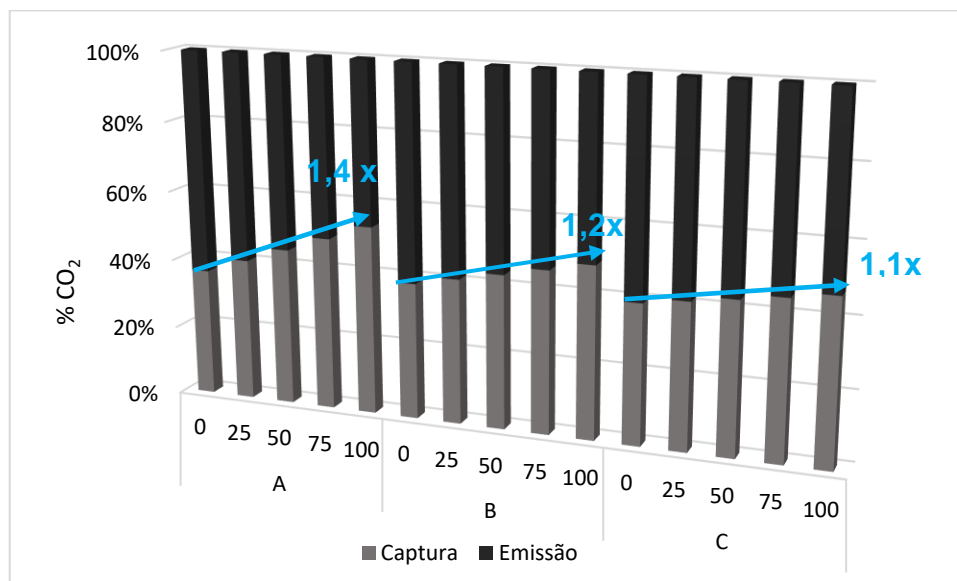


Figura 69: Balanço das emissões em porcentagem
Fonte: Autoria própria (2019).

O melhor balanço das emissões acontece para as argamassas fabricadas com RCD, quanto maior o teor de substituição maior a captura e melhor os resultados do balanço de emissões. A utilização do RCD eleva a captura do CO₂ em até 1,4 vezes para as argamassas de cimento, e 1,2 e 1,1 vezes para as argamassas mistas tipo B e C. Como verificado neste estudo por TG e DRX, o RCD antes de ser utilizado na fabricação das argamassas já possuía CO₂ adsorvido em sua superfície ou capturado na reação com o hidróxido de cálcio, o que contribuiu para o aumento da quantidade de CO₂ capturado nestas argamassas.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

No desenvolvimento do presente estudo, referente à captura de CO₂ de argamassas de revestimento, com e sem cal, produzidas com diferentes teores de substituição de areia natural por areia reciclada de RCD (Resíduo de construção e demolição), foram obtidas as conclusões apresentadas na sequência.

6.1 RCD, PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DAS ARGAMASSAS

O agregado miúdo de RCD empregado possui absorção média de 7,4% sendo composto majoritariamente por resíduos de cerâmica vermelha, argamassa e concreto. Constatou-se por análise termogravimétrica que este agregado se encontrava pré-carbonatado antes da sua utilização para a produção das argamassas.

A presença do RCD interfere nas propriedades físicas e mecânicas das argamassas, em geral a adição do RCD reduz a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão, reduz a densidade das argamassas e, assim, aumenta a absorção de água. Ainda, a adição do RCD reduz o módulo de elasticidade dinâmico, contudo diferentemente da resistência, isso é favorável, pois diminui a rigidez das argamassas e a probabilidade de fissuração.

As argamassas fabricadas com 100% de RCD possuem densidade cerca de 17,92% menor em comparação com as argamassas fabricadas apenas com areia natural, isso acontece devido à menor densidade dos grãos do agregado reciclado. Os grãos do agregado reciclado possuem maior porosidade, por esse motivo as argamassas fabricadas com esse material possuem maior absorção de água.

A queda nas resistências à compressão e flexão das argamassas contendo RCD está diretamente relacionada com o aumento da quantidade de água necessária para obtenção da consistência, que implica em maior porosidade do material no estado endurecido e, conseqüente redução das resistências.

Para as argamassas mistas as propriedades densidade, módulo de elasticidade, resistência à tração na flexão e à compressão foram menores que as argamassas de cimento, contudo a absorção de água por capilaridade foi maior.

As argamassas mistas apresentam densidades menor que as argamassas de cimento, pois em seu processo de fabricação é necessário maior quantidade de água para a maturação da cal. No endurecimento destas argamassas ocorre a perda desta água e com isso tem-se maior quantidade de vazios e, conseqüentemente, uma redução na densidade. Ainda, essas argamassas por apresentarem maior coeficiente de capilaridade, possuem uma maior absorção de água.

A redução nas resistências das argamassas mistas ocorre devido ao menor teor de cimento de sua fabricação e à maior quantidade de água empregada na dosagem para obtenção da consistência alvo.

