



Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

**Influência da substituição parcial do
cimento por sílica ativa nas propriedades de
argamassas de chapisco com agregado
reciclado de concreto**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Wellington de Sousa Cruz

2023

Wellington de Sousa Cruz

Influência da substituição parcial do cimento por sílica ativa nas propriedades de argamassas com agregado reciclado de concreto

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre.

Orientadora: Profª. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro

Belém, 13 de abril de 2023

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Wellington de Sousa Cruz.

TÍTULO: Influência da substituição parcial do cimento por sílica ativa nas propriedades de argamassas com agregado reciclado de concreto.

GRAU: Mestre ANO: 2023

É concedida à Universidade Federal do Pará permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Wellington de Sousa Cruz.

Travessa São Francisco, nº 450. Batista Campos.
66.023-185 Belém – PA – Brasil.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

D278i de Sousa Cruz, Wellington.
Influência da substituição parcial do cimento por sílica ativa nas
propriedades de argamassas com agregado reciclado de concreto /
Wellington de Sousa Cruz. — 2023.
70 f.

Orientador(a): Prof^a. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, Belém, 2023.

1. Agregados reciclados, sílica ativa, argamassas, ACV. I.
Título.

CDD 620.112

INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO POR SÍLICA ATIVA NAS PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS DE CHAPISCO COM AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO

AUTOR:

WELINGTON DE SOUSA CRUZ

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA
EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL NA
ÁREA DE ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO EM: 13/04/2023

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
 LUCIANA DE NAZARE PINHEIRO CORDEIRO
Data: 18/04/2023 08:52:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro
Orientador (UFPA)

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Membro Interno (UFPA)

Mateus Antonio Nogueira Assinado de forma digital por Mateus
Oliveira:07735649690 Antonio Nogueira Oliveira:07735649690
Dados: 2023.05.04 16:37:39 -03'00'

Prof. Dr. Mateus Antônio Nogueira Oliveira
Membro Externo (UFMG)

Visto:

Documento assinado digitalmente
 MARCELO DE SOUZA PICANCO
Data: 26/04/2023 13:58:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

Wellington de Sousa Cruz

Influência da substituição parcial do cimento por sílica ativa nas propriedades de argamassas com agregado reciclado de concreto.

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre.

Belém, 13 de abril de 2023

Prof^a. Dr^a. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro
Orientadora
Faculdade de Engenharia Civil – UFPA

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Faculdade de Engenharia Civil – UFPA

Prof. Dr. Mateus Antônio Nogueira Oliveira
Faculdade de Engenharia Civil – UFMG

Belém, 13 de abril de 2023.

RESUMO

O objetivo principal desta dissertação é avaliar o efeito da substituição parcial do cimento por sílica ativa no comportamento físico-mecânico de argamassas de revestimento com agregado reciclado de concreto (RCC) e analisar seus impactos ambientais, considerando as emissões de CO₂ e o consumo de energia gerados na produção das matérias-primas das argamassas. Buscou-se avaliar a influência dos agregados reciclados nos traços de proporção 1:3 e 1:4 (em massa) substituindo parcialmente o agregado natural por 0%, 30% e 50% de RCC e, cada um desses grupos foi subdividido com substituições parciais do cimento por sílica ativa nos teores de 0%, 5%, 10% e 15%. Os resultados permitem concluir que a o aumento do teor de agregado reciclado nas argamassas impactam na sua reologia e reduz suas propriedades mecânicas frente à de referência, sendo amenizados com a incorporação da sílica ativa. Sobre os impactos ambientais, o cimento foi o maior causador de impactos. As amostras R0S15 apresentam o maior consumo de cimento tanto no traço 1:3 quanto 1:4 e, portanto, gera maiores impactos. Entretanto, os impactos gerados por unidade de resistência mostram uma situação inversa. Logo, apesar de gerarem maiores emissões de CO₂ e consumo de energia, sua contribuição na resistência reflete em maior sustentabilidade.

Palavras-chave

Agregados reciclados, sílica ativa, argamassas, ACV.

ABSTRACT

The main objective of this dissertation is to evaluate the effect of partial replacement of cement by silica fume on the physical-mechanical behavior of coating mortars with recycled concrete aggregate (RCC) and to analyze its environmental impacts, considering CO₂ emissions and energy consumption generated in the production of mortar raw materials. We tried to evaluate the influence of recycled aggregates in proportions of 1:3 and 1:4 (in mass) by partially replacing the natural aggregate with 0%, 30% and 50% RCC, and each of these groups was subdivided with substitutions partial cement by silica fume in the contents of 0%, 5%, 10% and 15%. The results allow concluding that the increase in the recycled aggregate content in the mortars impacts on its rheology and reduces its mechanical properties compared to the reference one, being softened with the incorporation of silica fume. Regarding environmental impacts, cement was the main cause of impacts. Samples R0S15 present the highest cement consumption in both the 1:3 and 1:4 mixes and, therefore, generate greater impacts. However, the impacts generated per unit of resistance show an inverse situation. Therefore, despite generating higher CO₂ emissions and energy consumption, their contribution to resistance reflects greater sustainability.

Keywords

Recycled aggregates, silica fume, mortars, ACV.

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	12
1.2. JUSTIFICATIVA.....	13
1.3. OBJETIVOS.....	14
1.3.1. Objetivo geral.....	14
1.3.2. Objetivos específicos	15
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1. AGREGADOS RECICLADOS	17
2.1.1. Composição granulométrica	19
2.1.2. Porosidade e absorção de água.....	20
2.1.3. Massa unitária e massa específica.....	21
2.2. ARGAMASSAS COM AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO	21
2.3. SÍLICA ATIVA.....	24
2.3.1. Argamassas com sílica ativa no estado fresco	25
2.3.2. Argamassas com sílica ativa no estado endurecido	25
2.4. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)	26
2.4.1. Ferramentas computacionais.....	31
2.4.2. Histórico de Avaliação do Ciclo de Vida de compósitos cimentícios	32
3. METODOLOGIA.....	34
3.1. SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	34
3.1.1. Cimento	34
3.1.2. Sílica ativa.....	35
3.1.3. Agregados miúdos.....	37
3.1.4. Água	41
3.2. PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS.....	41
3.3. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA SÍLICA ATIVA NO COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO COM AGREGADOS RECICLADOS	44
3.3.1 Descrição dos produtos avaliados.....	44

