



UNIVERSIDADE SÃO JUDAS TADEU

Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Civil

**Desenvolvimento de argamassas de  
revestimento captoras de CO<sub>2</sub> com utilização de  
agregados reciclados**

Alessandro Botega de Camargo

SÃO PAULO

2020



UNIVERSIDADE SÃO JUDAS TADEU

Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Civil

# **Desenvolvimento de argamassas de revestimento captoras de CO<sub>2</sub> com utilização de agregados reciclados**

Alessandro Botega de Camargo

Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade São Judas Tadeu como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Renan Pícolo Salvador

SÃO PAULO

2020

# FICHA CATALOGRÁFICA

## Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da Universidade São Judas Tadeu

Bibliotecária: Adriana Aparecida Magalhães - CRB 8/10264

C172d Camargo, Alessandro Botega de.  
Desenvolvimento de argamassas de revestimento, captoras de CO2 com utilização de agregados reciclados / Alessandro Botega de Camargo. - São Paulo, 2020.  
f. 75: il.; 30 cm.

Orientador: Renan Pícolo Salvador.  
Dissertação (mestrado) – Universidade São Judas Tadeu, São Paulo, 2020.

1. Captação de CO2. 2. Argamassas. 3. Revestimento. 4. Agregados reciclados I. Salvador, Renan Pícolo. II. Universidade São Judas Tadeu, Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 22 – 624



**UNIVERSIDADE SÃO JUDAS TADEU**

**Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Civil**

Defesa da dissertação de mestrado de Alessandro Botega de Camargo, intitulada: “Desenvolvimento de argamassas de revestimento captoras de CO<sub>2</sub> com utilização de agregados reciclados”, orientado pelo Professor Doutor Renan Pícolo Salvador, apresentado à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil no dia 23 de julho de 2020.

Os membros da Banca Examinadora consideraram o candidato \_\_\_\_\_.

Banca examinadora

---

Professor Doutor Renan Pícolo Salvador - Universidade São Judas Tadeu

---

Professor Doutor Mostafa Galal Abdelfattah Mohamed Aboelkheir - Universidade São Judas Tadeu

---

Professora Doutora Andressa Gobbi - Universidade Estadual de Ponta Grossa

# DEDICATÓRIA

Dedico este estudo aos meus pais, filhos e familiares que sempre me apoiaram e aos mestres que me mostraram o caminho para buscar o conhecimento.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço o Prof. Dr. Renan Pícolo Salvador, pelo apoio e incentivo;

Aos Mestres da USJT – Campus Mooca e Unimonte, que me conduziram em suas disciplinas para a busca do conhecimento, entendimento das relações necessárias e indispensáveis à elaboração desta dissertação e me motivaram na busca do aprendizado continuado;

Aos colegas Cássio Maia de Souza, Daniela Ap. Dutra de Lima, Lucas Maia de Souza e Victor Agostinho Conceição, que se dedicaram nos ensaios que ajudaram na elaboração deste trabalho;

Aos meus filhos Lucas Rhuan de Camargo e Jéssica Fernanda de Camargo, meus pais, Antonio Armando de Camargo e Neiva Ap. Botega de Camargo, meus irmãos, Aline Botega de Camargo e Almir Botega de Camargo e a minha inspiração pessoal, Sabrina Oliveira Silva.



## RESUMO

Os resíduos gerados anualmente pela indústria da construção civil estão entre 0,40 a 0,50 toneladas/habitante, superiores à produção de lixo urbano, pois chega à 70% da massa total de resíduos sólidos urbanos de uma cidade brasileira de médio e grande porte. Estimativas recentes indicam que o volume médio mensal de resíduos em uma usina de concreto é de aproximadamente 2% de sua produção mensal. Embora haja um esforço mundial em pesquisas para utilização de resíduos de construção e demolição em sistemas construtivos, seu emprego ainda é escasso. Tais resíduos apresentam capacidade de absorção de CO<sub>2</sub> atmosférico, pois contêm portlandita que pode ser carbonatada. Nesse contexto, esta pesquisa visa a utilização de agregados reciclados provenientes de resíduos de construção para a produção de argamassas de revestimento que tenham a capacidade de captar CO<sub>2</sub>. Foram produzidas argamassas com diferentes teores de agregados reciclados, que foram caracterizadas por suas propriedades do estado fresco e endurecidas, além de sua capacidade de absorção de CO<sub>2</sub>. A utilização do agregado reciclado contribuiu para um aumento de 15 % na resistência à flexão e à compressão aos 28 dias em comparação às argamassas produzidas com agregado natural. A argamassa produzida com agregado reciclado apresentou captação de CO<sub>2</sub> igual a 8,3% em massa aos 28 dias, enquanto a argamassa contendo agregado natural atingiu apenas 3,9% em massa. Os resultados obtidos indicam que a utilização de agregado reciclado proveniente de resíduo de construção em argamassas de revestimento proporciona captação de CO<sub>2</sub>, diminuindo sua emissão em 29%.

**Palavras-chave:** Agregado reciclado, resíduo de construção, argamassa de revestimento, captação de CO<sub>2</sub>, sustentabilidade.



## ABSTRACT

The amount of residues generated by the Civil Construction industry annually falls between 0.40 to 0.50 ton/inhabitant and is higher than the production of urban waste, as it reaches 70% of the total mass of urban waste in a medium and large Brazilian city. Recent estimates indicate that the monthly volume of residues in a concrete manufacturing plant is around 2% of its monthly production. Although a great effort has been made in research to apply construction waste in construction systems, its use is still incipient. Such residues are capable of absorbing CO<sub>2</sub> from the air, as they contain portlandite that may be carbonated. In this context, the objective of this research is to use construction waste to produce rendering mortars capable of absorbing atmospheric CO<sub>2</sub>. Mortars were produced with different contents of recycled aggregate and their fresh state properties, hardened state properties and CO<sub>2</sub> uptake were characterized. The use of recycled aggregates contributed to a 15% increase in flexural and compressive strength at 28 days when compared to mortar produced with natural aggregate. The mortar produced with recycled aggregates presented a CO<sub>2</sub> uptake equal to 8.3% by mass at 28 days, while the mortar containing natural aggregate reached only 3.9% by mass. Results indicate that the use of recycled aggregates in rendering mortars provides CO<sub>2</sub> uptake, reducing its emissions in 29%.

**Keywords:** Recycled aggregate, construction waste, rendering mortar, CO<sub>2</sub> uptake, sustainability.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Processo simplificado para a obtenção de agregados reciclados a partir de RCD (MISTRI <i>et al.</i> , 2020).....	23
Figura 2.2 - Composição aproximada dos RCD mundial (OIKONOMOU, 2005).....	24
Figura 2.3 - Composição aproximada dos RCD no Brasil (OLIVEIRA <i>et al.</i> , 2011).....	24
Figura 3.1 - Esquema do programa experimental conduzido.....	31
Figura 3.2 - Curva granulométrica do agregado natural (ABNT, 2003b).....	35
Figura 3.3 - Curva granulométrica do agregado reciclado (ABNT, 2003b).....	36
Figura 3.4 - Microestrutura do agregado reciclado: (a) a seta vermelha indica partícula de agregado natural e a seta amarela indica fases de cimento hidratadas; (b) ampliação da figura (a).....	36
Figura 3.5 - Raspagem da superfície das placas com o auxílio de uma espátula.....	40
Figura 3.6 - Determinação da profundidade de carbonatação: (a) aspersão da solução de fenolftaleína em uma superfície recém fraturada; (b) medição da profundidade de carbonatação.....	41
Figura 3.7 - Determinação da variação dimensional: (a) pinos metálicos colados na superfície das placas; (b) medidor de dimensão.....	41
Figura 4.1 - Curvas de fluxo de calor das argamassas A1,0:6,0_CP V.....	45
Figura 4.2 - Curvas de energia liberada obtidas com as argamassas A1,0:6,0_CP V.....	46
Figura 4.3 - Curvas de fluxo de calor das argamassas A1,0:6,0_CP III.....	46
Figura 4.4 - Curvas de energia liberada obtidas com as argamassas A1,0:6,0_CP III.....	46
Figura 4.5 - Variação dimensional obtida com as argamassas A1,0:6,0_CP V.....	50
Figura 4.6 - Variação dimensional obtida com as argamassas A1,0:6,0_CP III.....	50



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Características e propriedades de agregados reciclados (OIKONOMOU, 2005).	25
Tabela 2.2 - Elementos encontrados em agregados reciclados e seus respectivos teores máximos permitidos (OIKONOMOU, 2005).	27
Tabela 3.1 - Materiais selecionados para a realização da campanha experimental.	32
Tabela 3.2 - Composição química do cimento CP V ARI determinada por FRX.	32
Tabela 3.3 - Composição mineralógica do cimento CP V ARI determinada por DRX.	33
Tabela 3.4 - Composição mineralógica do cimento CP III 40 RS.	33
Tabela 3.5 - Propriedades químicas e físicas dos cimentos.	33
Tabela 3.6 - Composição química da cal hidratada.	34
Tabela 3.7 - Propriedades químicas e físicas da areia natural.	34
Tabela 3.8 - Propriedades químicas e físicas do agregado reciclado.	35
Tabela 3.9 - Proporções unitárias em massa dos materiais utilizados em cada traço.	37
Tabela 3.10 - Ensaio realizados para a caracterização das argamassas.	38
Tabela 4.1 - Resultados médios da determinação do índice de consistência.	43
Tabela 4.2 - Resultados médios da determinação da massa específica.	44
Tabela 4.3 - Quantidade de CO <sub>2</sub> captado pelas argamassas em diferentes idades.	47
Tabela 4.4 - Profundidade média de carbonatação das argamassas em diferentes idades.	49
Tabela 4.5 - Resultados médios de resistência à flexão e à compressão.	51
Tabela 5.1 - Propriedades físicas e químicas de agregados reciclados para otimizar a captação de CO <sub>2</sub> em argamassas de revestimento.	54
Tabela 5.2 - Resultados médios de resistência à flexão e à compressão (WIJAYASUNDARA <i>et al.</i> , 2016).	55
Tabela 5.3 - Energia consumida, quantidade de CO <sub>2</sub> emitida e capturada por materiais de construção (MISTRI <i>et al.</i> , 2020; QUATTRONE; ANGULO; JOHN, 2014).	56



# SUMÁRIO

<b>1. Introdução.....</b>	<b>13</b>
1.1. Prólogo.....	13
1.2. Justificativa .....	14
1.3. Objetivos gerais e específicos.....	15
<b>2. Revisão bibliográfica.....</b>	<b>17</b>
2.1. O impacto ambiental da construção civil.....	17
2.2. Argamassas de revestimento.....	18
2.3. Materiais de construção empregados em argamassas de revestimento e seu impacto ambiental.....	19
2.3.1. Cimento .....	19
2.3.2. Cal hidratada.....	20
2.3.3. Agregados.....	21
2.4. Resíduos de construção e demolição .....	21
2.4.1. Obtenção de agregados reciclados a partir de RCD .....	22
2.4.2. Composição dos agregados reciclados de RCD .....	23
2.4.3. Características e propriedades de agregados reciclados de RCD .....	25
2.5. Carbonatação de matrizes cimentícias .....	28
<b>3. Metodologia experimental .....</b>	<b>31</b>
3.1. Materiais .....	31
3.1.1. Cimentos.....	32
3.1.2. Cal hidratada.....	34
3.1.3. Água .....	34
3.1.4. Agregado natural .....	34
3.1.5. Agregado reciclado.....	35
3.2. Preparação e dosagem das argamassas .....	37
3.3. Ensaio realizados.....	38
3.3.1. Índice de consistência.....	39
3.3.2. Massa específica .....	39
3.3.3. Calorimetria isotérmica .....	39
3.3.4. Análise termogravimétrica .....	39
3.3.5. Profundidade de carbonatação.....	40
3.3.6. Variação dimensional .....	41
3.3.7. Resistência à flexão .....	42
3.3.8. Resistência à compressão .....	42

<b>4. Resultados e discussão</b> .....	<b>43</b>
4.1. Caracterização das argamassas no estado fresco .....	43
4.1.1. Índice de consistência .....	43
4.1.2. Massa específica .....	44
4.1.3. Calorimetria isotérmica .....	44
4.2. Caracterização das argamassas no estado endurecido .....	47
4.2.1. Análise termogravimétrica .....	47
4.2.2. Profundidade de carbonatação .....	48
4.2.3. Variação dimensional .....	50
4.2.4. Resistência à flexão e à compressão .....	51
<b>5. Análise de viabilidade para a utilização de agregado reciclado em argamassas de revestimento</b> .....	<b>53</b>
5.1. A demanda pela utilização de agregados reciclados .....	53
5.2. Propriedades químicas e físicas dos agregados reciclados para otimizar a captação de CO <sub>2</sub> .....	54
5.3. Aspectos econômicos .....	55
5.4. Disponibilidade de agregados naturais .....	56
5.5. Influência da utilização de agregados reciclados em argamassa de revestimento no balanço de CO <sub>2</sub> .....	56
<b>6. Conclusões e perspectivas futuras</b> .....	<b>59</b>
6.1. Conclusões .....	59
6.2. Perspectivas futuras .....	60
<b>7. Publicações</b> .....	<b>61</b>
<b>Referências bibliográficas</b> .....	<b>63</b>

# 1. Introdução

## 1.1. Prólogo

A pesquisa desta dissertação de mestrado foi realizada no Departamento de Engenharia Civil da Universidade São Judas Tadeu (USJT), em São Paulo, Brasil. O trabalho foi dirigido pelo Professor Doutor Renan Pícolo Salvador membro e coordenador do programa de Mestrado Profissional *Stricto Sensu* em Engenharia Civil desta universidade.

O programa experimental foi majoritariamente realizado no laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade São Judas Tadeu. Análises químicas por fluorescência de raios-X e mineralógicas por difração de raios-X foram realizadas no Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo. Análises por microscopia eletrônica de varredura foram realizadas no Laboratório de Caracterização Tecnológica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

O estudo tem como finalidade produzir argamassas de revestimento com substituição parcial ou total dos agregados naturais por agregados compostos por resíduos de construção. A primeira etapa do estudo se concentrou na produção do agregado reciclado em laboratório, para controle de suas propriedades. A segunda etapa do estudo focou na avaliação das propriedades do estado fresco e endurecido das argamassas produzidas com o agregado reciclado. Então, foi avaliado como a utilização do agregado reciclado contribuiu para aumentar a captação de CO<sub>2</sub> pela argamassa. Para finalizar, foi desenvolvida uma análise a respeito do aumento da sustentabilidade do ambiente construído quando se empregam agregados reciclados para a produção de argamassas de revestimento.

O assunto estudado apresenta interesses acadêmicos e práticos. Do ponto de vista acadêmico, o emprego de agregados reciclados em matrizes cimentícias é bastante complexo, pois diversas variáveis necessitam ser controladas e analisadas. Portanto, a pesquisa oferece desafios científicos significativos que requerem esforços substanciais durante a campanha experimental, devido ao controle das variáveis envolvidas.

Do ponto de vista prático, desenvolver materiais que utilizam resíduos em sua composição é crucial. O emprego de agregados reciclados em matrizes cimentícias pode contribuir significativamente para a redução da poluição associada à construção civil. Como resultado, uma melhoria na sustentabilidade do ambiente construído pode ser alcançada.

## 1.2. Justificativa

A indústria de cimento é responsável por 5 a 7% das emissões de CO<sub>2</sub> no mundo (CETESB, 2011). Essa alta geração é oriunda da extração de matérias-primas, queima de combustíveis nos fornos de clinquerização e descarbonatação do calcário, que é uma matéria-prima necessária para a produção de cimento (TAYLOR, 1997). Do total de cimento produzido no Brasil, aproximadamente 55% são destinados à produção de argamassas aplicadas em sistemas construtivos.