6.2 CARBONATAÇÃO E CAPTURA DE CO₂

O agregado úmido reciclado de RCD tem influência significativa na profundidade de carbonatação e, conseqüentemente na captura de CO₂ das argamassas produzidas. Quanto maior o teor de RCD empregado, maior a profundidade de carbonatação e a captura de CO₂.

Em argamassas de cimento com 100 % de RCD a profundidade de carbonatação foi 7 mm superior à de referência (sem resíduo) para 266 dias de ensaio natural. Tendo como base de cálculo a espessura de carbonatação de 20 mm, em ambiente interno, a captura de CO₂ máxima aos 266 dias foi de 165,34 KgCO₂/m³, obtida em argamassas mistas produzidas com 100 % de RCD e a captura mínima foi 53,4 KgCO₂/m³ para argamassas de cimento com 0 % de RCD.

O tipo de argamassas (cimentícia ou mista) tem influência significativa nas propriedades das argamassas e, conseqüentemente na captura de CO₂. As argamassas mistas, produzidas com cimento e cal hidratada, tem maior potencial de captura de CO₂ que as de cimento. As argamassas com maior quantidade de cal hidratada podem capturar até 42,35 KgCO₂/m³ a mais que a argamassa cimentícia. Este aumento está relacionado com a quantidade de compostos carbonatáveis da cal hidratada utilizada, ou seja, de materiais que contribuem com a reação química de carbonatação e, conseqüentemente na captura de CO₂.

O ambiente em que as argamassas de revestimento permanecem expostas ao longo de sua vida útil possui influência significativa na captura de CO₂. A captura de

CO₂ é maior em ambiente interno, intermediária em ambiente externo protegido da chuva e menor em ambiente externo desprotegido da chuva.

Amostras expostas em ambiente interno apresentaram potencial de captura duas vezes maior que as argamassas em ambiente externo desprotegido. As argamassas expostas em ambiente interno chegaram a capturar 84,7 Kg de CO₂/m³ a mais que as argamassas expostas em ambiente externo desprotegido. Este aumento na captura deve-se à maior concentração de CO₂ em ambientes fechados e com circulação de pessoas e a maior facilidade de difusão do CO₂ devido a não saturação dos poros do material.

A espessura do revestimento argamassado possui influência na profundidade de carbonatação e na captura de CO₂. O tempo para o qual a profundidade de carbonatação máxima seja alcançada varia de acordo com o ambiente de exposição, sendo atingido primeiro pelas argamassas do ambiente interno, seguido do externo protegido da chuva e por último do externo desprotegido da chuva.

No caso do presente trabalho, as argamassas à base de cimento com 75 e 100 % de RCD, atingiram a profundidade de carbonatação máxima de 20 mm aos 266 dias, e conseqüentemente, a captura máxima de CO₂ possível.

6.3 BALANÇO DE EMISSÕES

A captura de CO₂ através da carbonatação natural de argamassas de revestimento pode ser considerada uma medida compensatória para o ciclo de vida das construções. Tanto para a captura de CO₂ determinada pela profundidade de carbonatação, que leva em consideração a espessura dos revestimentos argamassados e apresenta resultados em Kg de CO₂ por m³ de argamassa, como por análises térmicas onde os resultados apresentados são em porcentagens de CO₂ capturado para a quantidade de material estudado, os resultados deste estudo indicaram que a captura de CO₂ foi maior para as argamassas mistas com maior quantidade de RCD incorporados.

O melhor balanço das emissões encontrado foi para as argamassas com RCD. Este resíduo, além de reduzir as emissões também acelera a captura de CO₂, pois

como verificado pela TG e DTG antes de serem inseridos nas argamassas os RCD's já se encontram pré-carbonatados, além de serem materiais mais porosos, por isso aceleram o processo de captura de carbono. As argamassas fabricadas com RCD aumentam a captura de CO₂ em até 1,4 vezes em relação às de referência.

Para as argamassas mistas o balanço das emissões também foi satisfatório, pois por mais que em seu processo de fabricação emitem uma maior quantidade de CO₂, possuem um maior potencial de captura de CO₂ em relação as argamassas de cimento.

Pelo método da profundidade de carbonatação as argamassas em estudo possuem capacidade de reabsorver entre 36,5% a 53,8% do CO₂ emitido em sua produção, dependendo da presença ou não de cal hidratada e da quantidade de RCD utilizado na sua fabricação.

6.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos, sugerem-se trabalhos futuros os seguintes temas:

- a) O estudo da influência da proteção superficial (sistema de pintura, revestimento cerâmicos, etc.) das argamassas de revestimento na captura de CO₂ ao longo do tempo
- b) O estudo da captura de CO₂ em traços de argamassas de revestimento comumente empregados no país, com e sem aditivos substitutivos da cal.
- c) Estudo comparativo da estimativa da captura de CO₂ por diferentes métodos de análise (térmica e profundidade carbonatada por indicador químico).

REFERÊNCIAS

ABRECON. **Pesquisa Setorial Abrecon 2014-2015**. 2015. Dispo [https://abrecon.org.br/pesquisa_setorial/nível](https://abrecon.org.br/pesquisa_setorial/nivel) em: < https://abrecon.org.br/pesquisa_setorial/> Acesso em: 28 fev. 2019.