3.4. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA SÍLICA ATIVA NOS ASPECTOS AMBIENTAIS DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTOS COM AGREGADOS RECICLADOS	46
3.4.1. Definição do objetivo e escopo	46
3.4.2. Definição da unidade funcional	47
3.4.3. Inventário do ciclo de vida.....	47
3.4.4. Metodologia de avaliação de impacto do ciclo de vida	47
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	49
4.1. CARACTERÍSTICAS DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO.....	49
4.2. CARACTERÍSTICAS DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO	53
4.2.1. Módulo de elasticidade	54
4.2.2. Absorção de água por capilaridade	57
4.2.3. Resistência à tração na flexão	59
4.3. EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO ₂) E CONSUMO DE ENERGIA	62
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
5.1. CONCLUSÕES	67
5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	68
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	69
7. APÊNDICES	76
7.1. APÊNDICE A - TRAÇOS UNITÁRIOS DAS ARGAMASSAS FORMULADAS.	76
7.2. APÊNDICE B – CONSUMO DE MATERIAIS POR METRO CÚBICO DAS ARGAMASSAS FORMULADAS.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características físicas e mecânicas do cimento CP II E – 32 (fornecido pelo fabricante).....	35
Tabela 2 - Composição química da sílica ativa. Fonte: Dow Corning, 2010.....	35
Tabela 3 - Características físicas e mecânicas da sílica ativa.....	36
Tabela 4 - Caracterização física dos materiais.	39
Tabela 5 - Taxa de absorção média dos agregados reciclados.	41
Tabela 6 - Variáveis controle da pesquisa.	44
Tabela 7 - Variáveis resposta da pesquisa.	45
Tabela 8 - Representações dos grupos de argamassas produzidas.	45
Tabela 9 - Relação de ensaios e parâmetros dos copos-de-prova.....	46
Tabela 10 - Categorias de impacto ambiental do método CML-IA.	48
Tabela 11 - Emissão de CO ₂ eq. e consumo de energia dos materiais.	48
Tabela 12 - Propriedades das argamassas de revestimento no estado fresco.	49
Tabela 13 – Classificação das argamassas no estado fresco.	53
Tabela 14 - Propriedades das argamassas de revestimento no estado endurecido.	54
Tabela 15 – Classificação das argamassas no estado endurecido.	61
Tabela 16 – Resultados médios das emissões de CO ₂ (kgCO ₂ /m ³) das argamassas.	62
Tabela 17 - Resultados médios dos consumos de energia (MJ/m ³) das argamassas.	62
Tabela 18 – Relação entre impactos ambientais e resistência à compressão das argamassas.	65
Tabela 19 - Traço unitário e espalhamento das argamassas. Traço 1:3 (em massa).	76
Tabela 20 - Traço unitário e espalhamento das argamassas. Traço 1:4 (em massa).	76
Tabela 21 – Consumo de materiais para produção de 1m ³ de argamassa. Traço 1:3.....	77
Tabela 22 - Consumo de materiais para produção de 1m ³ de argamassa. Traço 1:4.	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Zonas de transição em agregados reciclados de concreto. Fonte: Autor, 2023..	19
Figura 2 - Produção do silício metálico e coleta da sílica ativa (Dal Molin, 1995).	24
Figura 3 - Estrutura da avaliação do ciclo de vida. Fonte: (ABNT, 2009).....	28
Figura 4 - Curva granulométrica da sílica ativa. Fonte: Autor, 2023.....	36
Figura 5 - Curvas granulométricas do AMN e RCC. Fonte: Autor, 2023.....	38
Figura 6 - Curva de absorção de água do agregado reciclado. Fonte: Autor, 2023.	40
Figura 7 - Representação esquemática dos traços (1:3 e 1:4). Fonte: Autor, 2023.....	43
Figura 8 - Resultados médios de índice de consistência das argamassas 1:3.....	50
Figura 9 - Resultados médios de índice de consistência das argamassas 1:4.....	50
Figura 10 - Resultados médios das argamassas 1:3. A) Densidade de massa. B) Variação da densidade de massa.....	51
Figura 11 - Resultados médios das argamassas 1:4. A) Densidade de massa. B) Variação da densidade de massa.....	51
Figura 12 – Resultados médios de retenção de água das argamassas. A) Traço 1:3. B) Traço 1:4.....	52
Figura 13 - Resultados médios do módulo de elasticidade das argamassas. Traço 1:3.	54
Figura 14 - Resultados médios do módulo de elasticidade das argamassas. Traço 1:4.	55
Figura 15 - Resultados médios de densidade de massa frente ao fator a/c. Traço 1:3 (em massa).	56
Figura 16 - Resultados médios de densidade de massa frente ao fator a/c. Traço 1:4 (em massa).	56
Figura 17 - Resultados médios do coeficiente de absorção de água por capilaridade frente ao fator a/c. Traço 1:3.....	58
Figura 18 - Resultados médios do coeficiente de absorção de água por capilaridade frente ao fator a/c. Traço 1:4.....	58
Figura 19 - Resultados médios da resistência à tração na flexão das argamassas frente ao consumo de cimento. Traço 1:3.....	60
Figura 20 - Resultados médios da resistência à tração na flexão das argamassas frente ao consumo de cimento. Traço 1:4.....	60
Figura 21 – Resultados médios das emissões de CO ₂ das argamassas.....	63
Figura 22 - Resultados médios do consumo de energia para produção das argamassas.	63
Figura 23 – Variação das emissões de CO ₂ das argamassas. A) Traço 1:3. B) Traço 1:4. .	64

Figura 24 - Variação do consumo de energia das argamassas. A) Traço 1:3. B) Traço 1:4.

..... 64

Lista de Abreviaturas e Siglas

Neste item são apresentados alguns dos símbolos utilizados nesta qualificação. Aqueles que não estão aqui apresentados têm seu significado explicado assim que mencionados no texto.

Símbolo	Significado
<i>A/C</i>	Relação água/cimento
<i>ABNT</i>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>CaO</i>	Óxido de Cálcio
<i>CO₂</i>	Gás Carbônico
<i>CPII</i>	Cimento Portland Composto
<i>C-S-H</i>	Silicato de Cálcio Hidratado
<i>MPa</i>	Mega Pascal
<i>NBR</i>	Norma Brasileira Regulamentada
<i>SiO₂</i>	Dióxido de Silício – Sílica
<i>ABRAINC</i>	Associação Brasileira de Incorporadoras Imobiliárias
<i>SA</i>	Sílica Ativa
<i>RCC</i>	Resíduo de Concreto
<i>AMRC</i>	Agregado Miúdo Reciclado de Concreto
<i>N</i>	Newton
<i>UFPA</i>	Universidade Federal do Pará
<i>ABRELPE</i>	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

O Produto Interno Bruto (PIB) da construção cresceu 9,7% em 2021, após registrar uma queda de 6,3% em 2020. O dado é da Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC, 2021). A indústria da construção civil (ICC) caracteriza-se pela sua capacidade de geração de resíduos em quase todos os seus processos. Tal característica faz dessa indústria um dos setores da economia que mais precisa de aperfeiçoamento e gerenciamento, uma vez que é um potencial polo gerador.

Se tratando de construções sustentáveis, estas são projetadas buscando conferir maior eficácia quando do uso de recursos, preservação de espaços naturais, como também prevenir o meio de poluição. Isto se torna possível através da redução da geração de resíduos por intermédio de tecnologias desenvolvidas, no uso preferencial para os materiais recicláveis, reutilizáveis ou subprodutos, até a disposição final dos inertes sem serventia, (MEDEIROS et al., 2012).

A adoção de novas metodologias que façam o reaproveitamento de resíduos possibilita que as gerações futuras venham a ter benefícios através do uso destes materiais e ainda poder usufruir daqueles dispostos na natureza. Esse conceito de desenvolvimento vem sendo difundido por meio de pesquisas científicas e convenções tratando sobre os cuidados na preservação do meio ambiente, sendo chamado de desenvolvimento sustentável.

Diante dos mais diferentes tipos de resíduos produzidos, sejam eles no setor da construção civil ou metalúrgico, por exemplo, as pesquisas na área de engenharia buscam incorporar resíduos de construção (RCC) e pozolanas como constituintes de compósitos cimentícios. A ABRELPE, em relatório publicado em 2021, destaca que os resíduos de construção e demolição (RCC) geralmente são compostos por restos de madeira, argamassa, concreto, tijolos, cerâmicas, aço, etc.

O RCC é capaz de proporcionar valores aceitáveis para as propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos convencionais, enquanto as pozolanas conferem ao compósito maior compacidade da estrutura de poros, proporcionando maiores resistências à compressão e proteção contra a entrada de agentes agressivos, por meio da formação de novos produtos de hidratação (LEITE, 2001; CABRAL, 2007; CALCADO, 2015).

Neste cenário, a avaliação do ciclo de vida (ACV) surge como uma ferramenta de gestão ambiental na qual analisa alternativas com potencial ecológico desses materiais alternativos. Desta maneira, quantificar os impactos oriundos de um produto ao longo do seu ciclo de vida, permite uma ampla visão a respeito da viabilidade ambiental das possíveis alternativas propostas de uso ou produção do mesmo.

1.2. Justificativa

De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2021), no Brasil, 82,5 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU) foram gerados em 2020. Desse total, 76,1 milhões foram coletados, porém apenas 60% receberam a destinação adequada em aterros sanitários. Fazem parte dos RSU os resíduos de construção e demolição (RCC), geralmente compostos por restos de madeira, argamassa, concreto, tijolos, cerâmicas, aço, etc.