Além disso, os resíduos gerados anualmente pela indústria da construção em médias e grandes cidades pelo mundo, giram em torno de 0,40 a 0,50 toneladas/habitante (AKHTAR; SARMAH, 2018). Seu descarte é um problema mundial devido à elevada quantidade produzida, aos descartes em aterros irregulares e às longas distâncias percorridas para descartá-los adequadamente. Devido a esse motivo, a reutilização de resíduos em novos sistemas construtivos tem sido objeto de estudo de diversos pesquisadores (LÓPEZ-ALONSO *et al.*, 2019; ZHU *et al.*, 2019).

A Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos de Construção Civil e Demolição (ABRECON) afirma que o Brasil desperdiça R\$ 8 bilhões por ano porque não recicla seus materiais em processos construtivos (DIRUR, 2010). No entanto, os resíduos de construção, que poderiam ser utilizados para produção de concretos e argamassas, são eliminados ou depositados em aterros.

Resíduos de construção e demolição contêm cimento hidratado, constituído por silicatos e aluminatos de cálcio hidratados e portlandita (CINCOTTO, 2011). Esse hidróxido é a fase responsável pela carbonatação de estruturas de concreto, devido à sua facilidade de reação com CO<sub>2</sub> atmosférico (LIANG *et al.*, 2020). Portanto, sua reutilização em processos construtivos pode promover a redução da concentração de CO<sub>2</sub> no ar por sua carbonatação.

Face aos fatos supramencionados, é de suma importância a busca de novas tecnologias para a mitigação da emissão de gases poluentes, como o dióxido de carbono. Desta forma, surge como uma das possíveis soluções cabíveis a captura e armazenamento de CO<sub>2</sub> por materiais cimentícios que contenham resíduos de construção. Com isso, esse trabalho contribui significativamente para o desenvolver a diminuição de CO<sub>2</sub> e a presença do dióxido de carbono na atmosfera, uma vez que permite capturá-lo junto às matrizes adequadas.

### **1.3. Objetivos gerais e específicos**

O objetivo geral desta pesquisa é utilizar resíduos de construção e demolição para a fabricação de argamassas de revestimento que tenham a possibilidade de captar CO<sub>2</sub> atmosférico. Para alcançar esse objetivo, foram elaborados os objetivos específicos descritos a seguir:

- I. Caracterizar a capacidade de captação de CO<sub>2</sub> de resíduo de construção produzido em laboratório.
- II. Avaliar a influência do uso de resíduos nas propriedades de argamassas no estado fresco e endurecido.
- III. Avaliar a carbonatação de diferentes amostras durante sua cura.
- IV. Elaborar uma análise preliminar de sustentabilidade e de viabilidade técnica sobre a utilização de agregados reciclados em argamassas de revestimento.



## 2. Revisão bibliográfica

### 2.1. O impacto ambiental da construção civil

Cada vez mais é discutido sobre a problemática envolvendo a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera (ALVES, 2020; CURY, 2019). A tendência é o aumento da temperatura do planeta com o aumento da concentração de CO<sub>2</sub>, podendo chegar ao caos climático decorrente do aquecimento global (ONU, 2015). A elevação da temperatura acontece pela camada criada na atmosfera pelos gases do efeito estufa, que acabam impedindo parcialmente o retorno das radiações infravermelhas refletidas pela superfície terrestre.

O CO<sub>2</sub> pode ser gerado a partir da respiração dos animais, desmatamentos provocados pelas queimas e, principalmente, pela queima de combustíveis fósseis. Em resposta a elevadas emissões de gases do efeito estufa, os governos mundiais vêm tomando medidas para reduzir tais emissões. Segundo o Acordo de Paris, foi estipulado manter um aumento da temperatura média global abaixo de 2 °C em relação aos níveis pré-industriais (ONU, 2015).

A construção civil é uma das atividades antrópicas que mais gera CO<sub>2</sub>. Para essa atividade, 50% das matérias-primas são extraídas da natureza. Além disso, a construção civil consome 40% da energia gerada mundialmente e é responsável pela geração de 50% dos resíduos produzidos anualmente (OIKONOMOU, 2005). No Brasil, 60% dos resíduos vêm da construção civil e estima-se a geração de 17 mil toneladas/dia desta somente em São Paulo, sendo 30% da construção formal e o restante informal (JACOBI; BESEN, 2011).

Durante a produção dos materiais utilizados nas construções, os limites de poeira e geração de CO<sub>2</sub> ultrapassam os limites de tolerância que está entre 350 e 400 ppm (JACOBI; BESEN, 2011). A melhor maneira de reduzir a geração de CO<sub>2</sub> no país é a prática da reciclagem e a construção de maneira sustentável (CHAU; LEUNG; NG, 2015). O custo para isso apesar de ser moderadamente maior que a construção convencional, pois depende de vários fatores e oferecem importante retorno ao meio ambiente.

Algumas aplicações como a água de reuso, captação de energia solar e a captação de CO<sub>2</sub> por materiais cimentícios auxiliam muito na prática de construção sustentável (CHAU; LEUNG; NG, 2015). Este último fator, relacionado a captação de CO<sub>2</sub>, é devido ao cimento e à cal que reagem com o CO<sub>2</sub>, gerando carbonatos (ŠAVIJA; LUKOVIĆ, 2016). Esta captação de CO<sub>2</sub> ocorre durante toda a vida útil do concreto, continuando após sua demolição (JOHANNESSON; UTGENANNT, 2001; WANG *et al.*, 2016).

## **2.2. Argamassas de revestimento**

Argamassas de cimento e cal são uma das soluções construtivas mais empregadas no Brasil para revestimento de paredes de alvenaria (MONTE; BARROS; FIGUEIREDO, 2018). Essas argamassas são uma mistura homogênea de ligantes (cal e cimento), agregados miúdos e água. Para conferir propriedades adequadas para determinados fins, podem ser utilizados aditivos. Esses revestimentos são comumente utilizados para proteger edificações de agentes externos (ABNT, 2005).

O cimento é o principal material empregado nas construções civis, estando presente em quase todos os tipos de construções. Basicamente é composto por calcário, argila e baixas quantidades de óxidos de ferro e alumínio, se tornando um pó fino com propriedades aglomerantes ou ligantes, que reagem em contato com a água.

A cal hidratada tem a função de ligante nas argamassas de cal, que são caracterizadas por boa trabalhabilidade e boa capacidade de absorver deformações (DENG *et al.*, 2020). Em argamassas mistas de cal e cimento, a cal hidratada tem a função de reter água para a hidratação do cimento, melhorar a trabalhabilidade do produto fresco e aumentar a capacidade do produto endurecido absorver deformações sem danos ao revestimento. A cal vem sendo usada na construção desde a antiguidade com função de unir e revestir as alvenarias, pois acrescenta plasticidade e durabilidade às argamassas (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O revestimento de argamassa faz parte do sistema de vedação das edificações. Portanto deve apresentar propriedades que contribuam para o adequado comportamento da vedação e, conseqüentemente, das edificações como um todo (BAÍA; SABBATINI, 2000). O revestimento é a aplicação destinada ao acabamento sobre a alvenaria e tem como principal objetivo dar acabamento e corrigir defeitos da superfície. O processo de aplicação é feito em duas etapas,

com o preparo da base pela aplicação de chapisco, emboço e reboco, para depois receber o revestimento decorativo final (ABNT, 2013; ANTUNES; JOHN, 2007).

Para cumprir sua função, os revestimentos de argamassa devem possuir características e propriedades compatíveis com as condições a que estarão expostos, condições de execução, natureza da base, especificações de desempenho e com o acabamento previsto (BAÍA; SABBATINI, 2000). As principais propriedades que as argamassas de revestimento devem apresentar são a capacidade de aderência ao substrato, capacidade de deformação sem fissuração e estanqueidade (BAÍA; SABBATINI, 2000). Com essas propriedades preservadas, o revestimento tende a manter seu desempenho ao longo do tempo, contribuindo para uma maior durabilidade.

### **2.3. Materiais de construção empregados em argamassas de revestimento e seu impacto ambiental**

#### **2.3.1. Cimento**

O cimento Portland é um material inorgânico finamente moído que reage com a água, formando uma pasta que endurece e desenvolve resistência mecânica (NEVILLE, 2016). É conhecido como ligante hidráulico porque os produtos formados pelas reações químicas têm propriedades resistentes à água e são capazes de ligar várias partículas, como agregados miúdos, graúdos e o meio ligante (CINCOTTO, 2011). É o principal material usado na engenharia de construção para produzir concreto estrutural.

No contato do cimento com a água, a hidratação inicia e vários fenômenos ocorrem durante todo o processo. Normalmente, um cimento Portland comum é aproximadamente 30 a 50% hidratado em 1 dia. O grau de hidratação aumenta até 80% aos 28 dias e a matriz atinge cerca de 75% da resistência do projeto. Após esse período, a maior parte do material não hidratado restante é a fase de belita de reação lenta (SCRIVENER; NONAT, 2011). As principais fases encontradas em uma matriz cimentícia hidratada são silicato de cálcio hidratado (C-S-H), portlandita e fases AFm (trissulfoaluminato de cálcio hidratado) e AFm (monosulfoaluminato de cálcio hidratado).

A produção de cimento apresenta uma elevada emissão de dióxido de carbono, um dos principais gases do efeito estufa. A indústria cimenteira emite cerca de 5% das emissões antrópicas globais de CO<sub>2</sub> (VITAL, 2018), sendo que a uma das principais fontes de emissões está relacionada a obtenção do clínquer, que se dá basicamente através da mistura de calcário e argila em altas temperaturas.

Metade das emissões de CO<sub>2</sub> na fabricação de cimento são geradas na reação química de conversão do calcário (CaCO<sub>3</sub>) para óxido de cálcio (CaO). Além disso, cerca de 40% das emissões são geradas no processo de combustão dos combustíveis fósseis, e o restante provém do transporte de matérias-primas (TAYLOR, 1997). Analisando o processo como um todo, estima-se a geração de 900 kg de CO<sub>2</sub> para cada 1000 kg de cimento produzidos (MAHASANAN; SMITH; HUMPHREYS, 2003).

### **2.3.2. Cal hidratada**

A cal hidratada é um dos produtos mais antigos produzidos pelo homem e cumpre um papel importantíssimo devido seu amplo leque de aplicação na construção civil. A cal é um ligante aéreo, o que significa que reage com o CO<sub>2</sub> atmosférico, com consequente geração de carbonato de cálcio. Essa reação promove o endurecimento da matriz, ligando os agregados (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A maior fração da cal produzida em território brasileiro advém da calcinação de calcários e dolomitos metamórficos, datados de distintos tempos geológicos, e de pureza variável. O principal produto da calcinação das rochas carbonatadas cálcicas e cálcio-magnesianas é a cal virgem, que para sua aplicação necessita ser hidratada. A cal hidratada para argamassas pode ser classificada como CH-I, CH-II e CH-III dependendo do teor de óxido de cálcio, óxido de magnésio e carbonato de cálcio em sua composição (ABNT, 2003a).

O processo produtivo da cal implica em um grande impacto ambiental, devido ao processo de calcinação da rocha calcária. Por esse processo, estima-se a geração de 1,2 kg de CO<sub>2</sub> para 1 kg de cal produzido (PENG, 2016).

### **2.3.3. Agregados**

Agregados são relativamente baratos quando comparados aos demais materiais empregados para a fabricação de argamassas e não participam significativamente de reações complexas com a água. Os agregados minerais naturais são a classe mais importante de agregados e compreendem mais de 90% do total de agregados utilizados para a fabricação de argamassas. Os agregados ocupam de 50 a 70% o volume das argamassas de revestimento (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Agregados naturais são normalmente coletados da margem de rios. Como os depósitos no solo geralmente contêm quantidades variadas de lodo e argila, que podem afetar negativamente as propriedades do concreto fresco e do endurecido, esses contaminantes devem ser removidos por lavagem ou peneiramento a seco. A escolha de limpeza pode influenciar significativamente a quantidade de substâncias deletérias no agregado, pois argilas não são removidos eficientemente por peneiramento a seco (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A extração média anual de agregados de diferentes rios do mundo varia entre 10 mil e 230 milhões de m<sup>3</sup>/ano (KOEHNKEN; RINTOUL, 2018). A extração de areia tem sérios impactos físicos, ecológicos e sociais. O impacto ambiental da dragagem e escavação excessivas de recursos naturais dos leitos dos rios induz a desestabilização de canais e a redução de lençóis freáticos (KONDOLF, 1997). O aumento da turbidez e da Salinidade da água afeta negativamente a respiração e a procriação de animais aquáticos, podendo reduzir a sua população (KONDOLF, 1997; YEN; HASHIM, 2013). O abaixamento do nível dos leitos de rios devido à mineração de areia reduz a disponibilidade de água para a população local (HEMALATHA; MYSORE; NAGARAJ, 2005).

### **2.4. Resíduos de construção e demolição**

Os resíduos de construção e demolição (RCD) são resíduos provenientes de construções, reformas, demolições e de preparação de terrenos. Os principais compostos encontrados em RCD são cerâmicas (blocos, tijolos e revestimentos) e concreto endurecido. Segundo a norma NBR 15114 (ABNT, 2004a), os RCD são classificados em 4 classes:

- Classe A: resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como resíduos de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação, edificações e fabricação ou demolição de peças pré-fabricadas de concreto.
- Classe B: resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e outros.
- Classe C: resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem e recuperação.
- Classe D: resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas e instalações industriais.

A atividade da construção civil gera a parcela predominante da massa total dos resíduos sólidos urbanos produzidos nas cidades. Segundo o Sindicato da Indústria da Construção Civil do estado de São Paulo (SINDUSCON-SP, 2005), os resíduos da construção compreendem entre 50 e 70% dos resíduos sólidos urbanos. A cidade de São Paulo gera mais de 17 toneladas desse resíduo por dia. Dessa quantidade, 75% dos resíduos provêm de eventos informais, como obras de construção, reformas e demolições geralmente realizadas pelos próprios usuários dos imóveis (JACOBI; BESEN, 2011). A falta de efetividade de políticas públicas que disciplinam a destinação dos resíduos da construção civil, associada ao descompromisso dos geradores no manejo e na destinação dos resíduos, provoca grandes impactos ambientais, como a degradação de mananciais, proliferação de agentes transmissores de doenças e o assoreamento dos rios.

#### **2.4.1. Obtenção de agregados reciclados a partir de RCD**

A obtenção de agregados reciclados a partir de RCD é crucial para o desenvolvimento sustentável atualmente. Paralelamente, este processo está conectado com o aumento da demolição de estruturas que passaram de sua vida útil e com o aumento da demanda por novas estruturas. O processo simplificado para a obtenção de agregados reciclados a partir de RCD está exemplificado na figura 2.1 (MISTRI *et al.*, 2020).