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**, 2017. Disponível em: < https://belasites.com.br/clientes/abrelpe/site/wp-content/uploads/2018/09/SITE_grappa_panoramaAbrelpe_ago_v4.pdf >. Acesso em: 28 fev. 2019.

ALI, M. B.; SAIDUR, R.; HOSSAIN, M. S. A review on emission analysis in cement industries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 5, p. 2252–2261, 2011.

ANDRADE, J.J.D.O. et al. Evaluation of mechanical properties and carbonation of mortars produced with construction and demolition waste. **Construction and Building Materials**. Pag 70-83. 2018.

ANDRADE, C.; SANJUÁN, M.A. Updating Carbon Storage Capacity of Spanish Cements. **Sustainability**. <https://doi.org/10.3390/su10124806>. 2018

ÂNGULO, S. C. et al. Resíduos de construção e demolição: avaliação de métodos de quantificação. **Eng Sanit Ambient**. V.16, n.3, p. 299-306. 2011.

ANGULO, S. C.; FIGUEIREDO, A. D. Concreto com agregados reciclados. Instituto Brasileiro do Concreto – **Capítulo 47 do Livro Concreto: Ciência e Tecnologia**. Jan.2011.

ANTONIO, I. de O. **Captura de CO₂ em argamassas de revestimento**. Relatório de pesquisa - PIBIC-CNPq. Orientação Edna Possan. Unila, 2018

ARAÚJO, N. N. **Desempenho de Argamassas de Revestimento Produzidas com Agregado Reciclados Oriundos do Resíduo de Construção e Demolição da Grande Natal - RN**. Dissertação de mestrado - UFRN. Natal. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos do Brasil 2016**. São Paulo, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578**: Cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Desempenho de edificações habitacionais. Rio de Janeiro, 2013.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6474/2000 NM 23**: Cimento Portland – Determinação da Massa Específica. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175** Cal hidratada para argamassas - Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776**: Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 284**: Calibrador anel liso cilíndrico “passa” e anel padrão liso cilíndrico para regulagem com diâmetro nominal de 1 mm a 315 mm para uso em mecânica de precisão. Rio de Janeiro, 2003.

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

BRASIL. Resolução CONAMA nº 307 de 5 de Julho de 2002. **Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da Construção Civil**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>> Acesso em: 25 jun. 2018.

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

CABRAL, A.E.B. et al. **Desempenho de concretos com agregados reciclados de cerâmica vermelha**. Cerâmica 55. Pag 448-460. 2009.

CAFANGE, D. M.P.J. **Estudo de métodos e medidas auxiliares para o controle da resistência à carbonatação de concretos estruturais de cimento portland**. Dissertação de Mestrado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, do Programa de Engenharia de Construção Civil e Urbana. São Paulo, 2011.

CAMPELLO, E. de. F. **Comportamento Mecânico de Argamassas Reforçadas por Fibras Sintéticas e Metálicas**. Tese de doutorado em Engenharia Civil submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2013.

CARASEK, H. Argamassas. In: **Capítulo 26 do Livro: Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo 2010.

CASALI, J.M.; GAVA, G.P.; PRUDÊNCIO, L.R.J. Avaliação do desempenho de aditivos hidrofugantes e impermeabilizantes empregados em argamassas de assentamento para alvenaria estrutural. **Anais...** Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído - Entac, Florianópolis, 2006.

CONTRERAS, M. et al. "Recycling of construction and demolition waste for producing new construction material (Brazil case-study)," **Construction and Building Materials**, vol. 123, pp. 594-600, 2016.

COSSOLINO, L.C.; PERREIRA, A.H.A.; **Informativo Técnico-Científico ITC-ME/ATCP: Módulos elásticos: visão geral e métodos de caracterização**. ATCP Engenharia Física, 2010.

DAMIN O. C. B.; JUNIOR, D. M.; SANTOS, A. R. Sequestro de dióxido de carbono (CO₂) por resíduos de construção e demolição. **Unisanta Science and Technology**. v. 2, p. 50–55, 2013.

DENARI, G. B.; CAVALHEIRO, E. T. G.; **Princípios e aplicações de análise térmica**. Material de apoio do curso de Química. Universidade de São Paulo. São Carlos, São Paulo. Jul. Ago. 2012.

DILONARDO, I. et al. Avaliação metodológica da medida de carbonatação de microconcretos. In: 57° CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. 2015, Bonito. **Anais...Bonito**: Ibracon, 2015.

ELENI, D. et al. Literature study on the rate and mechanism of carbonation of lime in mortars. **9 th International Masonry Conference 2014 in Guimarães**. Portugal, 2014.

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.

FELIX, E.F.; POSSAN, E. Balanço das emissões e da captura de CO₂ em estruturas de concreto: simulação em função do consumo e tipo de cimento. **Revista Ibracon de Estruturas e Materias**. v. 11, p. 135 - 162, 2018.

FERREIRA, R.L.D.S. **Efeitos da incorporação de areia reciclada de resíduos de construção e demolição (rcd) em argamassas mistas de revestimento**. Dissertação do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2017.