Ainda, no mesmo ano foram coletados pelos municípios 47 milhões de toneladas de RCC, ou seja, 128.760 toneladas/dia destes materiais, representando uma produção de 0,606 kg/habitante/dia. A grande produção desses resíduos, além de representar um prejuízo para seus produtores, também geram custos para o poder público com a coleta, transporte e destinação final desses materiais que muitas vezes são descartados em aterros e pontos de bota-fora inadequados. Essa prática afeta o meio ambiente provocando enchentes, obstruindo vias de tráfego, proliferando doenças, dentre outros danos à saúde.

Neste cenário, foi instituída no Brasil a resolução nº 307/2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, estabelecendo diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Anos mais tarde, foi criada a Lei nº 12.305/2010, da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que versa sobre a gestão dos resíduos na ICC, prevendo obrigações tanto para o gerador quanto para os municípios, assim como a resolução CONAMA nº 307.

Noutro aspecto, o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), em relatório apresentado em 2020, traz um panorama do consumo aparente de cimento Portland no Brasil. Foram consumidos em 2020, um total de 61 milhões de toneladas do produto, representando um consumo per capita de 286 kg/hab. Diante disso, infere-se que com o aumento no consumo de cimento, impulsionado pelo setor da construção civil, a produção deve ser aumentada e a consequência desta cadeia é a maior emissão de gás carbônico na atmosfera.

Neste cenário, os potenciais impactos provocados na produção de argamassas podem ser minimizados através do uso de materiais alternativos que venham a substituir os insumos normalmente empregados. Materiais que possuam propriedades cimentícias ou pozolânicas oriundos de outras cadeias produtivas, como a sílica ativa, metacaulim, escória de alto forno, etc., em geral, são alternativas em substituição ao cimento, responsável pelo maior impacto ambiental dentre os demais constituintes da argamassa.

Diversos estudos apontam para a possibilidade do uso de pozolanas e RCC na produção de compósitos cimentícios, uma vez que essas adições melhoram a interface do agregado reciclado e a pasta, se tornando uma matéria-prima alternativa (BARRA, 2011; CALCADO, 2015; CARASEK et al., 2018). A escassez de agregados naturais na construção civil é uma realidade enfrentada em diferentes regiões do Brasil, onde, em determinadas localidades o agregado graúdo natural disponível é apenas obtido pela Trituração de maciços rochosos. Entretanto, se de um lado os agregados naturais são escassos, de outro a disponibilidade de RCC gerados nessas localidades é expressiva, podendo ser uma alternativa para uma possível incorporação destes resíduos em concretos e argamassas.

Sendo assim, a elevada produção de resíduos pelos mais diferentes setores da economia surge como oportunidade para novas pesquisas no âmbito dos compósitos com materiais reaproveitados. Isso se explica pelas propriedades físicas e mecânicas similares àqueles que substituirão, custo benefício e, principalmente, pelo menor impacto ambiental gerado (CALCADO, 2015).

Dessa forma, este trabalho objetiva contribuir para o entendimento da influência da substituição parcial do cimento por sílica ativa em argamassas como também o impacto da permuta entre agregados naturais pelos reciclados de concreto. Esta análise se dará por meio da avaliação do ciclo de vida das argamassas produzidas com estes resíduos, assim será possível conseguir informações importantes para o entendimento do uso conjunto de RCC e sílica ativa e assim avaliar a viabilidade ambiental de um novo material para a construção civil.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa foi avaliar o efeito da substituição parcial do cimento por sílica ativa no comportamento físico-mecânico e ambiental de argamassas de revestimentos com agregados reciclados de concreto.

1.3.2. Objetivos específicos

- Analisar o efeito das características físicas dos agregados reciclados no comportamento das argamassas de revestimento.
- Analisar o efeito do proporcionamento dos materiais e do teor de RCC no comportamento físico-mecânico das argamassas de revestimento.
- Avaliar o efeito do teor de sílica ativa no comportamento físico mecânico das argamassas de revestimento.
- Avaliar o impacto ambiental das argamassas produzidas com material alternativo.

1.4. Estrutura da dissertação

A apresentação deste trabalho se dará em cinco capítulos, conforme descrito na sequência.

Uma breve introdução ao assunto, com abordagem de questões referentes à justificativa e importância da pesquisa, bem como seus objetivos, estão apresentados no Capítulo 1.

O segundo capítulo traz o estado-da-arte acerca dos resíduos de concretos, abordando as características físicas e os equipamentos de beneficiamento disponíveis para este tipo de resíduo. Adiante, será tratado sobre argamassas contendo agregado reciclado de concreto e sílica ativa, destacando os resultados encontrados na literatura e, por fim, também será tratado da metodologia de avaliação dos impactos ambientais, como pode ser quantificada, quais os passos fazem parte desta análise, trazendo ainda os achados da bibliografia acerca das argamassas com areia reciclada e/ou com sílica ativa.

O terceiro capítulo descreve a programação experimental da pesquisa (materiais e métodos). Neste capítulo apresenta-se os métodos e resultados da caracterização dos materiais utilizados e sua discussão quando necessário, e o método de dosagem escolhido. Ainda, este capítulo apresentará o processo de moldagem e cura adotada para os corpos de

prova e descreverá os ensaios mecânicos a que estes foram submetidos. Por fim, irá apresentar os valores das emissões de CO₂ e consumo de energia de produção das matérias-primas que compõem as argamassas, obtidos nas referências bibliográficas estudadas.

O quarto capítulo apresentará os resultados obtidos dos ensaios físicos, mecânicos e da quantificação das emissões de CO₂ e consumo de energia, apresentando suas respectivas análises e discussões. A disposição dos resultados seguirá a ordem apresentada no capítulo anterior.

No quinto capítulo são feitas as conclusões finais sobre o trabalho e apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Grande parte das atividades desenvolvidas pelo ser humano interferindo no meio ambiente não são realizadas de modo a não resultarem na produção de resíduos, ou seja, sempre haverá desperdícios, e como a quantidade de processos de produção destes materiais descartados é numerosa, a magnitude do volume produzido destes resíduos é imponente, representando ao final de tudo em materiais agressivos ao meio ambiente descartados de maneira inadequada.

A indústria da construção civil requer uma considerável quantidade de materiais inertes, tais como agregados graúdos e miúdos, que comumente são obtidos por meio da exploração e extração de sedimentos aluviais. A retirada desses materiais além de modificar o perfil dos rios é responsável por promover o seu desequilíbrio, ocasionando problemas ambientais, como por exemplo mudanças na hidrologia desses corpos d'água.

Buscando atenuar o impacto que a construção civil causa no meio ambiente através do consumo de agregados naturais, pesquisas recentes no meio acadêmico vêm buscando incorporar diversos tipos de resíduos na cadeia produtiva da ICC. Um exemplo disso são os entulhos de concreto, que vem sendo reutilizado, em estradas como material de aterro para bases e sub-base do pavimento asfáltico, como agregado para elementos que não exijam elevada resistência estrutural como meio-fio e calçadas, dentre outras aplicações. Esse tipo de material quando submetido a britagem e posterior separação em partículas de diversos tamanhos pode ser usado também como agregado para produção de concreto asfáltico, desde que não apresente risco ao meio ambiente em decorrência de possíveis contaminantes que venham estar impregnados nos mesmos.

2.1. Agregados reciclados

No Brasil, estima-se que de 20% a 50% do total de recursos minerais explorados sejam destinados à construção civil, (CARASEK et al., 2018). Sendo assim, a exploração desordenada das jazidas minerais provoca prejuízos ao meio ambiente, podendo atingir o esgotamento destes recursos não renováveis. Por definição, agregados são materiais granulares que apresentam dimensões e formas variadas, geralmente inertes e que são usados para compor concretos e argamassas. A incorporação desses materiais em compósitos

objetiva dar suporte à resistência contra esforços mecânicos, menor retração dos compósitos e principalmente reduzir o custo final do produto, (STARLING et al, 2006).