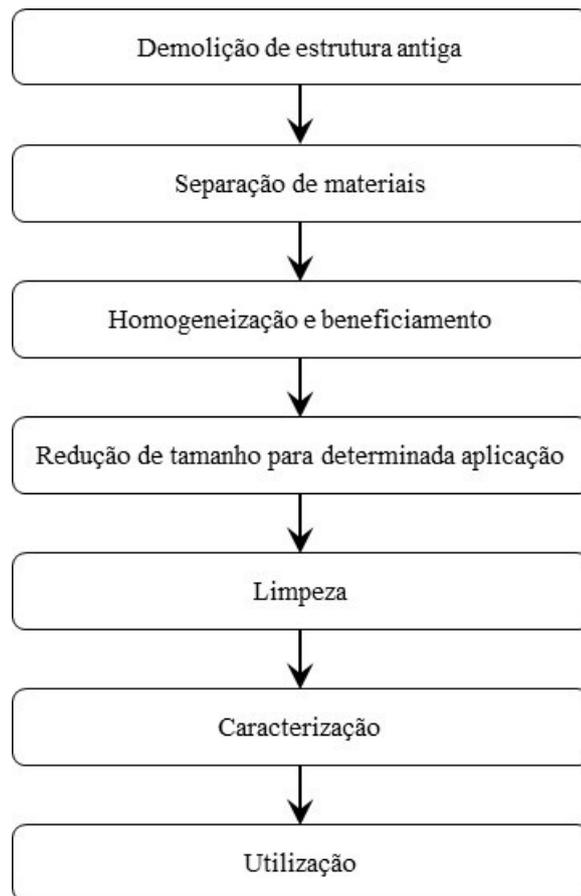


Figura 2.1 - Processo simplificado para a obtenção de agregados reciclados a partir de RCD (MISTRI *et al.*, 2020).

#### 2.4.2. Composição dos agregados reciclados de RCD

A composição aproximada dos resíduos de construção e demolição no mundo está apresentada na figura 2.2 (OIKONOMOU, 2005). Uma estimativa da composição do RCD no Brasil está apresentada na figura 2.3 (OLIVEIRA *et al.*, 2011). Esses resultados confirmam a cultura construtiva brasileira, na qual as maiores perdas ocorrem nas fases de concretagem, alvenaria, emboço, reboco e revestimento. Os insumos utilizados nessas operações são os principais responsáveis pela geração de grandes quantidades nos resíduos de construção e demolição.

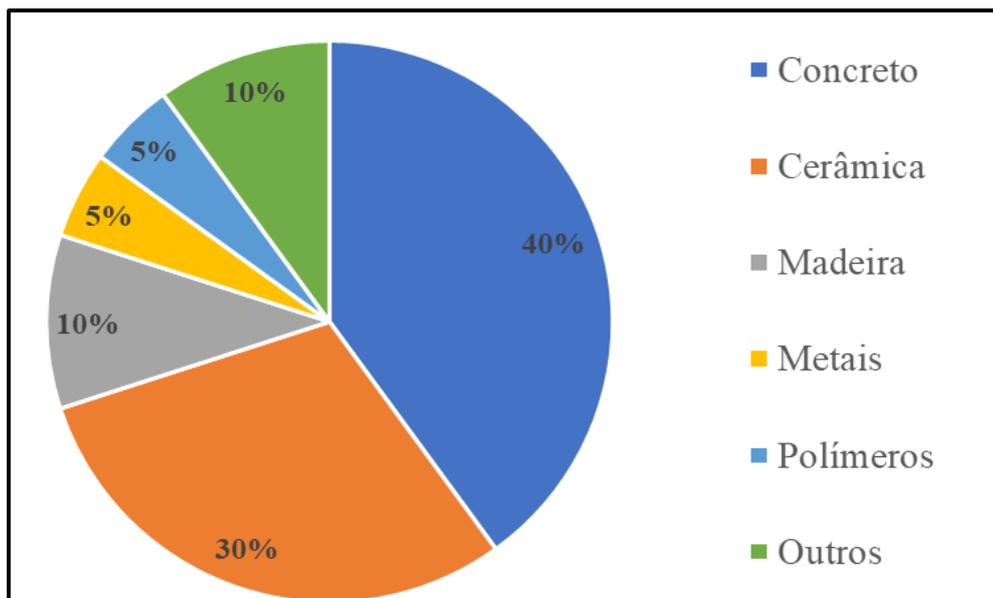


Figura 2.2 - Composição aproximada dos RCD mundial (OIKONOMOU, 2005).

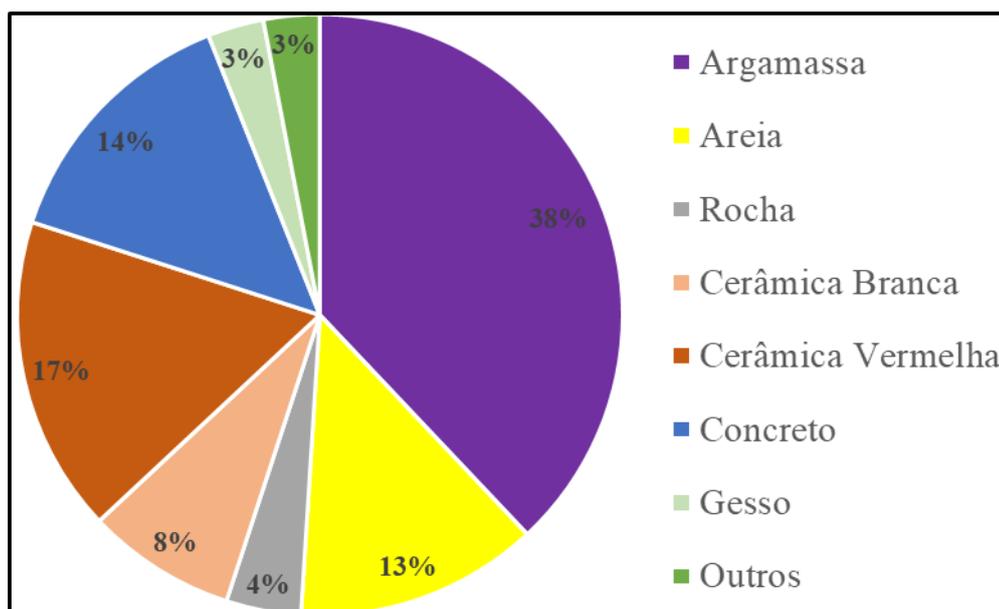


Figura 2.3 - Composição aproximada dos RCD no Brasil (OLIVEIRA et al., 2011).

A partir de seu beneficiamento, os agregados reciclados de RCD devem apresentar mais de 90% em massa de fragmentos à base de cimento e rocha para que possam ser utilizados para a fabricação de concretos e argamassas (ABNT, 2004b). Nesse caso, agregados reciclados podem ser classificados como um compósito de duas fases, composto por agregados naturais e uma camada de argamassa aderida que contém areia, produtos hidratados e cimento não hidratado (PEPE *et al.*, 2016). Portanto, existem dois tipos de zona de transição da interface nos

agregados reciclados, localizadas entre os agregados naturais e a argamassa aderida e entre os agregados reciclados e a nova argamassa

Para a fabricação de concreto não estruturais, o uso de concreto antigo como agregado é uma alternativa atrativa ao uso de agregados naturais. As fontes mais comuns para esse agregado específico são elementos de concreto pré-moldado descartados, concreto fresco não utilizado e corpos de prova ensaiados em laboratórios (AITCIN; MINDESS, 2011). Esse tipo de agregado é utilizado em aplicações de baixa a média resistência, com uma porcentagem aproximada de 30% de substituição aos agregados naturais (SANTOS *et al*, 2018).

### 2.4.3. Características e propriedades de agregados reciclados de RCD

As principais características e propriedades determinadas em agregados reciclados estão descritas na tabela 2.1. A descrição das principais está apresentada subsequentemente.

Tabela 2.1 - Características e propriedades de agregados reciclados (OIKONOMOU, 2005).

Item	Resultado ideal
Massa específica	> 2200 kg/m <sup>3</sup>
Absorção de água	< 15,0% em massa
Compostos orgânicos	< 0,50% em massa
Teor de sulfatos	< 1,0% em massa
Quantidade de areia	< 5,0% em massa

### Forma e textura dos grãos

A forma dos grãos diz respeito às características geométricas do agregado, que podem ser arredondadas, angulosas, achatadas ou alongadas. Já a textura superficial diz respeito ao grau de quanto à rugosidade da superfície do agregado (MEHTA; MONTEIRO, 2014). No geral os agregados reciclados são mais angulares, irregulares, com superfície mais porosa e com textura mais áspera que os naturais. Essas características influenciam mais nas propriedades da argamassa no estado fresco do que no endurecido (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A forma e a textura do agregado miúdo têm um efeito significativo sobre a demanda de água de uma mistura. Materiais granulares angulares e lamelares tendem a formar poros mais tortuosos e a reduzir a conectividade desses poros. O aumento da tortuosidade dificulta a penetração de água e a redução da conectividade dos poros diminui a quantidade de água absorvida (MIRANDA; SELMO, 2006).

### **Massa específica e massa unitária**

A massa específica e a massa unitária dos agregados reciclados diferem das observadas nos agregados naturais devido à composição do agregado. Os agregados reciclados possuem massa específica, em média, 10 % menor que a dos agregados naturais, variando entre 2300 e 2600 kg/m<sup>3</sup> (LIANG *et al.*, 2020). Isso se deve à massa específica relativamente menor da argamassa aderida e pelo fato de os resíduos de construção serem compostos de materiais porosos (PEPE *et al.*, 2016).

### **Absorção de água**

Duas grandes desvantagens dos agregados reciclados são sua alta porosidade e absorção de água devido à presença de materiais porosos em sua composição (SHI *et al.*, 2018). Uma das causas da maior porosidade e absorção de água é a maior presença de poros capilares e microfissuras na sua superfície. A porosidade é fortemente influenciada pela sua composição e pelo processo de seu beneficiamento (DIMITRIOU; SAVVA; PETROU, 2018). A NBR 15116 (ABNT, 2004b) limita a absorção de água do agregado reciclado misto em, no máximo, 17%.

Nos agregados reciclados, a absorção de água ocorre em uma maior velocidade que nos agregados naturais, podendo chegar à saturação em poucos minutos. A alta velocidade de absorção de água nos agregados reciclados reduz a trabalhabilidade de concretos e argamassas e necessita ser avaliada para aumentar sua eficiência (NAMARAK; TANGCHIRAPAT; JATURAPITAKKUL, 2018). Portanto, a recomendação geral é utilizar o agregado reciclado previamente saturado para a fabricação de concretos (MISTRI *et al.*, 2020).

## **Contaminantes e impurezas**

Os contaminantes e as impurezas nos materiais reciclados são muito presentes e difíceis de serem removidos antes e após a britagem, produzindo efeitos negativos às argamassas relacionados a propriedades mecânicas e durabilidade. Contaminantes nos materiais reciclados são considerados materiais minerais não inertes que prejudicam a qualidade da matriz, como cloretos, sulfatos, matéria orgânica, além de produtos industrializados leves (papel, plástico, tecido, entre outros), vidro, betume, terra, madeira e outros. As impurezas e seus teores admissíveis dependem do uso pretendido para o agregado de RCD (OIKONOMOU, 2005).

O gesso é um dos mais prejudiciais, que pode levar a expansão da argamassa devido à reação sulfática. Por isso, nas normas a respeito de agregados reciclados são estabelecidos limites rigorosos ao conteúdo de sulfatos (SILVA; DE BRITO; DHIR, 2019). Para reduzir o efeito do gesso nas argamassas, podem ser usados cimentos mais resistentes a sulfatos, como o CP III e o CP IV (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Além disso, os teores de elementos contaminantes para o meio ambiente necessitam ser determinados. Isso é importante para determinar o potencial de contaminação dos agregados por lixiviação. Os principais metais pesados e as sugestões de seus limites máximos permitidos em agregados reciclados estão apresentados na tabela 2.2 (OIKONOMOU, 2005)

Tabela 2.2 - Metais pesados em agregados reciclados e seus respectivos teores máximos permitidos (OIKONOMOU, 2005).

<b>Elemento</b>	<b>Teor máximo permitido (ppb)</b>
As	50
Pb	100
Cd	5
Cr	100
Cu	200
Ni	100
Zn	400

## 2.5. Carbonatação de matrizes cimentícias

Quando cimento e concreto são expostos ao ambiente, o CO<sub>2</sub> se difunde na matriz principalmente através dos poros interconectados e fissuras. Com a presença de umidade, o CO<sub>2</sub> se dissolve na água, formando ácido carbônico que reage com produtos de hidratação do cimento, resultando na produção de CaCO<sub>3</sub> e gel de sílica, conforme equações 1 e 2 (FERNÁNDEZ BERTOS *et al.*, 2004). Além disso, fases não hidratadas do cimento, como a alita (C<sub>3</sub>S) e belita (C<sub>2</sub>S), também podem reagir com o CO<sub>2</sub>, conforme equações 3 e 4 (FERNÁNDEZ BERTOS *et al.*, 2004).



A carbonatação inicia-se na superfície do material cimentício, progredindo sucessivamente para seu interior. A carbonatação diminui a alcalinidade da matriz, passando de pH 12 para pH aproximado de 9 a 10. Esse processo é lento, ocorrendo ao longo de todo o ciclo de vida de produtos à base de cimento. Além disso, depende de vários fatores, como os materiais empregados e as suas respectivas proporções na matriz, idade da matriz cimentícia e relação água/cimento (ŠAVIJA; LUKOVIĆ, 2016).

Com a formação de CaCO<sub>3</sub>, o CO<sub>2</sub> é aprisionado na matriz. Devido à elevada dureza e menor volume molar do CaCO<sub>3</sub> em relação à portlandita e ao C-S-H, a carbonatação tende a aumentar a resistência da matriz (ŠAVIJA; LUKOVIĆ, 2016). Além disso, esse processo pode causar retração na matriz.

A carbonatação no concreto armado é uma das causas de corrosão da armadura, mas também é uma maneira de capturar CO<sub>2</sub> da atmosfera (GALAN *et al.*, 2010). Diversas pesquisas focam no problema da corrosão da armadura devido à carbonatação, com o objetivo

principal de medir e prever o progresso da frente de carbonatação e a evolução da corrosão (ZHANG *et al.*, 2019). A contribuição da carbonatação para a estimativa das emissões de CO<sub>2</sub> do concreto é raramente estudada. Para tal estimativa, é necessário conhecer quais fases cimentícias sofrem carbonatação quando o pH da matriz é aproximadamente 9 (FERNÁNDEZ BERTOS *et al.*, 2004).

A avaliação de reabsorção CO<sub>2</sub> por carbonatação durante o uso de estruturas de concreto e através da reciclagem do concreto demolido tem atraído cada vez mais atenção do ponto de vista do benefício ambiental (PADE; GUIMARAES, 2007; SÁEZ DEL BOSQUE *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2019). Estima-se que 1930 e 2013, 4,5 giga toneladas de CO<sub>2</sub> foram capturados por carbonatação em materiais cimentícios. Esse valor representa 43% da descarbonatação associada à produção de cimento neste período, sem considerar as emissões associadas à queima de combustíveis fósseis (XI *et al.*, 2016).

Em elementos de concreto, aproximadamente 16% das emissões iniciais são absorvidas durante seu tempo de serviço, com mais 1,5% absorvido pela demolição de estruturas de concreto e seu posterior descarte. No caso de argamassas, uma média de 98% das emissões de CO<sub>2</sub> iniciais são absorvidas durante o tempo de serviço do elemento, sendo o restante absorvido no seu processo de demolição (XI *et al.*, 2016). Isso é devido à alta área de exposição das argamassas e à sua baixa espessura.

Durante a reciclagem de concreto após a demolição, a absorção de CO<sub>2</sub> depende principalmente da área de superfície exposta ao CO<sub>2</sub>. Estruturas de concreto mais simples e de formas longas e finas possuem maior capacidade de absorção de CO<sub>2</sub> do que grandes estruturas de concreto maciço (FELIX; POSSAN, 2018). Isso ocorre porque a captura de CO<sub>2</sub> se concentra nos 10 cm superficiais dos elementos fabricados com concreto.