FIGUEIREDO, C. R.; NEPOMUCENO, A. A. Relação entre a carbonatação e a absorvidade em edificações de concreto em Brasília. In: XI ENCONTRO

NACIONAL NO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ENTAC 2006, Florianópolis/ SC.
Anais...Florianópolis: Entac, 2006.

FURCAS, C. et al. Evaluation of CO₂ Uptake under Mild Accelerated Carbonation Conditions in Cement-Based and Lime-Based Mortars. **Advanced Materials Research**, v. 980, n. 2, p. 57–61, 2014.

GABROVSEK, R; VUK, T; KAUCIC, V. The Preparation and Thermal Behavior of Calcium Monocarboaluminate. **Acta Chim. Slov**, p. 942–950, 2008.

GARCIA, I. G; PERDRIX, C. A; RÁBADE, M. P; PERIS, P. M; AGÜI, J. C. L; BARBUDO, M. A. S. Estudio Del Efecto sumidero de CO₂ de los Materiales de Base cemento. **Cemento Hormigón**. Nº 939. Jul/ago 2010.

GNR Project. **Dados do ano 2016**. [S.l.], 2019. Disponível em: <
<http://www.wbcscement.org/GNR-2016/index.html>>. Acesso em: 10 jan. 2019.

GONÇALVES, R. D.C. **Agregados reciclados de resíduos de concreto - um novo material para dosagens estruturais**. Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, do Programa de Engenharia de Estruturas. São Carlos, 2001.

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.

HUIJGEN, W. J. J.; COMANS, R. N. J. Carbon dioxide Sequestration by mineral carbonation. **Energy**, p. 1-52, Fevereiro 2003. ISSN ECN-C--03-016.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate change 2014: Synthesis Report**. Geneva, Switzerland, 2015.

IONASHIRO, M. **Princípios Básicos da Termogravimetria e Análise Térmica Diferencial/ Calorimetria Exploratória Diferencial**. São Paulo. Giz editorial. 2004.

ISAIA, Geraldo Cechella; GASTALDINI, Antonio Luiz Guerra. **Perspectivas ambientais e econômicas do concreto com altos teores de adições minerais: um estudo de caso**. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Ambiente Construído, Porto Alegre, v.4, n. 2, p. 19-30, abr./jun. 2004.

JOCHEM, L. F. **Estudo das argamassas de revestimento com agregados reciclados de RCD: características físicas e propriedades da microestrutura.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2012.

JOHN, V. M. et al. Potencial de mitigação de CO₂ de materiais cimentícios na fase de uso. In: XVII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ENTAC. 2018, Foz do Iguaçu. **Anais....**São Paulo: ANTAC, 2018.

JOHN, V. M.; PUNHAGUI, K. R. G.; CINCOTTO, M. A. **Produção de cal.** Economia de Baixo Carbono - Impactos de Novos Marcos Regulatórios e Tecnologias Sobre a Economia Brasileira. Ribeirão Preto: Funpec Editora, 2014. p. 371–400. ISBN: 978-85-7747-103-4.

JOHN, V. M. Repensando o papel da cal hidratada nas argamassas. In: V SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA - SBTA. 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ANTAC, 2003.

KALIYAVARADHAN. S.K.; LING. T. Potential of CO₂ sequestration through construction and demolition (C&D) waste—An overview. **Journal of CO₂ Utilization.** Pag 234–242.2017.

KOCHEM, K. **Potencialidades de logística reversa do resíduo de gesso da indústria da construção civil.** Dissertação de mestrado. Programa de pós-graduação em tecnologias ambientais. UTFPR, Medianeira, 2016.

KRUGER, P.; SOUZA, A. B. S.; KONOFAL, W. U. Estudo da trabalhabilidade em argamassas e concretos com utilização de RCD . **8º Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais.** 2013.

LAGERBLAD, B. Carbon dioxide uptake during concrete life cycle - State of the art. **Swedish Cement and Concrete Research Institute.** Estocolmo, Suécia, 2005.

LEEMANN, A. et al. Relation between carbonation resistance, mix design and exposure of mortar and concrete. **Constructions and Building Materials**, n. 62, p. 33-43, 2015.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

LIMA, J. A. R. **Avaliação das consequências da produção de concreto no Brasil para as mudanças climáticas**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

LOVATO, P.S. et al. Modeling of mechanical properties and durability of recycled aggregate concretes. **Constructions and Building Materials**, n. 26, p. 437-447, 2012.

MARCOS, M. H. C. **Análise da emissão de CO₂ na fase pré-operacional da construção de habitações de interesse social através da utilização de uma ferramenta cad-bim**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2009.

MARGALHA, M. G. **Argamassas**. Documento de apoio às aulas de Conservação e Recuperação do Patrimônio da Universidade de Évora do curso de Engenharia Civil. Portugal, 2011.

MARTÍNEZ, P.S. et al. Comparative study of three types of fine recycled aggregates from construction and demolition waste (CDW), and their use in masonry mortar fabrication. **Journal of Cleaner Production**. Madrid, Espanha, 2016.

MATTANA, A. J. **Estudos de cales hidratadas de mercado - caracterização química, física e comportamento reológico da pasta**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedade e materiais**. São Paulo: Ibracon, 2008.