Para determinado agregado ser aplicado em concretos ou argamassas é necessário o conhecimento das características relevantes desses. São elas: composição granulométrica, porosidade total, capacidade de absorver água; forma dos grãos e sua textura, força compressiva resistente, módulo elástico e se há substâncias agressivas ao compósito aderidas em sua estrutura, (MEHTA & MONTEIRO, 2014).

Os agregados podem ser classificados quanto sua origem, dimensões das partículas, massa unitária e composição mineralógica. Quanto a origem, existem os agregados naturais, já encontrados na natureza, os artificiais, obtidos através da britagem de rochas e os oriundos de processos industriais e reciclagem. Quanto à dimensão, existem os agregados miúdos, com grãos passantes através da peneira 4,8 mm e retidos na malha 0,150 mm, e os graúdos, cujos grãos passam pela peneira 152 mm e ficam retidos na malha 4,8 mm, todas seguindo o padrão da NBR 7211 (ABNT, 2009). Quanto a massa específica, são leves aqueles abaixo de 1.000 kg/m³, médios com valores entre 1.000 e 2.000 kg/m³ e pesados, acima de 2.000 kg/m³.

Por definição, o agregado reciclado consiste num material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção ou demolição de obras civis, que apresenta características técnicas para a aplicação em obras de edificação e infraestrutura. A maneira que se processa estes resíduos não difere tanto daqueles adotados para agregados naturais, entretanto, a escolha por determinado tipo de processamento dos resíduos afetará diretamente a granulometria, forma e resistência do produto final em razão do surgimento de microfissuras em sua estrutura, (CABRAL, 2007; CARASEK et al., 2018).

Corrêa (2019) destaca os principais tipos de britadores usados no processamento do RCC: britador de impacto, de mandíbula, moinhos de martelo e cones de britagem. Importante destacar que os britadores de impacto são indicados para a britagem de concretos de baixa resistência, enquanto para concretos de altas resistência o britador de impacto é a melhor opção dentre os citados. Segundo Mehta & Monteiro (2014), os agregados naturais diferem dos reciclados em razão da presença de pasta e argamassa fixada nesses, característica essa que faz com que os agregados reciclados absorvam parte da água da mistura cimentícia.

Portanto, quando se utiliza agregado reciclado de concreto na produção de concretos e argamassas são formadas entre o agregado natural e a argamassa interfaces distintas, chamadas de zona de transição (Figura 1). A primeira zona de transição ocorre entre o agregado natural e a argamassa pretérita e, a outra zona é formada com a nova argamassa aderida à argamassa pretérita, havendo assim duas zonas de transição. A zona de transição é a fronteira entre o agregado e a argamassa e consiste na região mais frágil do compósito, ditando o comportamento de suas principais propriedades mecânicas. (METHA & MONTEIRO, 2014).

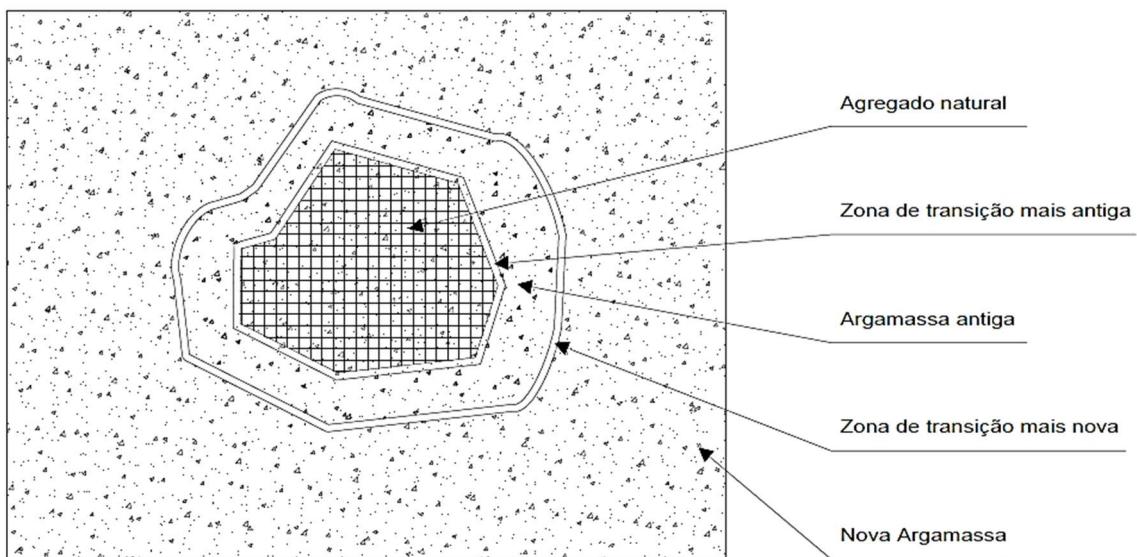


Figura 1 - Zonas de transição em agregados reciclados de concreto. Fonte: Autor, 2023.

De um modo geral, os agregados naturais apresentam maiores densidade e resistência quando comparados aos reciclados, estes, inclusive, apresentam uma porosidade mais acentuada. As propriedades físicas e mecânicas destes materiais reciclados são influenciadas por diversos fatores, dentre eles a resistência do concreto que originou o resíduo como também o tipo de equipamento empregado para beneficiar o mesmo. A diante, serão comentados os pontos principais para ter uma dimensão mais próxima das diferenças existentes entre os agregados naturais e reciclados de concreto.

2.1.1. Composição granulométrica

A composição granulométrica dos agregados consiste na distribuição relativa das massas dos distintos tamanhos das partículas granulares entre várias faixas granulométricas que compõem o agregado, expressa em porcentagem acumulada. A representação gráfica

dos percentuais retidos acumulados em cada peneira em função da abertura das malhas é feita através da curva granulométrica.

Para a produção de argamassas e concretos é preferível que a distribuição granulométrica dos agregados esteja uniformemente distribuída para todos os tamanhos. Desta forma, é possível uma interação entre as partículas que seja capaz de promover maior empacotamentos dos grãos e que, por consequência, a resistência mecânica do compósito é maximizada (MORALES et al., 2011).

A distribuição granulométrica dos agregados reciclados de concreto possui uma tendência de possuir partículas mais grossas quando comparadas aos naturais, e consequentemente maior módulo de finura. Quanto maior for o tamanho das partículas, a área específica dos grãos também é menor e também a necessidade de pasta para envolver os grãos, influenciando diretamente na trabalhabilidade das argamassas e concretos (STARLING et al., 2006; MELO, 2012).

Ainda, de acordo com os autores, a origem do resíduo, o processo de beneficiamento, a regulagem do equipamento empregado no beneficiamento e o fator água/cimento do compósito de origem, exercem importante influência sobre a granulometria da amostra de agregado reciclado.

No estudo de Morales et al., (2011), as curvas granulométricas dos agregados reciclados se mostraram adequadas para utilização na produção de concretos e argamassas. Nos estudos de Krüger (2013) e Barra (2011) a composição granulométrica do material miúdo reciclado, em comparação com o agregado natural, se mostrou mais contínua, sendo avaliada como adequada para incorporação em argamassas.

2.1.2. Porosidade e absorção de água

Na produção de compósitos cimentícios convencionais, os agregados naturais possuem pouca ou nenhuma porosidade, assim, sua taxa de absorção d'água não exerce nenhuma influência nas misturas. Entretanto, sabendo que o agregado reciclado de concreto (ARC) consiste no agregado de origem natural com a presença de argamassa aderida em sua superfície, a absorção de água do resíduo acaba sendo influenciada. O diâmetro médio dos poros capilares dos ARC, quando comparados aos naturais, demonstrou ser 40% maior (CABRAL, 2007; BARRA, 2011).