A utilização de agregados provenientes de concreto reciclado potencializa a captura de CO<sub>2</sub>, pois esse material contém portlandita e C-S-H gerados pela hidratação do cimento. O emprego desses agregados em argamassas de revestimento melhora esta condição devido à baixa espessura desse elemento, proporcionando uma captação de 300 kg de CO<sub>2</sub> por metro cúbico (XI *et al.*, 2016). Além disso, se a pintura da parede for aplicada 60 dias após a aplicação da argamassa, a possibilidade de captação de CO<sub>2</sub> aumenta em até 50%, devido à exposição da argamassa ao meio ambiente (FELIX; POSSAN, 2018).



### 3. Metodologia experimental

Esta pesquisa foi realizada no Laboratório de Engenharia de Construção Civil da Universidade São Judas Tadeu. Os procedimentos utilizados para o desenvolvimento desse projeto de pesquisa foram baseados em literaturas, recomendações nacionais, internacionais e experiências prévias da equipe de trabalho. A figura 3.1 apresenta o esquema do programa experimental conduzido.

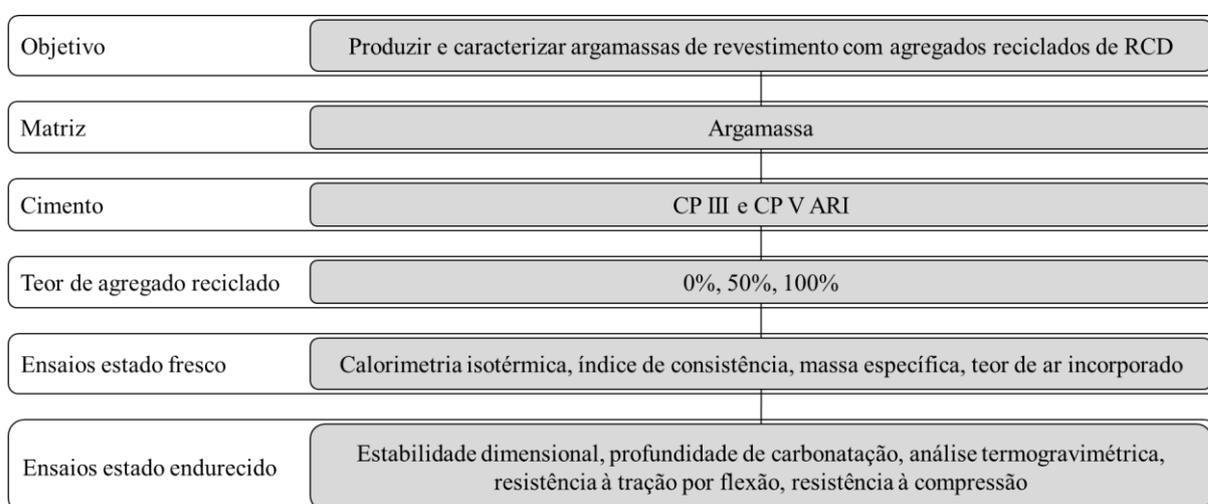


Figura 3.1 - Esquema do programa experimental conduzido.

#### 3.1. Materiais

Os materiais selecionados para a realização da campanha experimental estão descritos na tabela 3.1. Foram utilizados dois tipos de cimento diferentes, pois sua velocidade de hidratação pode influenciar a taxa de carbonatação a curtas idades. Além disso, o teor de portlandita gerado pela hidratação do cimento varia com sua composição. A caracterização dos materiais está apresentada subsequentemente.

Tabela 3.1 - Materiais selecionados para a realização da campanha experimental.

<b>Material</b>	<b>Tipo</b>
Cimento	CP V ARI e CP III 40 RS
Cal	Cal hidratada
Água	Deionizada
Agregado miúdo	Areia natural de rio e agregado reciclado de resíduo de construção

### 3.1.1. Cimentos

O cimento CP V ARI foi fornecido pela Holcim do Brasil. Sua composição química determinada por espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) está na tabela 3.2 e sua composição mineralógica determinada por difração de raios-X (DRX) com refinamento de Rietveld está na tabela 3.3. O cimento CP III 40 RS foi fornecido pela CSN. Sua composição mineralógica, conforme descrição do fabricante, está na tabela 3.4. As propriedades químicas e físicas dos dois cimentos estão na tabela 3.5.

Tabela 3.2 - Composição química do cimento CP V ARI determinada por FRX.

<b>Composto</b>	<b>Quantidade (% em massa)</b>
Perda ao fogo	3,08
CaO	64,30
SiO <sub>2</sub>	19,76
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,68
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,01
SO <sub>3</sub>	2,49
MgO	1,33
K <sub>2</sub> O	0,86
Na <sub>2</sub> O	0,32
Componentes minoritários	0,17
Total	100,0

Tabela 3.3 - Composição mineralógica do cimento CP V ARI determinada por DRX.

<b>Fase</b>	<b>Quantidade (% em massa)</b>
C <sub>3</sub> S	66,4
C <sub>2</sub> S	8,9
C <sub>3</sub> Ac	3,4
C <sub>3</sub> Ao	0,7
C <sub>4</sub> AF	10,8
CaO	0,4
CaCO <sub>3</sub>	5,4
CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	1,1
CaSO <sub>4</sub> ·0,5H <sub>2</sub> O	2,9
Total	100,0

Tabela 3.4 - Composição mineralógica do cimento CP III 40 RS.

<b>Fase</b>	<b>Quantidade (% em massa)</b>
Clínquer e gipsita	60,0
Escória de alto-forno	35,0
Material carbonático	5,0
Total	100,0

Tabela 3.5 - Propriedades químicas e físicas dos cimentos.

<b>Propriedade</b>	<b>CPV ARI</b>	<b>CP III 40 RS</b>
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,01	2,93
Quantidade de portlandita (% em massa)	1,73	1,58
Resíduo insolúvel (%)	0,80	1,5
Superfície específica BET (m <sup>2</sup> /g)	1,39	0,64
d <sub>10</sub> (µm)	2,34	1,67
d <sub>50</sub> (µm)	15,71	13,38
d <sub>90</sub> (µm)	41,49	37,84

### 3.1.2. Cal hidratada

A cal utilizada foi a cal hidratada CH III Itaú, com massa específica igual a 2,27 g/cm<sup>3</sup>. Sua composição química, conforme descrição do fabricante, está apresentada na tabela 3.6. Portanto, sua pureza em hidróxido de cálcio é igual a 71,5%.

Tabela 3.6 - Composição química da cal hidratada.

Composto	Quantidade (% em massa)
Hidróxido de cálcio	71,5
Carbonato de cálcio	28,5
Total	100,0

### 3.1.3. Água

A água utilizada era deionizada (Milli-Q, condutividade igual a 0,055 µS/cm, resistividade igual a 18,2 MΩ.cm e teor de carbono orgânico a 10 ppb).

### 3.1.4. Agregado natural

Foi utilizada areia natural de rio seca em estufa. Suas propriedades químicas e físicas estão na tabela 3.7. A curva granulométrica desse agregado está representada na figura 3.2, onde demonstra que apresenta em sua maior parte, uma finura entre 1 e 5 mm (ABNT, 2003b).

Tabela 3.7 - Propriedades químicas e físicas da areia natural.

Propriedade	Resultado	Referência
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,62	(ABNT, 2009a)
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,42	(ABNT, 2009a)
Quantidade de portlandita (% em massa)	0,10	(LOTHENBACH; DURDZINSKI; WEERDT, 2015)
Quantidade de carbonato de cálcio (% em massa)	1,10	(LOTHENBACH; DURDZINSKI; WEERDT, 2015)
Módulo de finura	2,50	(ABNT, 2003b)
Dimensão máxima característica (mm)	2,38	(ABNT, 2003b)

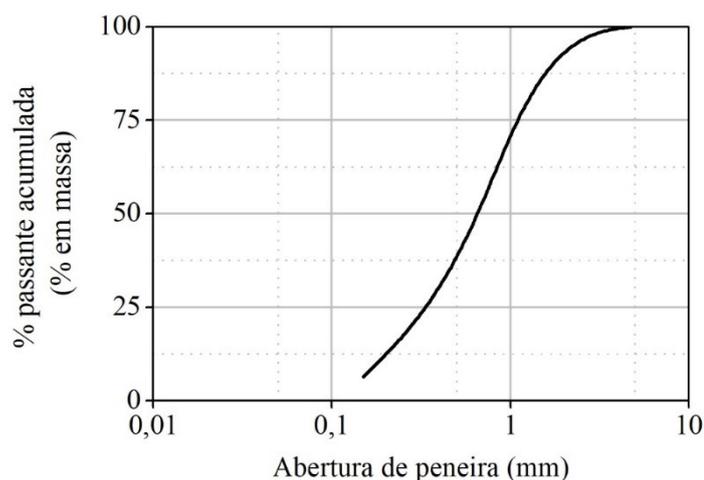


Figura 3.2 - Curva granulométrica do agregado natural (ABNT, 2003b).

### 3.1.5. Agregado reciclado

Foi produzido um agregado reciclado no laboratório da Universidade São Judas Tadeu para garantir uma composição química conhecida. Foram produzidos 15 kg de argamassa com traço 1,0 : 3,0 em massa, relação a/c de 0,50 e 0,60% de aditivo superplastificante. Foram utilizados o cimento CP V ARI e a areia natural descritos nos itens 3.1.1 e 3.1.4, respectivamente.

Essa argamassa foi armazenada em um saco plástico fechado e moída 2 meses após sua fabricação utilizando um moinho martelo do modelo CT 058 (potência de 60 Hz e 3,0 HP) até atingir módulo de finura igual a 2,1 (ABNT, 2003b). Suas propriedades químicas e físicas estão na tabela 3.8. A curva granulométrica desse agregado está representada na figura 3.3, onde demonstra uma finura em sua maior parte entre 0,5 e 1 mm (ABNT, 2003b).

Tabela 3.8 - Propriedades químicas e físicas do agregado reciclado.

Propriedade	Resultado	Referência
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,39	(ABNT, 2009a)
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,09	(ABNT, 2009a)
Quantidade de portlandita (% em massa)	5,43	(LOTHENBACH; DURDZINSKI; WEERDT, 2015)
Quantidade de carbonato de cálcio (% em massa)	4,43	(LOTHENBACH; DURDZINSKI; WEERDT, 2015)
Módulo de finura	2,1	(ABNT, 2003b)
Dimensão máxima característica (mm)	0,60	(ABNT, 2003b)

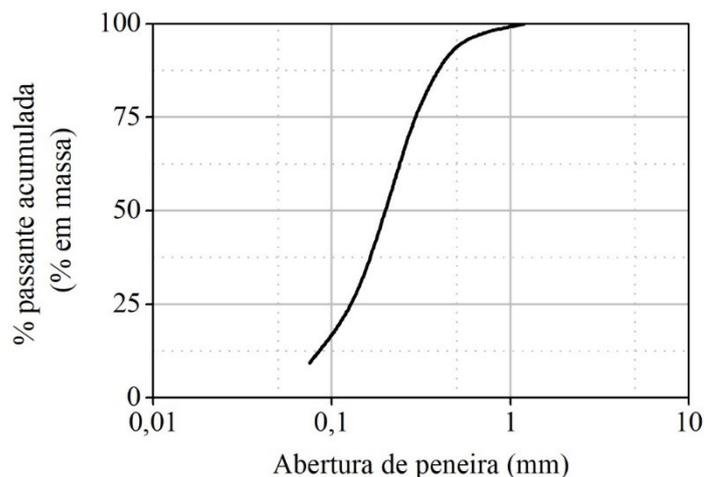


Figura 3.3 - Curva granulométrica do agregado reciclado (ABNT, 2003b).

A microestrutura desse agregado foi analisada por microscopia eletrônica de varredura e está representada na figura 3.4. É possível observar que essa amostra contém partículas de agregado natural com superfície lisa. Entretanto, a maior parte das partículas deste material está recoberta por compostos de cimento hidratado, aumentando sua superfície específica. Essas partículas recobertas tornam-se mais reativas, podendo assim aumentar a carbonatação e a retração na argamassa.

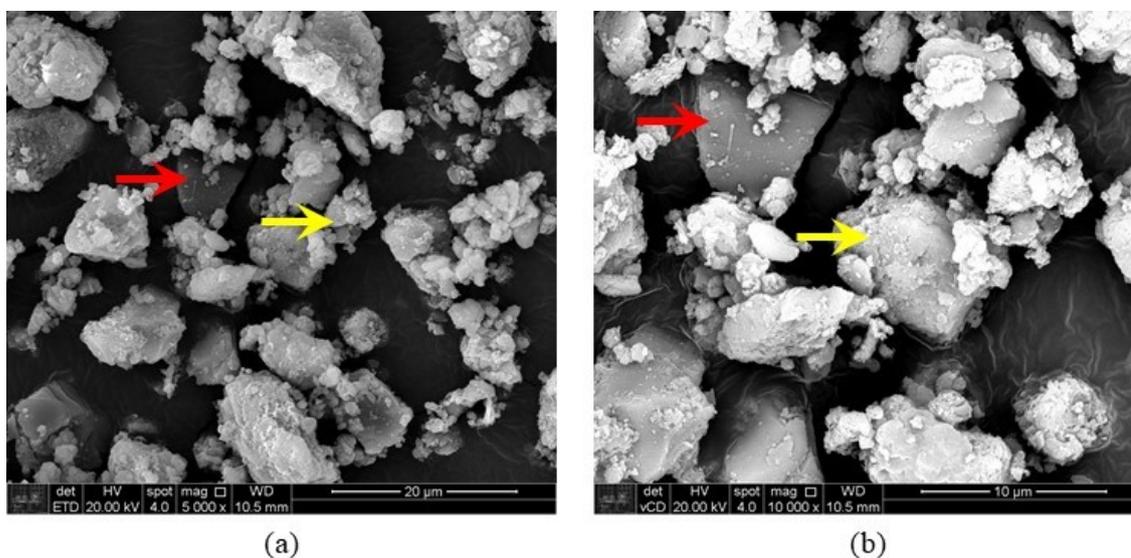


Figura 3.4 - Microestrutura do agregado reciclado: (a) a seta vermelha indica partícula de agregado natural e a seta amarela indica fases de cimento hidratadas; (b) ampliação da figura (a).

### 3.2. Preparação e dosagem das argamassas

As argamassas eram compostas de cimento, agregado natural, agregado reciclado, cal hidratada e água e foram elaborados dois traços diferentes. O primeiro traço teve a composição unitária em massa de 1,0 : 3,0, com relação água/cimento (a/c) igual a 0,67. O segundo teve a composição unitária em massa de 1,0 : 6,0, com relação a/c igual a 1,2.

Para a argamassa 1,0 : 3,0, foram preparadas composições com 100% de agregado natural (AN), 100% de agregado reciclado (AR) e 92,4% de agregado natural e 7,6% de cal hidratada (AN/Cal). A quantidade de cal na argamassa AN/Cal foi determinada considerando o teor de portlandita do agregado reciclado e a pureza da cal hidratada em hidróxido de cálcio.

Argamassas 1,0 : 6,0 foram preparadas com 100% agregado natural, 100% de agregado reciclado, 50% de cada agregado e 92,4% de agregado natural e 7,6% de cal hidratada. As proporções unitárias dos materiais para cada composição estão indicadas na tabela 3.9. As argamassas foram identificadas pela sigla *A* 'traço unitário'\_'tipo de cimento'\_'tipo de agregado'.

Tabela 3.9 - Proporções unitárias em massa dos materiais utilizados em cada traço.