MENDONÇA, A. M. G. D. et al. Expansão por umidade de revestimentos cerâmicos incorporados com resíduos de granito e caulim. **Cerâmica**. n.58. p. 216-224, 2012.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÃO E COMUNICAÇÃO - (MCTIC). **Terceira Edição das Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil**, 2016. Disponível em: <www.sirene.mcti.gov.br/publicacoes>. Acesso em: 25/maio 2018.

MO, L.; PANESAR, D.K.; Accelerated carbonation – A potential approach to sequester CO₂ in cement paste containing slag and reactive MgO. **Cement & Concrete Composites**. Pag 69-77. 2013

MOTHÉ, C. G.; AZEVEDO, A. D. **Análise térmica de materiais**. São Paulo. Artliber, 2009.

MUÑOZ-RUIPEREZ, C. et al. Lightweight masonry mortars made with expanded clay and recycled aggregates. **Construction and Building Materials**. Pag 139-145.2016.

NENO, C; BRITO, J. D; VEIGA, R. Using Fine Recycled Concrete Aggregate for Mortar Production. **Materials Research**. Pag. 168-177. 2014.

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

NEVES JUNIOR, A; **Captura de CO₂ em materiais cimentícios através de carbonatação acelerada**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2014.

NEVES JUNIOR, A.; FILHO, R.D.T.; DWECK, J CO₂ sequestration by high initial strength Portland cement pastes. **J Therm Anal Calorim**. March/2013.

NEVES JUNIOR, A. et al. Early stages hydration of high initial strength Portland cement. **J Therm Anal Calorim**. 2013.

NEVES JUNIOR, A. et al. Determination of CO₂ capture during accelerated carbonation of engineered cementitious composite pastes by thermogravimetry. **J Therm Anal Calorim**. 2019.

NUNES, K. R. A. et al. Evaluation of investments in recycling centres for construction and demolition wastes in Brazilian municipalities. **Waste Management**. v. 27, p. 1531-1540. 2007. Disponível em: <doi:10.1016/j.wasman.2006.09.007> Acesso em: 28 fev. 2019.

OLIVEIRA, M. E. D. et al. Diagnóstico da geração e da composição dos RCD de Fortaleza/ CE. **Eng Sanit Ambient**, v.16, n.3, jul/set, 2011.

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.O.; OLIVEIRA, R.A. Controle de qualidade da cal para argamassas metodologias alternativas. **Revista Ciências e Tecnologia**. Universidade Católica de Pernambuco. Recife, Pernambuco.2007.

PAULETTI, C.; POSSAN, E.; MOLIN, D. C. C. D. Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 7, n.4, p. 7-20, out./ dez. 2007.

PEREIRA, M. V. et al. On the Strengthening of Cement Mortar by Natural Fibers. **Materials Research**. v. 18, p. 177 - 183, 2015.

POSSAN, E. et al. CO₂ uptake potential due to concrete carbonation: A case study. **Case Studies in Construction Materials**, v. 6, p. 147–161, 2017.

POSSAN, E.; FELIX, E. F.; THOMAZ, W. A. CO₂ uptake by carbonation of concrete during life cycle of building structures. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 1, n. 1, p. 7, 2016.

PROOXYGEN - CO₂ ICE CORE DATA. **1,000 Years CO₂ Data**. 2018. Disponível em: <<https://www.co2.earth/co2-ice-core-data>> Acesso em: 13 março. 2019.

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

RUDNITSKI, J.C.; NAKANISHI, E. Y. B.; MOHAMAD, G. Avaliação de Resíduo de Construção e Demolição de Cor Cinza e Vermelho em Argamassa de Revestimento. **Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis**. March, 2014.

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

SEEG - SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. **Estimativa de emissões de gases de efeito estufa no Brasil em 2016**. Disponível em: < <http://plataforma.seeg.eco.br/territories/parana/card?year=2016> >. Acesso em: 26 de jul. 2018.

SEEG - SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. **Emissão de gases de efeito estufa no Brasil em 2017.**

Disponível http://seeg.eco.br/wp_content/uploads/2018/11/SEEG_PR_full_final.pdf.

Acesso em: 28 de jul. 2018.

SILVA, F. G. S. **Proposta de metodologias experimentais auxiliares à especificação e controle das propriedades físico-mecânicas dos revestimentos em argamassa.** Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília. Brasília, 2006.

SILVA, J.; BRITO, J. D.; VEIGA, R. Incorporation of fine ceramics in mortars. **Construction and Building Materials.** Pag 556-564.2007.

SILVA, N. G. D.; CAMPITELI, V. C. Influência dos finos e da cal nas propriedades das argamassas. **XI Encontro Nacional no Ambiente Construído - ENTAC.** Florianópolis/ SC. 2006.

SILVA, R. D. P. Argamassas Com Adição De Fibras De Polipropileno – **Estudo Do Comportamento Argamassas Com Adição De Fibras De Polipropileno – Estudo Do Comportamento.** p. 176, 2006b.

SINGH, N.; SINGH, S. P.; Carbonation resistance and microstructural analysis of Low and High Volume Fly Ash Self Compacting Concrete containing Recycled Concrete Aggregates. **Construction and Building Materials.** Pag 828-842.2016.