A absorção de água por parte dos agregados reciclados está diretamente relacionada ao diâmetro dos poros dos materiais e suas interconexões. Comumente estes materiais possuem a capacidade de absorverem maior quantidade de água, porém, esta particularidade geralmente é prejudicial aos concretos e argamassas por afetar negativamente a resistência, deformação, durabilidade e promover maior retração, (CALCADO, 2015).

Para Barra (2011), agregados reciclados oriundos de concretos de baixa resistência, geralmente desenvolvem maior absorção que aqueles provenientes de concretos de alta resistência. A maior resistência do concreto está atrelada ao desenvolvimento de mais produtos de hidratação, ocorrendo então uma melhora das propriedades da matriz cimentícia.

2.1.3. Massa unitária e massa específica

Os agregados naturais, em função do seu processo de formação natural, apresentam valores de massa unitária (MU) e específica (ME) superiores às do agregado reciclado de concreto, que por sua vez é composto de argamassa aderida ao agregado natural. O menor valor para a massa específica do AMRC está atrelado à origem dos materiais que constituíram este compósito, o fator água/cimento utilizado e a resistência característica destes materiais cimentícios. Agora, no que diz respeito à massa unitária, a granulometria e a forma das partículas do resíduo exercem forte dependência para a diminuição no valor desta propriedade.

Em estudo realizado por Carasek et al., (2018), com agregado miúdo reciclado cimentício, estes apresentaram para massa específica (ME) das partículas valores 6% menores que os naturais para uma mesma distribuição granulométrica. Valores próximos aos encontrados pela autora anteriormente citada vão de encontro àqueles obtidos por Calcado (2015), quando obteve para esta propriedade $2,67 \text{ g/cm}^3$ e $2,45 \text{ g/cm}^3$ para o agregado natural e reciclado respectivamente, o que representa uma massa específica 8% menor para o material reciclado. Já Pedrozo (2008) apresentou massa específica de $2,51 \text{ g/cm}^3$ para o AMRC e $2,61 \text{ g/cm}^3$ para o agregado miúdo natural.

2.2. Argamassas com agregado reciclado de concreto

Quando o agregado natural é substituído pelo agregado reciclado de concreto, o desempenho das argamassas é modificado. Diante disso, é imprescindível compreender o

comportamento desses compósitos no que diz respeito a algumas propriedades, tanto mecânicas quanto à sua durabilidade.

Como abordado anteriormente, os agregados miúdos reciclados de concreto geralmente possuem massa específica inferior às dos agregados naturais. Em razão disto, argamassas que tem em sua composição estes resíduos apresentam uma tendência a desenvolverem massa específicas inferiores do que àquelas produzidas com agregado de origem natural, tanto no estado fresco quanto endurecido.

Machado et al. (2019) observou a diminuição da massa específica das argamassas com agregado reciclado de concreto com teores de AMRC de 0%, 30% e 50%. Ao incorporar 30% de resíduo nas misturas houve um decréscimo desta propriedade de 4,75% quando comparado com a argamassa sem resíduo, valor próximo foi alcançado quando se substituiu 50% do resíduo, alcançando massa específica 5% inferior à de referência.

Carasek (2018) estudando diferentes tipos de resíduos e traço de 1:5,8 (cimento e agregado, em massa) obteve para a massa específica de argamassas recicladas valores inferiores em comparação com a de referência. Para a argamassa sem resíduo, esta propriedade foi de 2010 kg/m³ e, quando adicionado 100% de AMRC a massa específica foi de 1790 kg/m³, representando uma redução de aproximadamente 11%. Coerente com os resultados já citados, Alves, L.A., (2012) e Calcado & Ferreira (2013) chegaram a resultados entre 2% e 4% inferiores para tal propriedade para argamassas com 100% de agregado reciclado de concreto.

A fim de garantir a trabalhabilidade adequada das misturas, ajustes na dosagem são necessários, como o uso de aditivos químicos ou até mesmo a pré-molhagem do agregado reciclado Pacheco-Torgal et al. (2013). Ainda, segundo o autor, agregados reciclados que possuam uma absorção de água limite de 9%, podem ser utilizados sem a fase de pré-molhagem, bastando apenas a adoção de aditivo superplastificantes para garantir a trabalhabilidade. Seguindo mesmo raciocínio, Cabral et al. (2008) e Pimentel et al. (2018), fizeram a compensação da água a ser absorvida pelo resíduo. Segundo os autores, alguns traços de argamassas necessitaram de aditivo superplastificantes para garantir a trabalhabilidade adequada para uso.

Quanto ao percentual de agregado miúdo reciclado incorporado à mistura de concretos e argamassas, estudos desenvolvidos por (CORRÊA, 2019; PIMENTEL et al., 2018; LEDESMA et al., 2014) evidenciam que quanto mais se aumenta o teor de resíduo a

trabalhabilidade acaba sendo influenciada negativamente. Machado et al., (2019) observou que para garantir a mesma trabalhabilidade da argamassa de referência, os compósitos com 30% e 50% de AMRC sofreram acréscimos no fator água/cimento de aproximadamente 13% para o traço 1:3 (proporção de cimento e areia, em massa). Já para o traço de 1:4 (proporção de cimento e areia, em massa), o adicional de água à mistura foi de 6% e 15%, respectivamente. A forma angular associada a rugosidade dos agregados reciclado como também à elevada porosidade destes, fazem a mistura necessitar de mais água de amassamento.

Argamassas contendo agregados mais grossos, de maior dimensão máxima característica (DMC), apresentam maiores resistências à tração e à compressão axial. Isto ocorre em função da menor demanda por água da mistura (menor relação água/ materiais secos) e consequente menor área específica das partículas, significando uma menor porosidade da pasta, Carasek (2018).

Calcado (2015) avaliando argamassas em 3 traços, rico, mediano e pobre, associados a substituição parcial de AMRC de 15%, 25% e 50% notou uma perda expressiva da ordem de 85% na resistência entre as argamassas de referência. Para todas as misturas de argamassas do traço rico, a resistência à compressão foi prejudicada, enquanto para o traço mediano somente o teor de 50% de AMRC provocou redução desta propriedade. Para o traço pobre, o teor de 25% de substituição resultou em aumento na capacidade resistente à compressão.

O tipo de beneficiamento do agregado reciclado exerce influência nas propriedades mecânicas dos compósitos que levam esses resíduos em sua composição. Neste sentido, Evangelista et al. (2015), substituindo agregado miúdo reciclado de concreto em argamassas, destaca que até 30% de substituição não causa decréscimos significativos na capacidade resistente à compressão, porém, faz a ressalva de que os resultados obtidos em laboratórios serão diferentes daqueles obtidos em obra em função do controle feito sobre a granulometria e britagem do resíduo.

Quanto à porosidade das argamassas com resíduo reciclado, Martínez et al. (2013) e Pacheco-Torgal et al. (2013) verificaram que a forma irregular e maior superfície específica das partículas fazem destes compósitos mais porosos. Ainda, estudando a substituição total do agregado miúdo natural pelo reciclado e com idade de 28 dias, os autores encontraram para estas argamassas um total de poros 24%, superior àquela de referência. Sendo assim,

estes poros quando interconectados são capazes de propiciar maior capacidade de absorver água.

2.3. Sílica ativa

O emprego de resíduos em cimentos, concretos e argamassas, além de diminuir custos, tem a capacidade de maximizar algumas propriedades do produto final. Nesta temática estão as pozolanas, como a sílica ativa, por exemplo. A seguir serão tratados alguns aspectos acerca desta adição mineral como sua produção e efeitos em compósitos cimentícios.