Argamassa	Cimento CP V ARI	Cimento CP III 40 RS	Agregado natural	Agregado reciclado	Cal hidratada	Água
A <sub>1,0:3,0</sub> _CP V_AN	1,0	-	3,0	-	-	0,67
A <sub>1,0:3,0</sub> _CP V_AR	1,0	-	-	3,0	-	0,67
A <sub>1,0:3,0</sub> _CP V_AN/Cal	1,0	-	2,77	-	0,23	0,67
A <sub>1,0:3,0</sub> _CP III_AN	-	1,0	3,0	-	-	0,67
A <sub>1,0:3,0</sub> _CP III_AR	-	1,0	-	3,0	-	0,67
A <sub>1,0:3,0</sub> _CP III_AN/Cal	-	1,0	2,77	-	0,23	0,67
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP V_AN	1,0	-	6,0	-	-	1,2
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP V_AR	1,0	-	-	6,0	-	1,2
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP V_AN/AR	1,0	-	3,0	3,0	-	1,2
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP V_AN/Cal	1,0	-	5,54	-	0,46	1,2
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP III_AN	-	1,0	6,0	-	-	1,2
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP III_AR	-	1,0	-	6,0	-	1,2
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP III_AN/AR	-	1,0	3,0	3,0	-	1,2
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP III_AN/Cal	-	1,0	5,54	-	0,46	1,2

As argamassas foram preparadas adaptando os procedimentos da norma NBR 16738 (ABNT, 2019). Primeiramente, 785 g de cimento foram misturados com 942 g de água por 30 s na velocidade baixa (velocidade rotacional igual a 140 rpm e velocidade planetária igual a 62 rpm). Depois disso, a massa de agregado foi adicionada durante 30 s, realizando a mistura por 30 s na velocidade baixa. Então, a argamassadeira foi desligada, mantendo a mistura em repouso por 90 s. Para finalizar, a argamassa foi misturada por 60 s na velocidade alta (velocidade rotacional igual a 285 rpm e velocidade planetária igual a 125 rpm).

Para cada argamassa, foi produzida uma placa quadrada de dimensões 45 x 45 x 0,7 cm (largura x comprimento x altura). Essas placas foram curadas ao ar. Além disso, foram produzidos 6 corpos de prova de 40 x 40 x 160 mm (largura x altura x comprimento), segundo os procedimentos da norma NBR 16738 (ABNT, 2019). Os corpos de prova foram curados por imersão em solução saturada de cal até um dia antes da idade dos ensaios mecânicos.

### 3.3. Ensaios realizados

Os ensaios realizados para caracterizar as argamassas estão listados na tabela 3.10. A descrição de cada ensaio está apresentada subsequentemente.

Tabela 3.10 - Ensaios realizados para a caracterização das argamassas.

Estado	Ensaio	Amostra	Idade	Referência
Fresco	Índice de consistência	Argamassa no estado fresco	5 min após fabricação	(ABNT, 2016)
	Massa específica	Argamassa no estado fresco	5 min após fabricação	(ABNT, 2008)
	Calorimetria isotérmica	Argamassa no estado fresco	5 min após fabricação	(SALVADOR <i>et al.</i> , 2016)
Endurecido	Análise termogravimétrica	Placas de argamassa	7, 14, 28 e 56 dias	(LOTHENBACH; DURDZINSKI; WEERDT, 2015)
	Profundidade de carbonatação	Placas de argamassa	7, 14, 28 e 56 dias	(RÉUS; JESUS; MEDEIROS, 2017)
	Varição dimensional	Placas de argamassa	Semanalmente	(SALVADOR <i>et al.</i> , 2020)
	Resistência à flexão	Corpos de prova prismáticos	7 e 28 dias	(ABNT, 2019)
	Resistência à compressão	Corpos de prova prismáticos	7 e 28 dias	(ABNT, 2019)

### **3.3.1. Índice de consistência**

A determinação do índice de consistência foi feita utilizando uma mesa de consistência, um molde troncocônico, soquete metálico e um paquímetro de 300 mm, seguindo os procedimentos da NBR 13276 (ABNT, 2016).

### **3.3.2. Massa específica**

A determinação da massa específica foi feita utilizando uma recipiente padrão, uma balança de precisão de 50g e espátula para rasamento, seguindo os procedimentos da NBR 9833 (ABNT, 2008).

### **3.3.3. Calorimetria isotérmica**

A calorimetria isotérmica foi realizada com a finalidade de avaliar o comportamento de hidratação a curta idade das argamassas com agregado reciclado. O ensaio foi realizado por 24 h a 23 °C em um calorímetro isotérmico TAMAir (SALVADOR *et al.*, 2016). Além das argamassas, foram ensaiadas pastas de cimento CP V e CP III, com relação a/c 0,45, como referência para a comparação dos resultados.

### **3.3.4. Análise termogravimétrica**

A quantidade de CO<sub>2</sub> captada pela argamassa foi determinada por análise termogravimétrica. Amostras de 1g de argamassa foram obtidas por meio da raspagem da superfície da argamassa com uma espátula, conforme indicado na figura 3.5. As raspagens foram realizadas até atingir uma profundidade de 1 mm e posteriormente o material foi colocado em cadinhos para aquecerem na Mufla até que as temperaturas de 350, 550, 550 e 750 °C fossem atingidas e em cada etapa do atingimento da temperatura, o material aguardou aproximadamente 15 minutos de resfriamento e foi pesado em balança de precisão para avaliar a perda de massa. A quantidade de CO<sub>2</sub> foi determinada pela perda de massa ocorrida no intervalo entre 550 e 750 °C, correspondente a descarbonatação do carbonato de cálcio

(LOTHENBACH; DURDZINSKI; WEERDT, 2015). Esse ensaio foi realizado nas idades de 7, 14, 28 e 56 dias.

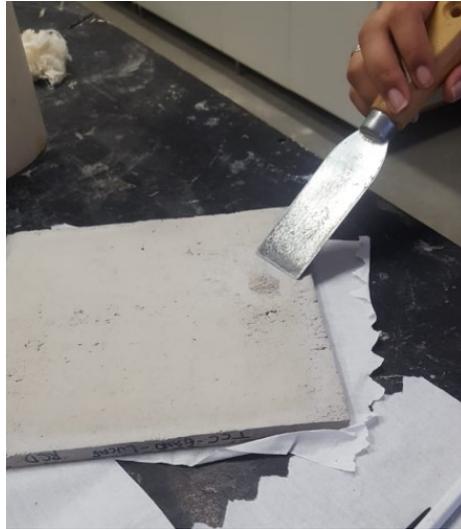


Figura 3.5 - Raspagem da superfície das placas com o auxílio de uma espátula.

### **3.3.5. Profundidade de carbonatação**

A profundidade de carbonatação foi determinada pela aspersão de uma solução etanólica de fenolftaleína a 1% sobre uma superfície da argamassa recém fraturada (RÉUS; JESUS; MEDEIROS, 2017). A profundidade de carbonatação foi determinada pela medição da distância entre a superfície da argamassa e a posição onde o indicador apresentou coloração rosa. Esse ensaio foi realizado nas idades de 7, 14, 28 e 56 dias. A figura 3.6 representa a realização do ensaio.

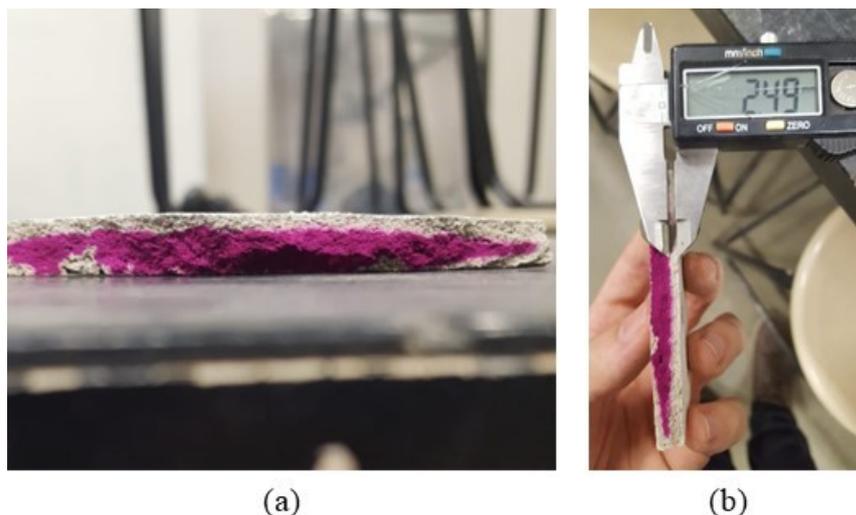


Figura 3.6 - Determinação da profundidade de carbonatação: (a) solução de fenolftaleína em uma superfície recém fraturada; (b) medição da profundidade de carbonatação.

### 3.3.6. Variação dimensional

A variação dimensional foi monitorada para avaliar como o agregado reciclado influencia a estabilidade dimensional das placas de argamassa, adaptando os procedimentos descritos por Salvador *et al.* (SALVADOR *et al.*, 2020). Dois pinos de aço inoxidável foram colados usando um adesivo epóxi na face superior das placas com uma distância de 150 mm entre elas e em três níveis da superfície da placa, para servirem como pontos de referência. A variação do comprimento foi medida em um comparador de comprimento semanalmente, conforme indicado na figura 3.7.

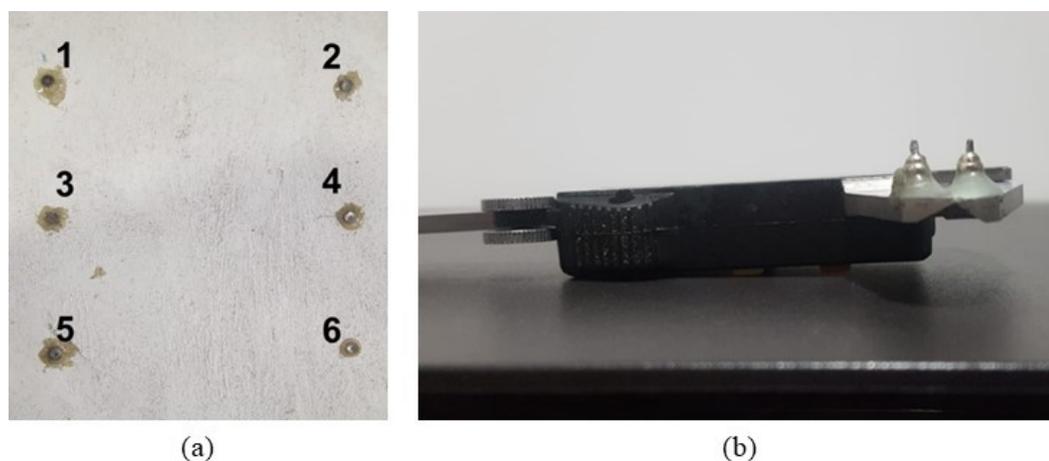


Figura 3.7 - Determinação da variação dimensional: (a) pinos metálicos colados na superfície das placas; (b) medidor de dimensão.

### **3.3.7. Resistência à flexão**

O ensaio de resistência à flexão foi realizado com 3 corpos de prova de 40 x 40 x 160 mm, nas idades de 7 e 28 dias. Foi utilizada uma prensa Kratos com capacidade de 20 tf. A velocidade de aplicação de carga foi igual a 50 N/s, seguindo as recomendações da NBR 16738 (ABNT, 2019).

### **3.3.8. Resistência à compressão**

O ensaio de resistência à compressão foi realizado com 6 corpos de prova de 40 x 40 x 40 mm, nas idades de 7 e 28 dias. Foi utilizada a mesma prensa empregada para o ensaio de flexão. A velocidade de aplicação de carga foi igual a 720 N/s (ABNT, 2019).

## 4. Resultados e discussão

### 4.1. Caracterização das argamassas no estado fresco

#### 4.1.1. Índice de consistência

Os resultados médios da determinação do índice de consistência com as argamassas A<sub>1,0:6,0</sub> estão apresentados na tabela 4.1. A continuação da pesquisa foi realizada com o traço 1,0 : 6,0, devido à maior quantidade de agregado e conseqüentemente, maior emprego do RCD.

As argamassas contendo agregado miúdo reciclado apresentam índices de consistência maiores em comparação aos que utilizaram agregado miúdo natural, ou seja, apresentam melhor trabalhabilidade. Isso ocorreu porque o agregado natural foi levado à estufa antes de ser utilizada na argamassa, ou seja, o agregado miúdo estava seco, já o agregado reciclado não foi levado à estufa antes de ser utilizado. Portanto, o agregado reciclado apresentava certa umidade, que podem ter contribuído para melhorar a trabalhabilidade da argamassa.

Tabela 4.1 - Resultados médios da determinação do índice de consistência.

Argamassa	Índice de consistência (mm)
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP V_AN	192,47
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP V_AR	211,30
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP V_AN/AR	193,28
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP V_AN/Cal	169,32
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP III_AN	180,27
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP III_AR	181,82
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP III_AN/AR	200,47
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP III_AN/Cal	161,05

#### 4.1.2. Massa específica

Os resultados da determinação da massa específica das argamassas  $A_{1,0:6,0}$  estão apresentados na tabela 4.2. As argamassas com agregado reciclado possuem uma massa específica menor quando comparadas às argamassas com agregado miúdo natural. Isso se deve ao fato de o agregado miúdo reciclado possuir menor massa específica, conforme apresentado na tabela 3.8. Dessa forma, quanto maior o teor de agregado reciclado na argamassa, menor será sua massa específica.

Tabela 4.2 - Resultados médios da determinação da massa específica.

Argamassa	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )
$A_{1,0:6,0\_CP\ V\_AN}$	1,90
$A_{1,0:6,0\_CP\ V\_AR}$	1,52
$A_{1,0:6,0\_CP\ V\_AN/AR}$	1,68
$A_{1,0:6,0\_CP\ V\_AN/Cal}$	1,94
$A_{1,0:6,0\_CP\ III\_AN}$	2,05
$A_{1,0:6,0\_CP\ III\_AR}$	1,58
$A_{1,0:6,0\_CP\ III\_AN/AR}$	1,93
$A_{1,0:6,0\_CP\ III\_AN/Cal}$	2,00

#### 4.1.3. Calorimetria isotérmica

As curvas de fluxo de calor e de energia liberada obtidas com as argamassas  $A_{1,0:6,0\_CP\ V}$  estão apresentadas nas figuras 4.1 e 4.2, respectivamente. As curvas de fluxo de calor e de energia liberada obtidas com as argamassas  $A_{1,0:6,0\_CP\ III}$  estão na figura 4.1 e 4.2, respectivamente. Em cada figura, é apresentada a curva de uma pasta de cimento, que serve de referência para a comparação dos resultados das argamassas.

Na figura 4.1, observa-se que a pasta de cimento apresenta tempo de indução de aproximadamente 3 h, alcançando um máximo valor de fluxo de calor no pico principal de hidratação igual a 4,3 mW/g cimento. Analisando a curva de fluxo de calor da argamassa  $A_{1,0:6,0\_CP\ V\_AN}$ , observa-se que o tempo de indução reduz para 2,1 h e a taxa de reação no pico principal aumenta significativamente, atingi um valor máximo de fluxo de calor igual a

9,8 mW/g cimento. Tal fato é devido à inclusão de agregados, que promovem maior cisalhamento das partículas de cimento durante a mistura, aumentando a velocidade de sua dissolução e precipitação (JUILLAND *et al.*, 2012).

Na argamassa,  $A_{1,0:6,0\_CP\ V\_AN/Cal}$ , a aceleração dos processos de hidratação é maior, pois a adição de cal contribui para aumentar a concentração do íon  $Ca^{2+}$  em solução, fazendo com que o meio líquido atinja a supersaturação mais rapidamente (QUARCIONI, 2008). Como o final do período de indução e o início do processo de aceleração dependem da supersaturação da solução com  $Ca^{2+}$ , a adição de cal acelera os processos de hidratação (SALVADOR *et al.*, 2016). Com isso, é possível concluir que a cal acelera o endurecimento da argamassa e pode conferir aumento de resistência mecânica da matriz cimentícia.