SNIC - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Resultados Preliminares .** Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <<http://www.snic.org.br/pdfresultado/Resultados%20Preliminares%20Julho%202017.pdf>>. Acesso em: 26 de jul 2018.

SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2017.** Brasília, 2019.

STANMORE, B.R.; GILOT, P. Review—calcination and carbonation of limestone during thermal cycling for CO₂ sequestration. **Fuel Processing Technology.** p. 1707 – 1743, 2005.

THOMAS, C. et al. Durability of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 1054-1065, 2014. ISSN 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.106.

USGS. **Mineral Commodity Summaries 2017**, 2017. Disponível em: <<https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement/mcs-2017-cemen.pdf>>. Acesso em: 10 de agosto 2018.

WBCSD - WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT; IEA INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Guidelines for Emissions Monitoring and Reporting in the Cement Industry**. Cement Sustainability Initiative. 2012. Disponível em: < <https://www.wbcsd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative/Resources/Guidelines-for-Emissions-Monitoring-and-Reporting-in-the-Cement-Industry> >. Acesso em : 23 de maio de 2018.

WBCSD - WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT; IEA INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Cement Technology Roadmap 2009 - Carbon emissions reductions up to 2050**. França: OECD/IEA/WBCSD, 2009. Disponível em:<<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Cement.pdf>> . Acesso em: 04/jul.2018.

Xi, F. et al. Substantial global carbon uptake by cement carbonation. **Nature Geoscience**. Nov/2016. DOI: 10.1038/NGEO2840

XUAN, D.; POON, C. S. Sequestration of carbon dioxide by RCAs and enhancement of properties of RAC by accelerated carbonation. **New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete**. p.477 – 497. 2019.

XUAN, D.; ZHAN, B.; POON, C. S. Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**. v. 65. p. 67 – 74. 2016.

YANG, H. et al. Progress in carbon dioxide separation and capture: A review. **Journal of Environmental Sciences**. v. 20. p. 14–27. 2008.

YUAN, H.; SHEN, L. Trend of the research on construction and demolition waste management. **Waste Management**. v. 31. p. 670-679. 2011 Disponível em:< <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.10.030>> Acesso em: 10/jan.2019.

YOU, K. et al. Effect of CO₂ Carbonation on the Chemical Properties of Waste Cement: CEC and the Heavy Metal Adsorption Ability. **Materials Transactions**. v. 52. P. 1679-1684. 2011.

ZHAO, Z. et al. Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars. **Construction and Building Materials**. Pag 179-186.2015.

APÊNDICE A

Tabela 9: Massa específica da areia natural e reciclada

Dados	AREIA NATURAL		AREIA RECICLADA		
	1° Medida	2° Medida	1° Medida	2° Medida	3° Medida
m (g)	540,08	565,6	496,4	532,1	505,12
	642,14	642,36	642,36	642,36	642,36
	674,98	678,56	658	686,22	673,26
	592,42	622,95	521,83	608,23	557,62
	52,34	57,35	25,43	76,13	52,5
μ (g/cm ³)	2,78	2,81	2,42	2,44	2,43
μ (g/cm ³)	2,80		2,43		

Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 10: Massa específica do cimento

Cimento CP II F			
Dados	1° Medida	2° Medida	3° Medida
Vinic. (ml)	0,3	0,4	1
m (g)	60	60	59,9
Vfinal (ml)	19,3	19,87	20,3
μ (g/cm ³)	3,16	3,08	3,10
μ (g/cm ³)	3,10		

Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 11: Massa específica da cal

Cal			
Dados	1° Medida	2° Medida	3° Medida
Vinic. (ml)	0,2	0,6	0,2
m (g)	50	50	50
Vfinal (ml)	20	20	20
μ (g/cm ³)	2,58	2,65	2,58
μ (g/cm ³)	2,60		

Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 12: Massa unitária areia natural e reciclada

Dados	AREIA NATURAL		AREIA RECICLADA	
	1° Medida	2° Medida	1°Medida	2°Medida
m + rec (kg)	19,03	19,02	16,15	16,43
Peso rec. (kg)	7,82	7,82	7,82	7,82
m (kg)	11,21	11,2	8,33	8,61
Volume (dm ³)	6,8	6,8	6,8	6,8
mu (g/cm ³)	1,65	1,65	1,23	1,27
mu (g/cm³)	1,65		1,25	

Fonte: Aatoria própria (2019).

Tabela 13: Massa unitária do cimento

CP II -F			
Dados	1° Medida	2° Medida	3°Medida
Vrec. (ml/dm ³)	400	400	400
m (g)	456,2	454,5	455,8
mu (g/cm ³)	1,140	1,136	1,139
mu (g/cm³)	1,14		

Fonte: Aatoria própria (2019).

Tabela 14: Massa unitária da cal

Cal			
Dados	1° Medida	2° Medida	3°Medida
Vrec. (ml/dm ³)	400	400	400
m (g)	253,9	243,6	243,6
mu (g/cm ³)	0,634	0,609	0,609
mu (g/cm³)	0,62		

Fonte: Aatoria própria (2019).