A sílica ativa (SA) é o subproduto oriundo da produção de silício metálico e ligas de ferro-silício por meio da redução combinada de quartzo altamente puro com carvão. Esse processo ocorre em fornos elétricos do tipo arco-voltaico sob temperaturas da ordem de 2.000°C, produzindo um gás (SiO) que, se oxida e condensa formando partículas de sílica amorfa, geralmente com mais de 80% de dióxido de silício (SiO₂), que são captadas em filtros de manga e posteriormente armazenadas, Figura 2.

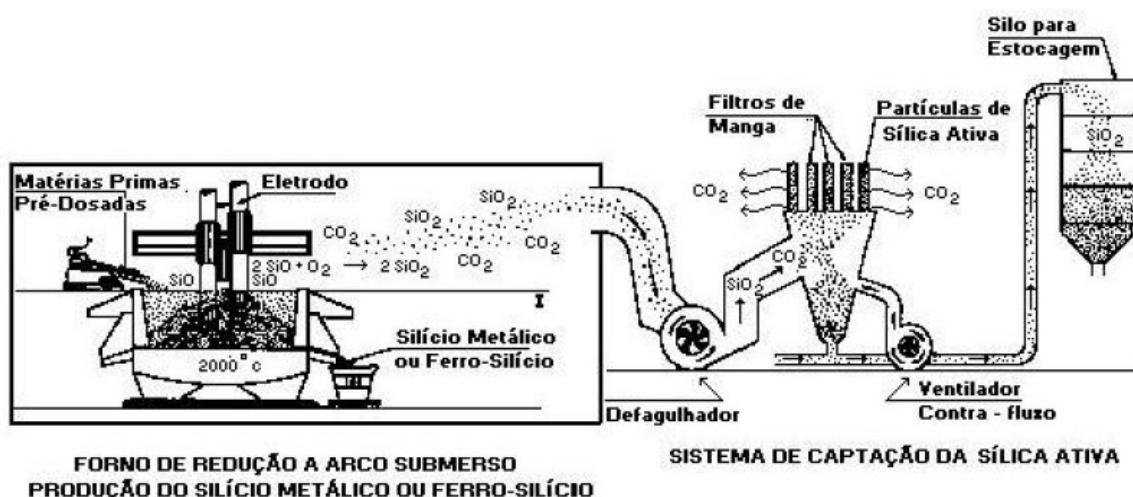


Figura 2 - Produção do silício metálico e coleta da sílica ativa (Dal Molin, 1995).

O tamanho médio das partículas de sílica ativa é da ordem de 0,3 µm, enquanto a superfície específica varia de 13.000 a 30.000 m²/kg. O uso da SA em compósitos cimentícios são vistos em função de suas propriedades físicas e químicas (VASKE et al., 2010; MORAES, 2012). Em razão da forma esférica das partículas de sílica ativa como também do tamanho das mesmas, cerca de 100 vezes menor que a do cimento, favorece o efeito físico da AS, atuando como microfíller. Os grãos de sílica se alojam nos vazios

deixados pelos produtos de hidratação do cimento, desta forma reduzindo o espaço disponível para a água e promovendo maior densificação da matriz em idades precoces.

Quanto ao efeito químico, a forma amorfa da sílica ativa apresenta uma atividade pozolânica elevada. Ao ser hidratado, o cimento Portland produz compostos de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Em presença de sílica ativa o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reage, e origina silicato de cálcio hidratado semelhante àquele formado na reação de hidratação do cimento, que é o maior responsável pela resistência da pasta.

2.3.1. Argamassas com sílica ativa no estado fresco

Devido ao pequeno tamanho das partículas de sílica ativa há maior demanda de água em concretos e argamassas com seu uso. A trabalhabilidade da mistura desses compósitos contendo SA é consideravelmente melhorada pelo uso de aditivo químico capaz de promover maior dispersão entre as partículas de cimento e as da pozolana, Siddique; Chahal (2011). Conclusão semelhante obtiveram Machado et al. (2019), quando a presença da SA levou a uma redução no espalhamento, necessitando de mais água para atingir o espalhamento de 260 ± 5 mm.

Quanto ao tempo de pega, Qing et al. (2007) avaliando pastas de argamassa contendo nano sílica ou sílica ativa, concluiu que a sílica ativa retardou o início de pega da pasta, porém o intervalor entre o início e o fim da pega diminui conforme se aumenta o teor da pozolana. No mesmo raciocínio, Siddique & Chahal (2011) concluiu que o calor total de hidratação nos dez primeiros dias depende do teor de sílica ativa. Com o aumento do teor da pozolana, a quantidade de cimento diminui e consequentemente tende a diminuir o calor total liberado.

2.3.2. Argamassas com sílica ativa no estado endurecido

Qing et al., (2007) destaca que na combinação de cimento com sílica ativa em argamassas e concretos, a reação da pozolana acontece em idades mais tardias que a do cimento. Primeiramente, o cimento é hidratado e ocorre a formação do hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e, após alguns dias a SA, composta de dióxido de silício (SiO_2) em sua forma amorfa, reage com o hidróxido formando silicato de cálcio hidratado (C-S-H) de origem pozolânica. Esta última reação ocorre vagarosamente porque dissolver SiO_2 é um processo demorado e a oferta de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ nas idades iniciais é baixa (PIGNATELLI et al., 2016b).

Pimentel et al. (2017) estudaram para diferentes idades a substituição do cimento por sílica em argamassas com traço 1:3 (proporção de cimento e areia, em massa), relação água/cimento de 0,6 e teores de SA de 5%, 10% e 15%. Eles verificaram que a resistência à compressão aos 28 dias para todas as argamassas contendo sílica foram inferiores à de referência. Já em idade mais avançada, 91 dias, as respostas para a resistência compressiva foram contrabalanceadas.

Qing et al. (2007) estudaram a influência da sílica nas propriedades da pasta de cimento endurecida e verificaram que o aumento do teor de SA, nas idades de 1 e 3 dias as resistências eram cerca de 3% inferiores que as da argamassa controle. Já para as idades de 28 e 60 dias, essa propriedade foi maior para as argamassas com sílica, 16% e 10% respectivamente. Esse comportamento ocorre devido a atividade pozolânica da SA acontecer de forma mais devagar em idades precoces (QING et al., 2006; QING et al. 2007). Alguns estudos destacam o melhoramento das propriedades mecânicas em argamassas contendo sílica em idades iniciais, porém, esse fenômeno é atribuído ao efeito físico de colmatação, efeito microfiler, e não químico. (MENG et al., 2016; PIMENTEL et al. 2017).

Oltulu & Sahin (2014), avaliaram combinações de diferentes nano-pós e sílica ativa em argamassas e verificaram que certas combinações tem a capacidade de maximizar a resistência compressiva destes compósitos mais do que a sílica ativa ou mesmo os nano-pós quando atuando separadamente. Vaske et al. (2010) destacam que em argamassas destinadas à reparos estruturais ou até mesmo reforço de estruturas, o uso da sílica ativa se faz importante ainda mais quando se objetiva reduzir a porosidade e alcançar altas resistências.

Garbalińska & Wygocka (2014) Analisou os efeitos da aplicação de sílica e comparou com aditivo superplasticificante e incorporador de ar nas propriedades de argamassas com 5% de sílica e 95% de cimento em massa. A adição de sílica ativa apresentou melhores resultados, reduzindo a taxa de capilaridade e a permeabilidade capilar das argamassas. A pozolana foi capaz de aumentar a densidade, diminuir o diâmetro dos poros em relação à argamassa controle e ainda promover a redução da quantidade de macroporos.

2.4. Avaliação do ciclo de vida (ACV)

Ao final da década de 1960, o mundo vivenciou o aumento abrupto do preço do barril de petróleo quando se descobriu que o mesmo é um recurso natural não renovável.

Desde então a busca pela racionalização do consumo de fontes energéticas e uma melhor utilização dos recursos naturais passou a ser o foco global. Neste cenário, a empresa Coca-Cola custeou o primeiro estudo com o objetivo de determinar se as garrafas de refrigerantes deveriam ser feitas de vidro, plástico ou alumínio. Este processo conhecido como REPA (resource and environmental Profile Analysis), desenvolvido pelo Midwest Research Institute, quantificou a utilização de recursos naturais e índices de emissões de poluentes, se tornando o primeiro estudo sobre ACV.