Na argamassa,  $A_{1,0:6,0\_CP\ V\_AN/AR}$ , observa-se o maior aumento na velocidade dos processos de hidratação. O primeiro pico de geração de calor é mais intenso que nas demais amostras, indicando alta reatividade da argamassa produzida com agregado reciclado. Como esse agregado possui portlandita em sua composição (tabela 3.8), ocorre aceleração dos processos de hidratação (QUARCIONI, 2008). Além disso, o agregado reciclado é mais fino que o natural e apresenta grande quantidade de partículas de C-S-H, que causa aumento na cinética de hidratação pelo aumento do número de pontos de nucleação para precipitação de fases hidratadas. Portanto, a argamassa  $A_{1,0:6,0\_CP\ V\_AN/AR}$  apresenta a maior energia liberada até o final do ensaio, como pode ser observado na figura 4.2.

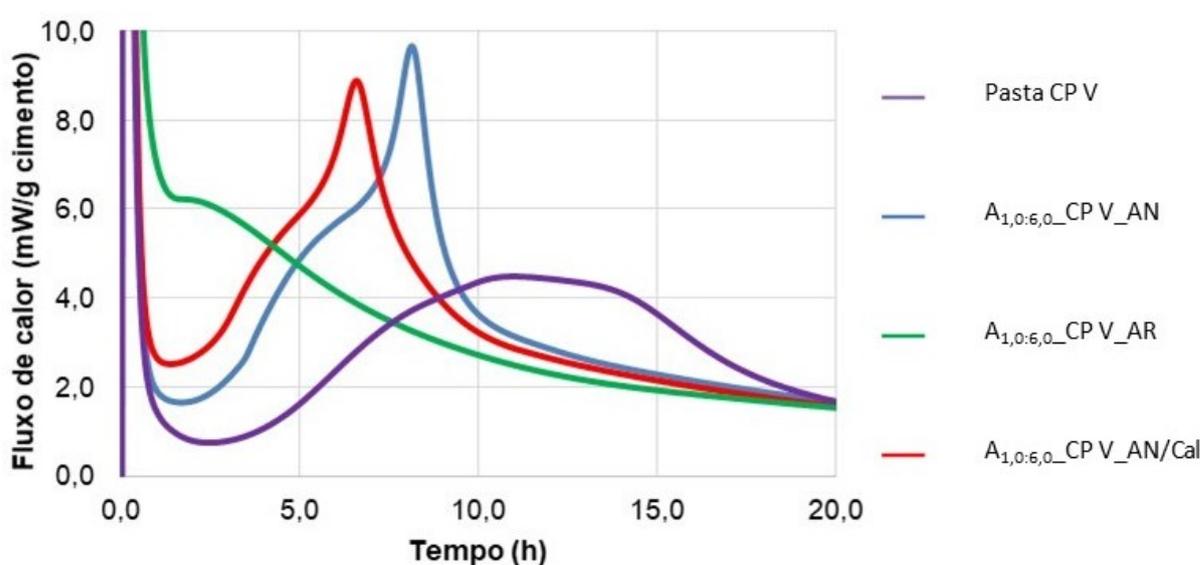


Figura 4.1 - Curvas de fluxo de calor das argamassas  $A_{1,0:6,0\_CP\ V}$ .

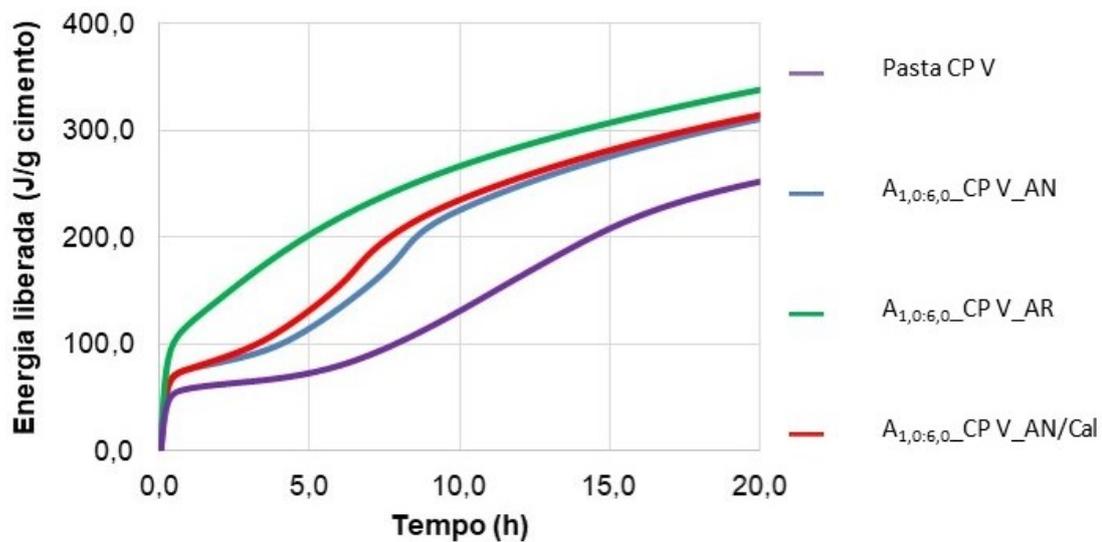


Figura 4.2 - Curvas de energia liberada obtidas com as argamassas A<sub>1,0:6,0</sub>\_CP V.

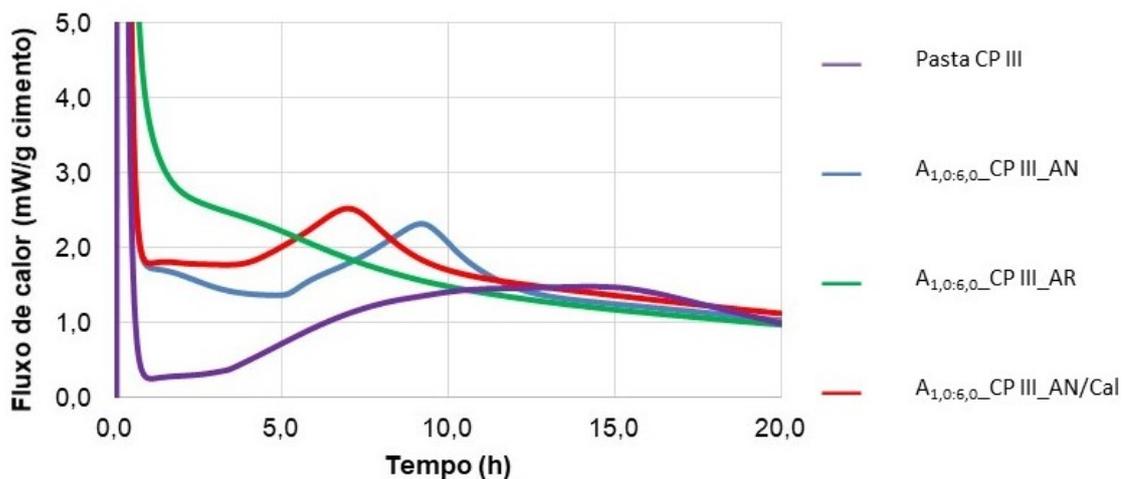


Figura 4.3 - Curvas de fluxo de calor das argamassas A<sub>1,0:6,0</sub>\_CP III.

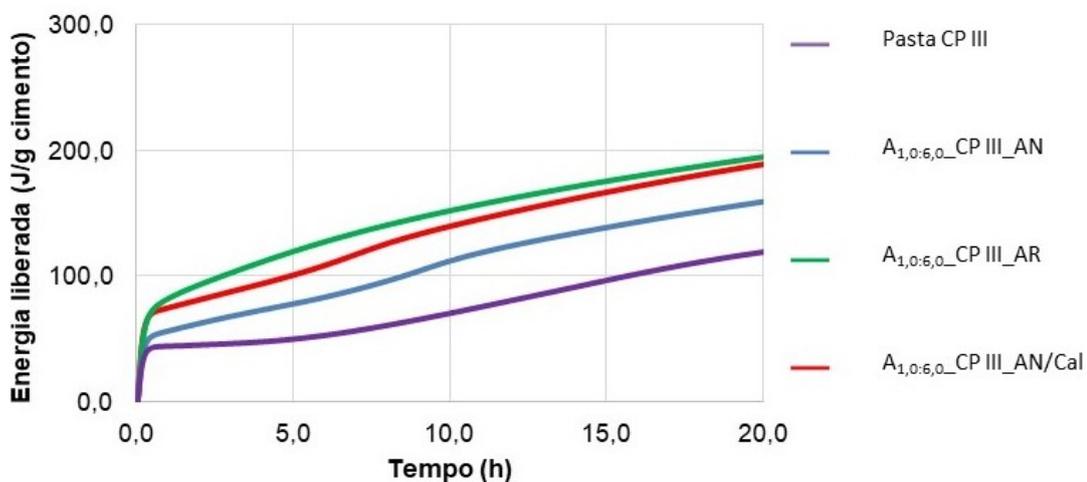


Figura 4.4 - Curvas de energia liberada obtidas com as argamassas A<sub>1,0:6,0</sub>\_CP III.

O comportamento das argamassas produzidas com cimento CP III é bastante semelhante ao das argamassas produzidas com cimento CP V. Nas figuras 4.3 e 4.4, pode ser observado que o agregado reciclado promove aumento na cinética de hidratação e na energia liberada nas argamassas. Entretanto, os valores obtidos são menores do que nas argamassas com cimento CP V, pois o CP III é mais grosso e a escória de alto-forno hidrata mais lentamente que o clínquer (LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011).

## 4.2. Caracterização das argamassas no estado endurecido

### 4.2.1. Análise termogravimétrica

A tabela 4.3 apresenta os resultados da determinação da quantidade de CO<sub>2</sub> captada por cada argamassa. A captação de CO<sub>2</sub> pela argamassa produzida com agregado natural se dá pela reação do CO<sub>2</sub> do ar com a portlandita gerada pelo processo de hidratação do cimento. Com o passar do tempo, mais portlandita é formada pela hidratação do cimento, ou seja, há mais reagente na argamassa para que essa reação aconteça. Portanto, a captação de CO<sub>2</sub> apresenta tendência crescente com o aumento da idade da argamassa.

Tabela 4.3 - Quantidade de CO<sub>2</sub> captado pelas argamassas em diferentes idades.

Argamassa	Teor de CO <sub>2</sub> aos 7 dias (% em massa)	Teor de CO <sub>2</sub> aos 14 dias (% em massa)	Teor de CO <sub>2</sub> aos 28 dias (% em massa)	Teor de CO <sub>2</sub> aos 56 dias (% em massa)
A <sub>1,0:3,0</sub> _CP V_AN	0	5,36	7,90	8,17
A <sub>1,0:3,0</sub> _CP V_AR	0	10,9	11,3	12,7
A <sub>1,0:3,0</sub> _CP V_AN/Cal	0	10,3	11,0	11,5
A <sub>1,0:3,0</sub> _CP III_AN	0	3,08	3,55	5,01
A <sub>1,0:3,0</sub> _CP III_AR	0	9,33	10,9	10,9
A <sub>1,0:3,0</sub> _CP III_AN/Cal	0	5,83	7,19	7,69
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP V_AN	3,70	4,00	4,19	4,45
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP V_AR	11,4	12,4	12,5	12,9
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP V_AN/AR	7,93	8,99	9,00	9,42
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP V_AN/Cal	5,84	6,05	6,78	7,24
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP III_AN	1,84	3,04	3,32	3,86
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP III_AR	6,89	7,34	8,01	8,25
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP III_AN/AR	6,01	6,10	6,32	6,42
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP III_AN/Cal	4,03	4,24	4,42	5,71

Observa-se que a massa de CO<sub>2</sub> captada nas argamassas produzidas com cimento CP V é superior à massa determinada nas argamassas com CP III. Isso ocorre porque o cimento CP V é mais reativo, gerando maior quantidade de portlandita. O cimento CP III contém escória, que se hidrata mais lentamente gera menor quantidade de portlandita que o clínquer.

As argamassas produzidas com 100% de agregado reciclado apresentam a maior captação de CO<sub>2</sub> entre todas as argamassas analisadas. Isso ocorre pois o agregado reciclado contém 5,4% de portlandita (tabela 3.8), ou seja, a portlandita contida no agregado reciclado se soma à quantidade de portlandita gerada pela hidratação do cimento. Com isso, a captação de CO<sub>2</sub> pelo processo de carbonatação da matriz é potencializada.

As massas de CO<sub>2</sub> determinadas nas argamassas produzidas com 50% de cada agregado estão entre os valores quantificados nas argamassas com 100% de agregado reciclado e 100% de agregado natural. Isso ocorre porque há mais portlandita disponível nessa matriz, quando comparada à argamassa produzida com 100% de agregado natural. Além disso, a argamassa produzida com agregado natural e cal apresentou menor captação de CO<sub>2</sub> que a argamassa com 100% de agregado reciclado. Embora as quantidades de hidróxido de cálcio contidas nessas argamassas fossem as mesmas (tabela 3.9), há uma menor reatividade da cal hidratada em relação à portlandita contida no agregado reciclado.

#### **4.2.2. Profundidade de carbonatação**

A tabela 4.4 apresenta os resultados da determinação da profundidade de carbonatação nas argamassas ensaiadas. De acordo com os dados apresentados, observa-se aumento na profundidade de carbonatação com o decorrer da idade das argamassas. Isso ocorre porque a reação começa na superfície das argamassas até esgotar a quantidade de portlandita disponível. A partir disso, a carbonatação tende a continuar pela penetração do CO<sub>2</sub> na matriz, atingindo maiores profundidades.

Tabela 4.4 - Profundidade média de carbonatação das argamassas em diferentes idades.

Argamassa	Profundidade de carbonatação aos 7 dias (mm)	Profundidade de carbonatação aos 14 dias (mm)	Profundidade de carbonatação aos 28 dias (mm)	Profundidade de carbonatação aos 56 dias (mm)
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP V_AN	-	0,87	2,50	5,23
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP V_AR	-	0,77	0,95	2,36
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP V_AN/AR	-	0,93	1,99	5,08
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP V_AN/Cal	-	1,24	1,62	3,49
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP III_AN	-	2,52	5,39	6,33*
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP III_AR	0,32	0,41	1,30	2,50
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP III_AN/AR	0,22	1,19	3,10	4,80
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP III_AN/Cal	0,20	1,99	3,73	7,37*

\* Carbonatação total.

Nas argamassas produzidas com cimento CP V, a profundidade de carbonatação é inferior aos valores determinados nas argamassas com CP III. conforme discutido na seção 4.2.1, o cimento CP V é mais reativo e gera maior quantidade de portlandita que o cimento CP III. Com isso, há uma maior disponibilidade de material reativo na superfície da argamassa, fazendo com que o processo de carbonatação dure mais tempo e demore mais para ocorrer no interior da matriz.

As argamassas produzidas com 100% de agregado reciclado apresentam a menor profundidade de carbonatação entre todas as argamassas analisadas. De maneira semelhante ao resultado a respeito da comparação dos dois cimentos, o agregado reciclado fornece maior quantidade de portlandita à matriz. Portanto, o CO<sub>2</sub> leva mais tempo para penetrar na matriz devido à maior quantidade de material reativo.