Tabela 15: Resultados de módulo e densidade

Amostra	Módulo	Densidade
A - 0	25,18667	2,12211114
A - 25	18,89333	1,97710184
A - 50	15,51	1,91444519
A - 75	11,57	1,83687641
A - 100	9,263333	1,74903234
B - 0	16,85667	2,01292445
B - 25	12,76333	1,89626979
B - 50	11,55667	1,84809944
B - 75	9,743333	1,83563308
B - 100	8,813333	1,71227447
C - 0	9,223333	1,84351125
C - 25	8,703333	1,77862735
C - 50	8,79	1,79544786
C - 75	7,89	1,73953011
C - 100	6,716667	1,65217255

Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 16: Resultados da absorção por capilaridade

Amostra	Absorção por capilaridade média (%)							
	15min	30min	45min	1h	1:30h	2h	3h	24h
A - 0	3,166846	4,51157941	5,126406	5,509592	6,026017	6,417832	7,005456	9,188188
A - 25	2,604392	3,78824771	4,394348	4,915357	5,692124	6,213238	6,791098	10,14435
A - 50	3,77411	5,03846755	5,675522	6,185082	6,968964	7,537379	8,2431	12,05551
A - 75	5,68271	7,20920383	7,931165	8,498448	9,230709	9,705132	10,37553	14,73833
A - 100	7,371246	8,7753787	9,402967	9,924198	10,59439	11,09434	11,82833	17,1257
B - 0	5,92966	6,95567333	7,396556	7,792551	8,413353	8,935275	9,763099	11,41001
B - 25	7,038348	8,82899265	9,549005	10,08899	10,9699	11,66147	12,64673	13,93525
B - 50	6,254268	7,9759829	9,007001	9,600317	10,40761	11,0301	11,96387	15,45569
B - 75	8,814042	10,7879922	11,75435	12,3918	13,43033	14,26326	15,48702	18,58197
B - 100	9,34382	11,5789627	12,71872	13,428	14,44874	15,27608	16,49005	20,10158
C - 0	9,085064	10,4225208	11,32062	12,05621	13,22184	14,18671	14,80716	15,11281
C - 25	10,25898	11,7004917	12,68784	13,51724	14,86992	15,94606	16,44947	16,80492
C - 50	8,578081	10,5695181	11,43768	12,11174	13,16368	14,06235	15,4513	17,96367
C - 75	10,18611	12,1613257	13,09118	13,83083	15,01433	16,03924	17,61369	20,05283
C - 100	12,87816	14,3678862	15,36098	16,21069	17,55702	18,69371	20,37115	22,31314

Fonte: Autoria própria (2019)

Tabela 17: Resultados da profundidade de carbonatação média, ambiente interno.

Profundidade de Carbonatação Média/ Interno					
Amostra	28	63	96	148	266
A - 0	2,9075	4,71375	6,9775	8,11875	12,275
A - 25	3,1875	4,95625	7,4375	9,28625	13,22375
A - 50	3,6575	6,83375	8,8325	10,945	17,905
A - 75	4,95	8,13625	11,0975	14,01375	20
A - 100	5,11125	9,54875	12,57	16,29125	20
B - 0	2,51375	5,03625	6,0225	7,77125	11,0575
B - 25	3,2	5,18125	6,77125	8,84625	12,6375
B - 50	3,3475	5,7425	7,0375	9,41	13,56
B - 75	3,92625	6,71625	8,33625	11,07375	17,65875
B - 100	3,72375	6,6775	8,39	10,64	15,62125
C - 0	3,26	5,535	7,095	9,47375	13,49625
C - 25	3,35	5,55	7,11125	9,575	13,8375
C - 50	3,39875	5,87625	7,4825	9,50375	13,90125
C - 75	3,85375	6,5	7,76625	10,53875	15,36
C - 100	4,14875	6,9925	9,0525	11,5725	17,6825

Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 18: Resultados da profundidade de carbonatação média, ambiente externo protegido.

Profundidade de Carbonatação Média/ Ex.P					
Amostra	28	63	96	148	266
A - 0	3,295	4,89875	6,2875	6,86875	10,04125
A - 25	3,67875	5,58875	7,3325	8,54	11,64
A - 50	4,312857	7,23625	8,085	10,35	14,5025
A - 75	4,61625	8,88875	10,55	13,13125	19,78375
A - 100	6,37375	10,22	12,8425	15,685	20
B - 0	2,99375	5,48	6,555	7,73375	10,4975
B - 25	3,4275	5,31875	7,00375	8,47625	11,325
B - 50	3,55875	5,775	7,0725	8,57125	12,23375
B - 75	4,6	6,9825	8,47375	11,085	14,945
B - 100	4,14375	5,83875	8,51375	10,26875	14,04125
C - 0	3,34125	5,02875	6,77375	8,615	11,23
C - 25	3,54125	5,03	7,0875	9,09625	11,5675
C - 50	3,59125	5,0425	7,0975	9,0925	11,75625
C - 75	4,0175	5,50625	7,6025	9,66375	12,8175
C - 100	4,17	6,14875	8,5875	11,2575	15,0425

Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 19: Resultados da profundidade de carbonatação média, ambiente externo desprotegido da chuva

Amostra	Profundidade de Carbonatação Média/ Ex/D				
	28	63	96	148	266
A - 0	0	4,52875	5,5675	6,415	8,79125
A - 25	1,69	4,8625	6,5475	7,035	9,24
A - 50	1,5725	5,8625	6,765	8,65875	11,7175
A - 75	1,95875	7,2275	9,3825	10,27625	13,60125
A - 100	2,54625	8,2525	10,415	12,1325	17,6225
B - 0	0	3,37875	4,275	4,26125	3,9175
B - 25	2,50625	3,8675	4,395	5,3175	5,435
B - 50	2,60625	4,41875	4,985	6,0775	7,19875
B - 75	3,665	5,69	6,3325	7,9325	10,4025
B - 100	2,88	4,9025	6,35625	7,8875	10,34875
C - 0	1,7025	3,42	3,96125	3,63875	2,50375
C - 25	1,79875	3,44375	4,125	3,86625	2,545
C - 50	2,07125	3,5	4,245	3,9225	2,83875
C - 75	2,4325	3,61625	4,56	5,13	4,65125
C - 100	2,8325	4,33	6,13125	7,015	8,625

Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 20: Resultados da resistência à tração na flexão e resistência à compressão, aos 28 e 63 dias.

Amostra	28 dias		63 dias	
	Rc	Rt	Rc	Rt
A - 0	13,44271	3,382813	15,88542	4,546875
A - 25	11,63646	3,34375	14,33021	3,664063
A - 50	10,79896	2,929688	12,3625	3,4375
A - 75	8,467708	2,617188	10,91354	3,085938
A - 100	8,114583	2,359375	9,842708	3,125
B - 0	10,33646	2,796875	12,6125	3,265625
B - 25	10,18646	2,335938	9,517708	2,953125
B - 50	10,35729	2,492188	10,54688	2,679688
B - 75	8,832292	2,21875	9,007292	2,492188
B - 100	7,9125	2,625	9,767708	2,71875
C - 0	5,629167	1,664063	6,009375	1,625
C - 25	5,904167	1,632813	6,084375	1,765625
C - 50	6,26875	1,875	7,620833	2,257813
C - 75	6,288542	1,757813	7,192708	2,054688
C - 100	5,815625	1,742188	6,655208	2,109375

Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 21: Resultados das emissões mínimas, médias e máximas.

Emissões das argamassas			
Amostra	Mín	Méd	Máx
A - 0	281,439	286,0458	290,6526
A - 25	283,0349	287,6417	292,2485
A - 50	284,6308	289,2376	293,8444
A - 75	286,2267	290,8335	295,4402
A - 100	287,8226	292,4293	297,0361
B - 0	342,9713	380,6231	418,275
B - 25	344,3214	381,9733	419,6251
B - 50	345,6716	383,3235	420,9753
B - 75	347,0218	384,6736	422,3255
B - 100	348,372	386,0238	423,6757
C - 0	378,0947	438,3811	498,6674
C - 25	379,2347	439,521	499,8073
C - 50	380,3746	440,6609	500,9472
C - 75	381,5145	441,8008	502,0871
C - 100	382,6544	442,9407	503,2271

Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 22: Resultados da captura de CO₂ mínima, média e máxima, em idade de 266 dias, e espessura do revestimento de 20 mm.

Captura de CO₂ por m³ de argamassas, idade de 266 dias e espessura de 20 mm

	Interno			E. P			E. D		
	Mín	Méd	Máx	Mín	Méd	Máx	Mín	Méd	Máx
A - 0	52,23	53,39	54,55	42,73	43,67	44,62	37,41	38,24	39,06
A - 25	62,22	63,47	64,72	54,77	55,87	56,97	43,47	44,35	45,22
A - 50	92,30	93,99	95,68	74,85	76,23	77,60	60,48	61,59	62,70
A - 75	112,10	113,99	115,88	110,89	112,76	114,63	76,23	77,52	78,81
A - 100	121,10	122,99	124,88	121,10	122,99	124,88	106,70	108,37	110,04
B - 0	65,03	73,14	81,26	61,73	69,44	77,14	23,04	25,91	28,79
B - 25	79,13	88,41	97,68	70,91	79,22	87,54	34,03	38,02	42,01
B - 50	90,07	100,02	109,97	81,26	90,24	99,22	47,82	53,10	58,38
B - 75	109,71	121,17	132,64	104,96	115,93	126,90	73,06	80,69	88,33
B - 100	130,16	143,06	155,96	103,96	114,26	124,57	76,62	84,22	91,81
C - 0	92,12	108,85	125,57	76,65	90,57	104,49	17,09	20,19	23,30
C - 25	98,89	116,05	133,20	82,67	97,01	111,35	18,19	21,34	24,50
C - 50	103,82	121,05	138,28	87,80	102,37	116,94	21,20	24,72	28,24
C - 75	119,65	119,65	157,73	99,84	115,73	131,62	36,23	42,00	47,76
C - 100	143,42	165,34	187,26	122,01	140,66	159,30	69,96	80,65	91,34

Fonte: Autoria própria (2019).