Segundo Coelho (2019), a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) trata-se de uma ferramenta que visa avaliar os impactos ambientais de um produto, processo ou atividade gerando parâmetros para comparações entre seus similares. Essa metodologia busca compilar informações acerca das entradas e saídas, sejam elas de matérias-primas e recursos energéticos ao longo do ciclo de vida do elemento estudado além de destacar os impactos ambientais por ele causado.

Em virtude das incertezas acerca da confiabilidade dos resultados das primeiras ACV's desenvolvidas, a normatização de uma metodologia teve seu início na década de 1990 a partir da ISO (The International Organization of standardization). A primeira norma produzida foi lançada em 1997 com o título “ISO 14040 – Environmental management – Life cycle assessment” estabelecendo princípios e a estrutura da normatização. Pouco tempo depois complementando a primeira norma foram desenvolvidas outras três, a ISO 14041:1998, a ISO 14042:2000 e a ISO 14043:2000 objetivando detalhar as etapas da avaliação do ciclo de vida, (SILVA, 2015).

Atualmente, as normas brasileiras que orientam a execução da ACV são a ABNT NBR ISO 14.040:2009 (Princípios e estrutura) e ABNT NBR ISO 14.044:2009 (Requisitos e orientações). Esta primeira destaca que a ACV permite identificar em diversos pontos do ciclo de vida de um produto possibilidades de melhorias de desempenho ambiental, selecionar indicadores de desempenho ambiental de maior relevância além de proporcionar maiores informações para tomadas de decisões estratégicas.

Reconhecer e quantificar todos os fluxos de entrada e saída associados aos processos contidos no ciclo de vida de um sistema de produto ou serviço é primordial para identificar, quantificar e avaliar os impactos ambientais. O ciclo de vida é tratado desde a aquisição das matérias-primas, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem até a disposição final, mais conhecido como do berço ao túmulo. De acordo com a ISO

14.040:2009, a completa avaliação do ciclo de vida é composta por: objetivo e escopo (I), análise do inventário do ciclo de vida (II), avaliação dos impactos ambientais (III) e interpretação dos resultados (IV) e seu processo de construção é dinâmico, como apresentado na Figura 3. Adicionalmente, ferramentas computacionais voltadas a facilitar a avaliação do ciclo de vida foram desenvolvidas e este assunto é brevemente abordado mais adiante.

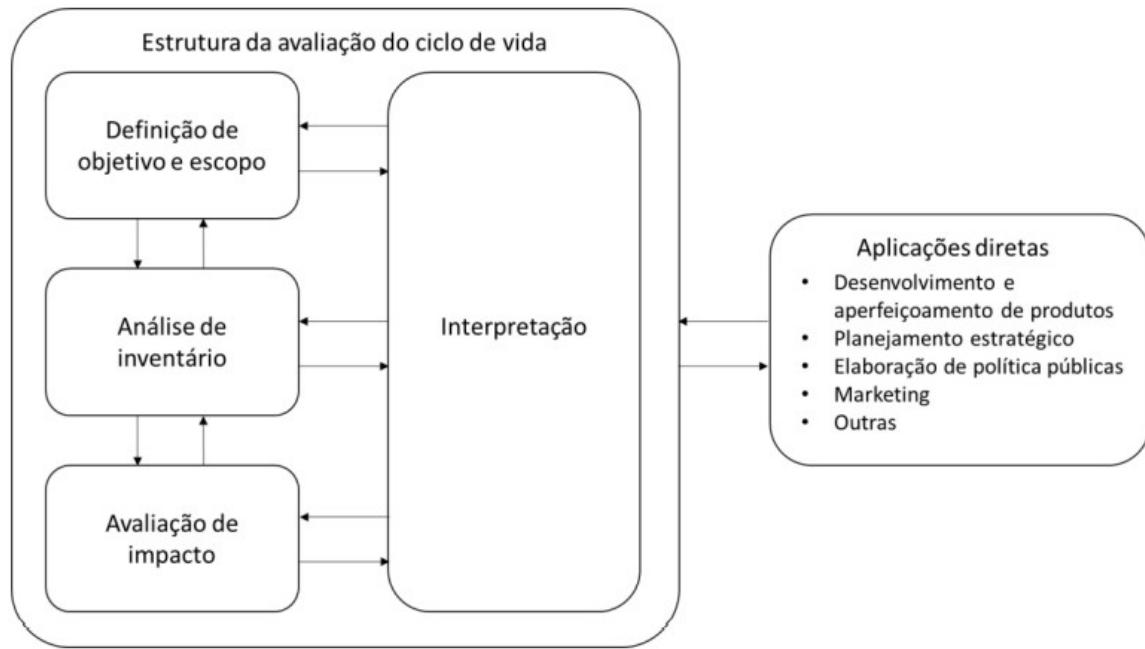


Figura 3 - Estrutura da avaliação do ciclo de vida. Fonte: (ABNT, 2009).

I) Objetivo e escopo

Definir o objetivo de uma ACV de maneira bem detalhada é imprescindível para que a avaliação seja a mais eficiente possível, apresentando as razões para sua realização além de indicar a quem se destina os resultados do estudo. Quanto ao escopo, este irá indicar a abrangência do estudo com base no objetivo e, para isso, a definição do sistema de produto e suas funções, sua unidade funcional, bem como a fronteira do mesmo devem ser determinadas. Complementando estas informações, devem ser definidos os procedimentos de alocação, categorias de impacto, metodologia de avaliação, entre outros.

Por definição, o sistema de produto consiste num conjunto de processos elementares, modelando o ciclo de vida de um produto. Estes processos, por sua vez, são ligados uns aos outros por fluxos de produtos intermediários, e quando ligados a outros sistemas de produtos essa ligação se dá por conta de fluxos de produtos e ao meio ambiente acontece através dos fluxos elementares. Produto é qualquer bem ou serviço que passará por

uma avaliação. Já a unidade funcional é responsável por quantificar as funções identificadas do produto, fornecendo um referencial à qual as entradas e saídas são relacionadas. Essa referência faz-se necessária de forma a assegurar a comparabilidade dos resultados da ACV.

Rastrear todas as entradas e saídas de um sistema de produto é uma tarefa delicada e em razão disto, a delimitação das fronteiras precisa estar bem definida. O conhecimento desses limites possibilita o alcance de resultados mais fidedignos, visto que a exclusão de estágios do ciclo de vida, entradas ou saídas e até mesmo processos influencia diretamente nos resultados e conclusões do estudo, e para isso, recomenda-se que toda e qualquer exclusão seja registrada com seu motivo devidamente explicado, (SILVA, 2015; PAULA 2016).

As fronteiras de uma ACV, em geral, são as que se seguem:

- do berço ao berço: todas as etapas do ciclo de vida do produto são consideradas, até mesmo sua volta ao ciclo como matéria prima.
- do berço ao túmulo: são consideradas todas as etapas desde a obtenção da matéria prima até se encerrar seu ciclo de vida.
- do berço ao portão: engloba desde a obtenção da matéria-prima até o processo produtivo do produto.
- do portão ao portão: apenas os processos dentro da unidade produtora são avaliados.

II) Análise do inventário do ciclo de vida

Determinado o sistema de produto e suas fronteiras, o próximo passo consiste na coleta de dados, compilação e tratamento dos mesmos e por último nos processos de cálculo. Conforme a coleta de dados vai avançando, limitações quanto a sua coleta e novas premissas vão surgindo e assim o conhecimento acerca do sistema de produto em estudo vai se aprofundando, (COELHO, 2019).