As argamassas contendo agregado natural apresentam a maior profundidade de carbonatação. Observa-se que as argamassas A<sub>1,0:6,0</sub>\_CP III\_AN e A<sub>1,0:6,0</sub>\_CP III\_AN/Cal apresentaram carbonatação total aos 56 dias. A partir destes resultados, pode ser concluído novamente que a reatividade da cal hidratada é inferior à reatividade da portlandita contida no agregado reciclado.

### 4.2.3. Variação dimensional

As curvas de variação dimensional obtidas com as argamassas  $A_{1,0:6,0\_CP V}$  e  $A_{1,0:6,0\_CP III}$  estão apresentadas nas figuras 4.5 e 4.6, respectivamente. Pode ser observado que as argamassas produzidas com agregado natural são as que menos retraem. Já as argamassas que contêm agregado reciclado são as que apresentam maior retração, sendo esta diretamente relacionada à quantidade de agregado reciclado utilizado.

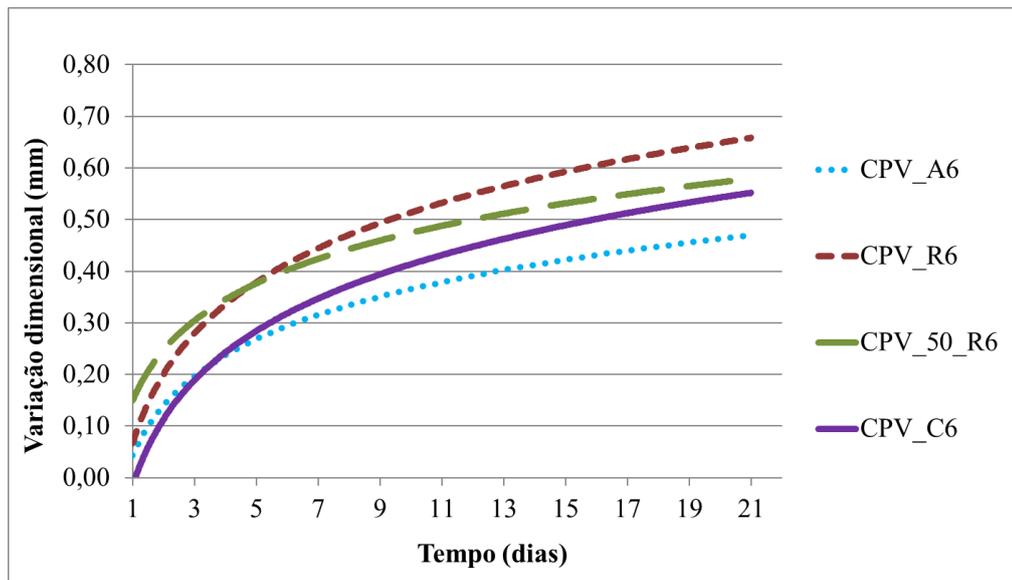


Figura 4.5 - Variação dimensional obtida com as argamassas  $A_{1,0:6,0\_CP V}$ .

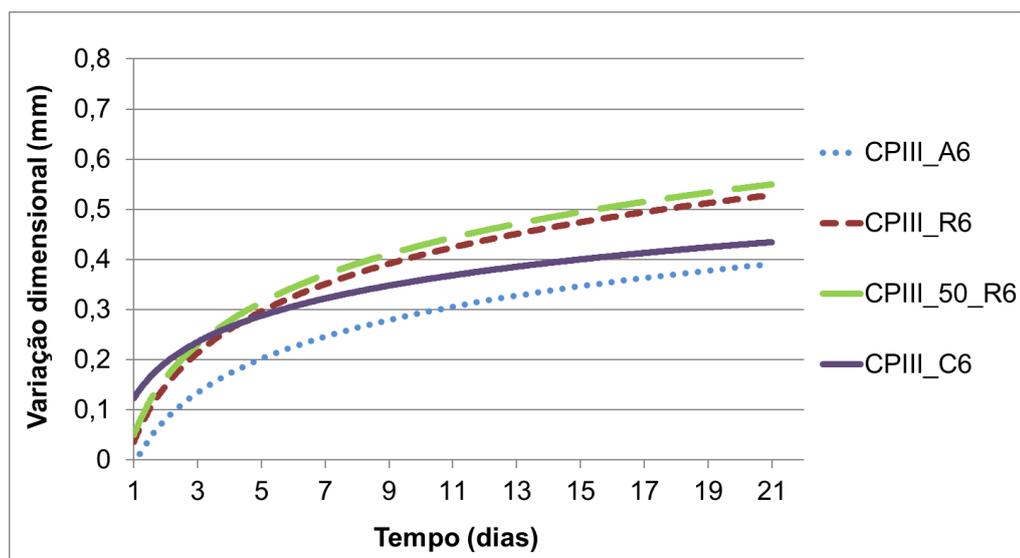


Figura 4.6 - Variação dimensional obtida com as argamassas  $A_{1,0:6,0\_CP III}$ .

Conforme discutido nas seções 4.2.1 e 4.2.2, as argamassas produzidas com 100% de agregado reciclado apresentam a maior taxa de carbonatação. A reação da portlandita com o CO<sub>2</sub> do ar forma carbonato de cálcio e água (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Como o carbonato de cálcio tem menor massa específica molar que a portlandita (LANGE, 1999), a argamassa tende a retrair. Além disso, a perda da água formada por essa reação causa retração, semelhantemente à retração por secagem. Dessa forma, quanto maior for a carbonatação da amostra, maior será sua retração.

#### 4.2.4. Resistência à flexão e à compressão

A tabela 4.5 apresenta os resultados médios dos valores de resistência à flexão e à compressão das argamassas ensaiadas aos 7 e 28 dias. Primeiramente, por ser observado que a resistência da argamassa aumenta com a idade, como esperado. Além disso, as argamassas produzidas com cimento CP V apresentam maiores resistências que as argamassas produzidas com cimento CP III, pois este cimento é mais reativo a curtas idades.

Tabela 4.5 - Resultados médios de resistência à flexão e à compressão.

Argamassa	f <sub>ctm</sub> aos 7 dias (MPa)	f <sub>ctm</sub> aos 28 dias (MPa)	f <sub>cm</sub> aos 7 dias (MPa)	f <sub>cm</sub> aos 28 dias (MPa)
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP V_AN	2,5 ± 0,1	2,7 ± 0,4	6,5 ± 1,0	10,3 ± 0,9
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP V_AR	2,4 ± 0,2	2,7 ± 0,4	10, ± 0,9	13,3 ± 0,4
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP V_AN/AR	2,1 ± 0,2	2,9 ± 0,3	6,2 ± 0,7	11,2 ± 0,4
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP V_AN/Cal	2,4 ± 0,2	3,1 ± 0,3	9,4 ± 1,1	13,3 ± 0,7
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP III_AN	1,8 ± 0,2	2,0 ± 0,7	4,3 ± 0,7	7,7 ± 0,7
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP III_AR	2,1 ± 0,6	2,7 ± 0,3	6,7 ± 0,2	9,4 ± 0,6
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP III_AN/AR	1,8 ± 0,1	2,3 ± 0,5	6,4 ± 0,7	9,8 ± 0,7
A <sub>1,0:6,0</sub> _CP III_AN/Cal	2,0 ± 0,1	2,4 ± 0,1	6,4 ± 0,6	8,4 ± 0,6

Os corpos de prova produzidos com 100% de agregado reciclado apresentaram maiores resistências à flexão e à compressão que as demais argamassas nas duas idades analisadas. Conforme resultados obtidos na análise termogravimétrica, a argamassa contendo 100% de agregado reciclado apresenta maior teor de CO<sub>2</sub> captado, ou seja, maior teor de carbonato de cálcio formado durante a cura. Como esse composto é sólido, sua formação tende a preencher

os poros da argamassa. Então, como a resistência mecânica é indiretamente proporcional à porosidade, o processo de carbonatação contribui para aumentar a resistência mecânica da argamassa.

## **5. Análise de viabilidade para a utilização de agregado reciclado em argamassas de revestimento**

### **5.1. A demanda pela utilização de agregados reciclados**

O uso de agregados reciclados para produção de concretos e argamassas é uma alternativa sustentável que pode substituir a demanda por agregados naturais à longo prazo. Países como Austrália e Alemanha apresentam uma taxa de reciclagem de resíduos de construção para produção de agregados da ordem de 50%. Já na Dinamarca, Estônia e Japão, a taxa de reciclagem supera os 80% (WIJAYASUNDARA *et al.*, 2016).

No Brasil, a Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010 institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, que visa definir a forma de como o país deve dispor os seus resíduos, incentivando a reciclagem e a sustentabilidade (BRASIL, 2010). Entretanto, de acordo com o IBGE (IBGE, 2008), 72,45% dos municípios brasileiros possuem serviço de manejo do RCD, 2,23% possuem a triagem simples do RCD das classes A e B, em 0,36% existe triagem e trituração dos resíduos classe A com classificação granulométrica dos agregados reciclados e somente em 1,42% dos municípios existe o programa de reaproveitamento dos agregados reciclados na fabricação de componentes construtivos. A partir dessa análise, conclui-se que a maior parte do RCD produzido no Brasil não é reciclada.

Na construção civil, existe um enorme potencial de absorver os resíduos sólidos, tendo como principais aplicações as camadas de base e sub-base para pavimentação, coberturas primárias de vias e fabricação de concretos. Para argamassas de revestimento, a grande vantagem do uso de agregados reciclados é devido à captura de CO<sub>2</sub> por seu processo de carbonatação, conforme discutido no item 2.5. Para essa finalidade e para aumentar a sustentabilidade do ambiente construído, os principais pontos a serem analisados estão descritos nos itens 5.2 a 5.5.

## 5.2. Propriedades químicas e físicas de agregados reciclados para otimizar a captação de CO<sub>2</sub>

As principais propriedades físicas e químicas de interesse para otimizar a captação de CO<sub>2</sub> pelos agregados reciclados em argamassas de revestimento estão listadas na tabela 5.1. Primeiramente, é necessário que o agregado esteja homogêneo e seja composto maioritariamente por argamassa endurecida, composta por areia, cimento hidratado e não hidratado. Agregados com alto teor de contaminantes, como cerâmica, madeira e argila, devem ser evitados, pois esses compostos não contribuem para a captação de CO<sub>2</sub>.

Tabela 5.1 - Propriedades físicas e químicas de agregados reciclados para otimizar a captação de CO<sub>2</sub> em argamassas de revestimento.

Item	Resultado ideal
Teor de argamassa e agregado miúdo	> 90% em massa
Teor de impurezas (cerâmica, madeira, argila)	< 10% em massa
Teor de portlandita	O máximo possível
Teor de carbonato de cálcio	O mínimo possível
Umidade	Agregados seco
Módulo de finura	1,5 a 3,0
Teor de sulfatos	< 1,0% em massa
Compostos orgânicos	< 0,50% em massa
Granulometria	Dentro do limite ótimo da NBR 7211 (ABNT, 2009b)

Como a portlandita é a principal fase hidratada que reage com o CO<sub>2</sub> para formar CaCO<sub>3</sub>, é ideal que o agregado reciclado contenha o maior teor de fase disponível. Dessa forma, aumenta-se o potencial de captura de CO<sub>2</sub> pela argamassa de revestimento. Além disso, é importante limitar a quantidade de CaCO<sub>3</sub> que o agregado contenha, pois esse é um indicativo que parte da portlandita no agregado já foi carbonatada antes de sua utilização na argamassa.

Seguindo nesse raciocínio, os agregados reciclados devem ser secos e ter baixa absorção de água, visto que a umidade é um dos fatores necessários para que a carbonatação ocorra. Dessa forma, o agregado reciclado não será carbonatado antes de seu emprego para a produção de argamassas. Recomenda-se limitar os teores de compostos orgânicos e sulfatos, para

minimizar a possibilidade da ocorrência de manifestações patológicas no revestimento (OIKONOMOU, 2005).

Por fim, recomenda-se que o módulo de finura do agregado esteja entre 1,5 a 3,0 e que a granulometria do agregado obedeça os limites ótimos da NBR 7211 (ABNT, 2009b). Assim, pode ser fabricada uma argamassa de revestimento cujas propriedades do estado fresco sejam semelhantes a argamassas produzidas com agregado natural. De acordo com os pontos levantados, existe uma clara indicação que o teor de cada composto no agregado reciclado tem um papel fundamental na sua aplicação em argamassas de revestimento. A composição dos elementos que serão reciclados para a produção de agregados deve ser conhecida para obter agregados com uma composição otimizada para a captura de CO<sub>2</sub>.

### 5.3. Aspectos econômicos

A falta de conhecimento do custo-benefício da produção de agregados reciclados é um problema que requer atenção pelo impacto na dinâmica operacional da indústria. Atualmente, os custos relativos à produção de concreto com agregado reciclado nas etapas de controle de qualidade, infraestrutura e mão de obra correspondem a 22%, 48% e 30%, respectivamente (MAKUL, 2020). Para a produção de concreto, estimam-se os aumentos de custos pela utilização de agregados reciclados descritos na tabela 5.2 (WIJAYASUNDARA *et al.*, 2016).

Tabela 5.2 - Resultados médios de aumento de custo com utilização de RCD (WIJAYASUNDARA *et al.*, 2016).

Teor de substituição de agregado natural (% em massa)	Aumento de custo (%)
30	0 - 15
50	7,5 - 15
70	5,0 - 17,5
100	5,0 - 17,5

Apesar do custo, tendências atuais onde agregados reciclados estão substituindo agregados naturais gradualmente têm ganhado atenção devido a diversos motivos. Por exemplo, sua utilização promove a redução do descarte de resíduos em aterros. Além disso, reduz significativamente a demanda de agregado natural e sua escassez. Dessa forma, a produção de argamassas e concretos contendo agregado reciclados tende a ganhar força em breve.

#### 5.4. Disponibilidade de agregados naturais

Um grande problema atual é a falta de agregados naturais próximas às regiões metropolitanas. Na Região Metropolitana de São Paulo, há carência de areia e as minerações de areia que atendem essa região chegam a se distanciar até 150 km (FALCÃO *et al.*, 2013). Internacionalmente, a distância para transporte de agregados naturais é de aproximadamente 100 km e de agregados reciclados é de 15 a 50 km (ZHANG *et al.*, 2019).

Embora o transporte contribua apenas para 4 a 14% do impacto ambiental da produção de concreto (OLIVEIRA; PACCA; JOHN, 2016), é necessário avaliar o efeito do transporte no impacto ambiental de agregados naturais e reciclados. Isso é necessário porque os agregados são uma *comodity* de baixo valor e são o material mais volumoso do concreto. Portanto, para analisar o impacto do uso de agregados reciclados, atenção especial deve ser prestada no tipo de transporte utilizado para os agregados.

#### 5.5. Influência da utilização de agregados reciclados em argamassa de revestimento no balanço de CO<sub>2</sub>

Quantificar o impacto ambiental dos agregados reciclados pode fornecer um suporte na tomada de decisão na seleção de materiais para produzir argamassas de revestimento. A tabela 5.3 apresenta os valores médios da energia consumida para a produção dos compositos, da quantidade de CO<sub>2</sub> emitida e da quantidade de CO<sub>2</sub> captada pelos materiais empregados na fabricação dessas argamassas.

Tabela 5.3 - Energia consumida, quantidade de CO<sub>2</sub> emitida e capturada por materiais de construção (MISTRI *et al.*, 2020; QUATTRONE; ANGULO; JOHN, 2014).

Material	Energia consumida (kJ/kg)	Quantidade de CO <sub>2</sub> emitida (kg/kg)	Quantidade de CO <sub>2</sub> captada (kg/kg)
Cimento	4464	0,894	0,17*
Cal hidratada	4644	1,20	0,79
Agregado natural	23,8	0,20	-
Agregado reciclado	7,4	0,20	0,04**

\* considerando um cimento totalmente hidratado, contendo 22% de portlandita (TAYLOR, 1997).

\*\* considerando o agregado reciclado produzido nessa pesquisa.

Considerando a dosagem unitária em massa de uma argamassa de revestimento igual a 1,0 : 1,0 : 6,0 (cimento : cal hidratada : agregado miúdo) e os dados da tabela 5.3, calcula-se que 1 kg de argamassa produzida com 100% de agregado natural emite 2,4 kg de CO<sub>2</sub>. Analisando uma argamassa produzida com 100% de agregado reciclado em substituição ao agregado natural e à cal hidratada, a emissão de CO<sub>2</sub> encontrada é igual a 1,7 kg. Portanto, a utilização de agregados em argamassas de revestimento pode contribuir para a redução de 29% nas emissões de CO<sub>2</sub> por esse material.



## 6. Conclusões e perspectivas futuras

### 6.1. Conclusões

A partir dos resultados obtidos na nessa pesquisa, pode ser concluído que:

- As argamassas produzidas com agregado reciclado apresentaram propriedades do estado fresco semelhantes às argamassas produzidas com agregado natural.
- O agregado reciclado promove aumento na velocidade e na energia liberada pela hidratação das argamassas. Tal fato ocorre porque o agregado reciclado contém portlandita, que acelera os processos de hidratação dos silicatos. Além disso, como o agregado reciclado apresenta alta superfície específica e contém fases hidratadas em sua superfície, a cinética de hidratação é otimizada pelo aumento do número de pontos de nucleação para precipitação de fases hidratadas.
- O emprego de agregado reciclado na fabricação de argamassas de revestimento contribui para melhorar a captação de CO<sub>2</sub>. Tal fato ocorre porque o agregado reciclado contém portlandita, que pode ser carbonatada.
- Quanto maior o teor de agregado reciclado utilizado, maior é o potencial de captação de CO<sub>2</sub> pela argamassa.
- O processo de carbonatação leva à formação de carbonato de cálcio e água. Como o carbonato de cálcio apresenta menor volume molar que a portlandita, a reação de carbonatação causa retração da argamassa.
- O processo de carbonatação preenche os poros da argamassa com carbonato de cálcio. Devido a isso, a utilização de agregados reciclados contribui para aumentar a resistência mecânica das argamassas.
- De acordo com os resultados da análise da utilização de agregados reciclados em argamassas de revestimentos, pode ser concluído que a substituição dos agregados naturais

e da cal pelos agregados reciclados contribui para uma redução de 29% nas emissões de CO<sub>2</sub> por esse sistema de revestimento.

## **6.2. Perspectivas futuras**

Para trabalhos futuros, são indicados os seguintes tópicos de pesquisa:

- Realizar uma análise química mais aprofundada do agregado reciclado empregado, para analisar sua influência nas propriedades da argamassa.
- Analisar a porosidade, a permeabilidade e o módulo de elasticidade de argamassas produzidas com agregados reciclados.
- Analisar agregados reciclados obtidos em campo para a produção de argamassas de revestimento.
- Analisar argamassas com diferentes teores de substituição de agregado naturais.
- Definir os critérios para fabricação e para o controle de qualidade de agregados reciclados destinados à fabricação de argamassas de revestimento.
- Realizar uma análise de ciclo de vida de argamassas de revestimento e compará-la com outros sistemas de vedação e revestimento.
- Avaliar a compatibilidade das argamassas de revestimento contendo agregados reciclados com sistemas de pintura.

## 7. Publicações

As seguintes publicações derivaram dessa pesquisa:

- CAMARGO, A.B.; SALVADOR, R.P. Desenvolvimento argamassas de revestimento captoras de CO<sub>2</sub> com utilização de resíduos de construção. In: I Seminário de Pós-Graduação Stricto Sensu da Universidade São Judas Tadeu: Desafios para a Pós-Graduação Stricto Sensu, 2020, São Paulo. I Seminário de Pós-Graduação Stricto Sensu da Universidade São Judas Tadeu: Desafios para a Pós-Graduação Stricto Sensu, 2020.
- LIMA, D.A.D.; MAIA, L. CONCEIÇÃO, V.; CAMARGO, A.B.; RESENDE, M.M.; SALVADOR, R.P. Desenvolvimento de argamassas de revestimento captoras de CO<sub>2</sub> pelo uso de resíduos de construção como agregados. In: 62º Congresso Brasileiro do Concreto - 62CBC, 2020, Evento virtual. 62º Congresso Brasileiro do Concreto. São Paulo: IBRACON, 2020.



## Referências bibliográficas

AITCIN, P.-C.; MINDESS, S. **Sustainability of Concrete (Modern Concrete Technology)**. 1st. ed. London: Taylor & Francis Ltd, 2011.

AKHTAR, A.; SARMAH, A. K. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 262–281, 2018.

ALVES, J. E. D. **Concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera bate recorde histórico em 2019**. Disponível em: <<https://www.ecodebate.com.br/2020/01/13/concentracao-de-co2-na-atmosfera-bate-recorde-historico-em-2019-artigo-de-jose-eustaquio-diniz-alves/>>. Acesso em: 19 jun. 2020.

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

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003b.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 15114: Resíduos sólidos da Construção civil - Áreas de reciclagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004a.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004b.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 9833: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 13529**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação do índice de consistência Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 16738**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

BAÍA, L. L. M.; SABBATINI, F. H. **Projeto e execução de revestimento de argamassa**. 1a. ed. São Paulo: O Nome da Rosa, 2000.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, DF: Presidência da República [2010]. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm). Acesso em: 20 jun. 2020.

CETESB. **Inventário de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa Diretos e Indiretos do Estado de São Paulo**. São Paulo, 2011.

CHAU, C. K.; LEUNG, T. M.; NG, W. Y. A review on life cycle assessment, life cycle energy assessment and life cycle carbon emissions assessment on buildings. **Applied Energy**, v. 143, n. 1, p. 395–413, 2015.

CINCOTTO, M. A. Reações de hidratação e pozolânicas. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2a. ed. São Paulo: Ibracon, 2011.

CURY, M. E. **Níveis de CO<sub>2</sub> na atmosfera aumentaram de forma nunca vista antes**. Disponível em: [https://exame.com/ciencia/niveis-de-co2-na-atmosfera-aumentaram-de-forma-nunca-vista-antes/#:~:text=A concentração de dióxido de carbono \(CO<sub>2</sub>\) hoje na atmosfera,combustíveis fósseis e ao desmatamento.>](https://exame.com/ciencia/niveis-de-co2-na-atmosfera-aumentaram-de-forma-nunca-vista-antes/#:~:text=A%20concentra%C3%A7%C3%A3o%20de%20di%C3%B3xido%20de%20carbono%20(CO2)%20hoje%20na%20atmosfera,combust%C3%ADveis%20f%C3%B3sseis%20e%20ao%20desmatamento.>). Acesso em: 19 jun. 2020.

DENG, X. *et al.* Effect of hydrated lime on structures and properties of decorative rendering mortar. **Construction and Building Materials**, v. 256, p. 119485, 2020.

DIMITRIOU, G.; SAVVA, P.; PETROU, M. F. Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 228–235, 2018.

DIRUR. **Pesquisa sobre pagamento por serviços ambientais urbanos para gestão de resíduos sólidos**. Brasília: 2010. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/4E1B1104/EstudoIPEA\\_CS.pdf](http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/4E1B1104/EstudoIPEA_CS.pdf)>.

FALCÃO, C. M. B. B. *et al.* **Análise da qualidade do investimento e emissões de CO<sub>2</sub> associadas à produção de agregados reciclados na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP)**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2013.

FELIX, E. F.; POSSAN, E. Balance emissions and CO<sub>2</sub> uptake in concrete structures: simulation based on the cement content and type. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 11, n. 1, p. 135–162, 2018.

FERNÁNDEZ BERTOS, M. *et al.* A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO<sub>2</sub>. **Journal of Hazardous Materials**, v. 112, n. 3, p. 193–205, 2004.

GALAN, I. *et al.* Sequestration of CO<sub>2</sub> by concrete carbonation. **Environmental Science Technology**, v. 44, 12 mar. 2010.

HEMALATHA, A. C.; MYSORE, C.; NAGARAJ, N. Effect of sand mining on groundwater depletion in karnataka. **University of Agricultural Sciences, Bangalore, Department of Agricultural Economics, Conference Papers**, 1 jan. 2005.

IBGE. **Banco de dados Agregados, Censo 2008**.

JACOBI, P.R.; BESEN, G.R. Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade. **Estudos Avançados**, v. 25, n. 71, p. 135–158, 2011.

JOHANNESSON, B.; UTGENANNT, P. Microstructural changes caused by carbonation of cement mortar. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 6, p. 925–931, 2001.

JUILLAND, P. *et al.* Effect of mixing on the early hydration of alite and OPC systems. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 9, p. 1175–1188, 2012.

KOEHNKEN, L.; RINTOUL, M. **Impacts of Sand Mining on Ecosystem Structure, Process & Biodiversity in Rivers**. Morges: 2018.

KONDOLF, G. M. PROFILE: Hungry Water: Effects of Dams and Gravel Mining on River Channels. **Environmental Management**, v. 21, n. 4, p. 533–551, 1997.

LANGE, N. A. **Lange's Handbook of Chemistry**. 15th. ed. New York: McGraw-Hill, 1999.

LIANG, C. *et al.* Utilization of CO<sub>2</sub> curing to enhance the properties of recycled aggregate and prepared concrete: A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 105, n. July 2019, p. 103446, 2020.

LÓPEZ-ALONSO, M. *et al.* Feasible use of recycled alumina combined with recycled aggregates in road construction. **Construction and Building Materials**, v. 195, p. 249–257, 2019.

LOTHENBACH, B.; DURDZINSKI, P.; WEERDT, K. D. E. Thermogravimetric analysis. In: SCRIVENER, K. L.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. (Eds.). . **A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials**. 1st. ed. London: CRC Press, 2015. p. 177–212.

LOTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 12, p. 1244–1256, 2011.

MAHASENAN, N.; SMITH, S.; HUMPHREYS, K. **The cement industry and global climate change: current and potential future cement industry CO<sub>2</sub> emissions**. In: (J. Gale, Y. B. . Kaya, Eds.) Proceedings of the 6th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies. Anais...Oxford: Pergamon, 2003Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080442761501574>>.

MAKUL, N. **Cost-benefit analysis of the production of ready-mixed high-performance concrete made with recycled concrete aggregate**: A case study in Thailand. *Heliyon*, v. 6, n. June, p. e04135, 2020.

MEHTA, K. P.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. 4th. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.

MIRANDA, L. F. R.; SELMO, S. M. S. CDW recycled aggregate renderings: Part I - Analysis of the effect of materials finer than 75 µm on mortar properties. **Construction and Building Materials**, v. 20, n. 9, p. 615–624, 2006.

MISTRI, A. *et al.* A review on different treatment methods for enhancing the properties of recycled aggregates for sustainable construction materials. **Construction and Building Materials**, v. 233, p. 117894, 2020.

MONTE, R.; BARROS, M. M. S. B.; FIGUEIREDO, A. D. DE. Evaluation of early age cracking in rendering mortars with polypropylene fibers. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 2, p. 21–32, 2018.

NAMARAK, C.; TANGCHIRAPAT, W.; JATURAPITAKKUL, C. Bar-concrete bond in mixes containing calcium carbide residue, fly ash and recycled concrete aggregate. **Cement and Concrete Composites**, v. 89, p. 31–40, 2018.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 2016.

OIKONOMOU, N. D. Recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 2, p. 315–318, 2005.

OLIVEIRA, L. S.; PACCA, S. A.; JOHN, V. M. Variability in the life cycle of concrete block CO<sub>2</sub> emissions and cumulative energy demand in the Brazilian Market. **Construction and Building Materials**, v. 114, n. January 2015, p. 588–594, 2016.

OLIVEIRA, M. E. D. *et al.* Diagnóstico da geração e da composição dos RCD de Fortaleza/CE. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 16, n. 3, p. 219–224, 2011.

ONU. Adoção do Acordo Paris. **Convenção quadro sobre mudança do clima**, v. 4, p. 1–42, 2015.

PADE, C.; GUIMARAES, M. The CO<sub>2</sub> uptake of concrete in a 100 year perspective. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 9, p. 1348–1356, 2007.

PENG, C. Calculation of a building's life cycle carbon emissions based on Ecotect and building information modeling. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 453–465, 2016.

PEPE, M. *et al.* A novel mix design methodology for recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 122, n. 2016, p. 362–372, 2016.

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

QUATTRONE, M.; ANGULO, S. C.; JOHN, V. M. Energy and CO<sub>2</sub> from high performance recycled aggregate production. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 90, p. 21–33, 2014.

RÉUS, G. C.; JESUS, A. R. DE; MEDEIROS, M. H. F. DE. **Aplicação de solução comercial alcalina para realcalinização química de concretos carbonatados**. 2º Simpósio Paranaense de Patologia das Construções. **Anais...**Curitiba: 2017

SÁEZ DEL BOSQUE, I. F. *et al.* Carbonation of concrete with construction and demolition waste based recycled aggregates and cement with recycled content. **Construction and Building Materials**, v. 234, p. 117336, 2020.

SANTOS, C.J.R. *et al.* **Estudo do comportamento mecânico do concreto à partir da utilização do RCD como agregado graúdo**. In: 1º Congresso Sul-Americano de resíduos sólidos e sustentabilidade. CONRESOL: Gramado, 2018.

SALVADOR, R. P. *et al.* Early age hydration of cement pastes with alkaline and alkali-free accelerators for sprayed concrete. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 386–398, 2016.

SALVADOR, R. P. *et al.* Influence of accelerator type and dosage on the durability of wet-mixed sprayed concrete against external sulfate attack. **Construction and Building Materials**, v. 239, p. 117883, 2020.

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

SCRIVENER, K. L.; NONAT, A. Hydration of cementitious materials, present and future. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 7, p. 651–665, 2011.

SHI, C. *et al.* Performance of mortar prepared with recycled concrete aggregate enhanced by CO<sub>2</sub> and pozzolan slurry. **Cement and Concrete Composites**, v. 86, p. 130–138, 2018.

SILVA, R.V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. Use of recycled aggregates arising from construction and demolition waste in new construction applications. **Journal of Cleaner Production**, v. 236, p. 117629, 2019.

SINDUSCON-SP. **Gestão ambiental de resíduos da construção civil: A experiência do SindusCon-SP**. 1a. ed. São Paulo: SINDUSCON, 2005.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 2a. ed. Londres: Thomas Telford Publishing, 1997.

WANG, C. *et al.* Interfacial properties of modeled recycled aggregate concrete modified by carbonation. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 307–320, 2016.

WIJAYASUNDARA, M. *et al.* Financial assessment of manufacturing recycled aggregate concrete in ready-mix concrete plants. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 109, p. 187–201, 2016.

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

YEN, T.; HASHIM, R. Status of Water Quality Subject to Sand Mining in the Kelantan River, Kelantan. **Tropical life sciences research**, v. 24, p. 19–34, 1 ago. 2013.

ZHANG, Y. *et al.* A review of life cycle assessment of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 209, p. 115–125, 2019.

ZHU, P. *et al.* Durability evaluation of three generations of 100% repeatedly recycled coarse aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 210, p. 442–450, 2019.

VITAL, M. H. F. **Aquecimento Global: Acordos internacionais, emissões de CO2 e o surgimento dos mercados de carbono no mundo**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 48, p. 167-244, set. 2018.