A obtenção dos dados pode ser feita através de produções científicas e base de dados, como o European Life Cycle Database, Ecoinvent e The U.S. Life Cycle Inventory Database. Além dessas alternativas, os dados podem ser estimados, medidos e até mesmo calculados e, quando calculado, recomenda-se documentar todos os procedimentos de cálculo adotados. Uma vez obtidas essas informações, a validação deve ser feita e ainda a correlação aos processos elementares, aos fluxos de referência e à unidade funcional. Por

fim, o resultado desta etapa consiste num inventário na qual estão agrupadas numa tabela as categorias de impacto consideradas.

III) Avaliação dos impactos ambientais (AICV)

Avaliar o impacto ambientado da ACV objetiva entender a significância dos impactos ambientais potenciais, utilizando para isso os resultados do inventário do ciclo de vida. A associação dos dados deste inventário com as categorias de impacto específicas e indicadores das categorias faz parte deste processo de avaliação que busca compreender estes impactos.

Conforme a NBR 14.044, a metodologia da AICV deve contemplar a seleção das categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização. Essas categorias descrevem questões ambientais de maior importância, como mudanças climáticas, eutrofização, depleção da camada de ozônio, entre outros. Cada categoria é representada por um indicador de categoria.

Ainda, esta metodologia deve incluir a associação qualitativa dos resultados do ICV às categorias de impacto selecionadas classificando-as e por fim o cálculo dos resultados dos indicadores de categoria, onde as emissões classificadas numa categoria sofrem ponderações por um fator de caracterização ou de equivalência, derivado do modelo de caracterização adotado. Silva (2015) dá o exemplo do fator de caracterização potencial de aquecimento global (GWP), dado em kg CO₂-equivalentes/kg de gás, estabelecido pela metodologia do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2007) para a categoria de impacto de mudanças climáticas.

Em se tratando de categorias de impacto, uma avaliação do ciclo de vida adota um conjunto destas conforme a metodologia empregada para avaliar os impactos ambientais. Em geral, costuma-se enquadrar essas metodologias em dois grupos, sejam eles ditos modelos clássicos (midpoint) e aqueles de danos (endpoint) (GOEDKOOP et al., 2013). Enquanto a modelagem clássica utiliza categorias de impacto como depleção da camada de ozônio, mudanças climáticas, ecotoxicidade, entre outras, a modelagem baseada em danos aborda danos aos recursos naturais, à saúde humana e à qualidade do ecossistema, por exemplo.

IV) Interpretação dos resultados

Tendo em vista os pressupostos adotados durante a fase da definição do objetivo e escopo, a interpretação da ACV visa avaliar os resultados oriundos da análise do inventário e consequentemente os impactos, e por fim apontando o produto ou serviço de menor impacto dentre os demais.

2.4.1. Ferramentas computacionais

Buscando facilitar as avaliações do ciclo de vida de produtos e serviços, foram desenvolvidas ferramentas computacionais capazes de realizarem o ICV e também a AICV de uma forma mais prática. Dentre os diversos softwares disponíveis para tal, destacam-se o BEES (EUA), GaBi (Alemanha), OpenLCA (Alemanha) e SimaPRO (Holanda). Este último é composto pela versão mais recente do banco de dados Ecoinvent, desenvolvido por diversas instituições suíças e que oferece mais de 10 mil processos.

O SimaPRO adota quatro conjuntos de dados:

- Atribucional, processo unitário;
- Atribucional, processo sistêmico;
- Consequencial, processo unitário;
- Consequencial, processo sistêmico.

Um processo tido como unitário se refere que as entradas e saídas computadas são condizentes apenas a um único passo do processo, complementado por referências de outros processos unitários. Quando o processo é sistêmico, todas as etapas estão inclusas nos registros do processo, não havendo possibilidade de ligações com outros processos (GOEDKOOP et al., 2013).

Atualmente o SimaPRO possui mais de 20 métodos para Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida, mais de 9 bibliotecas de inventários trazendo informações sobre milhares de processos e produtos. Cada método contém entre 10 e 20 categorias de impacto. Entre as metodologias europeias, destacam-se o CML-IA, EDIP 2003, EPD (2013), Ecological Scarcity 2013, EPS 2000, Impact 2002+, ILCD 2011 Midpoint+ e ReCiPe. Ainda, existem metodologias americanas de destaque como o BEES e o TRACI 2.1. Em se tratando de bases de dados, o SimaPRO faz uso das seguintes bases, Agri-Footprint, Inventory Database, Ecoinvent, ELCD, Input Output Database e USLCI.

2.4.2. Histórico de Avaliação do Ciclo de Vida de compósitos cimentícios

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) são compostos por resíduos de construção e demolição (RCC), geralmente compostos por restos de madeira, argamassa, concreto, tijolos, cerâmicas, aço, etc. A gestão destes é de grande valia diante da falta de locais adequados para sua disposição final e, desta maneira, a reutilização e reciclagem dos RSU é uma alternativa para amenizar o impacto ambiental da indústria da construção civil (BOVEA et al., 2016).

Na literatura científica, os trabalhos voltados ao estudo da ACV aplicada a sistemas construtivos e materiais de construção civil estão ganhando cada vez mais notoriedade, segundo Blengini (2009) e Caldas e Filho (2018). Estes últimos autores quantificaram os impactos ambientais dos materiais cimentícios normalmente empregados no Brasil para a execução de alvenarias de blocos de concreto. Paula (2016) avaliou o desempenho ambiental de argamassas e concretos contendo resíduos de cerâmica vermelha e de concretos, respectivamente, frente às versões tradicionais. Silva (2015) aplicou a metodologia da ACV para comparar concretos com substituição parcial do cimento por cinzas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz nas resistências convencional (25 MPa) e de alto desempenho (60 MPa).

Caldas e Sposto (2017) avaliaram as emissões de CO₂ na indústria (extração e fabricação) e na fase de transporte de blocos estruturais cerâmicos e de concreto, desde as fábricas até as capitais do Brasil. Como unidade funcional foi adotado um metro quadrado (1 m²) de vedação construída, sem considerar as juntas e os revestimentos de argamassa, uma vez que os dois sistemas de blocos apresentam o mesmo consumo de argamassa segundo dados coletados do TCPO, 2012. A localização das fábricas em cada estado foi feita através de pesquisas nos Programas Setoriais da Qualidade (PSQs), no âmbito do Ministério das Cidades e do Sistema de Qualificação de Materiais, Componentes e Sistemas Construtivos (SiMaC). Já os canteiros de obras foram adotados como as Universidades Federais de cada estado.

Para as emissões da indústria, foram encontradas emissões de carbono de 22,8 kgCO₂/m² para os blocos de concreto contra 24,5 kgCO₂/m² para os blocos cerâmicos, por mais que o consumo de matéria prima deste ser metade do primeiro. Isto é influenciado pelo fator médio de emissão de CO₂ do bloco de concreto ser duas vezes menor que o do bloco

cerâmico. Sobre o transporte, o bloco de concreto apresentou maiores valores de emissões em 19 capitais, enquanto os blocos cerâmicos para as 7 capitais restantes.

Caldas e Filho (2018) avaliaram os impactos ambientais de argamassas para chapisco, camada única e assentamento, graute e bloco de concreto estrutural. As unidades funcionais adotadas foram o volume de 1m³ para as argamassas e graute e, para o bloco de concreto a unidade de blocos para construir 1 m² de vedação vertical. Foi utilizado o banco de dados internacional Ecoinvent v. 3.3 e o método de avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV) adotado foi o CML-IA versão 3.03.

Foram consideradas as seguintes categorias de impacto ambiental: potencial de aquecimento global (GWP100), redução da camada de ozônio (ODP), acidificação (AP), eutrofização (EP), potencial de oxidação fotoquímica (POCP), depleção abiótica (elementos (ADP-e) e combustíveis fósseis (ADP-ff), de acordo com a EN 15978 (CEN, 2011) e EN 15804 (CEN, 2012).

Dentre as argamassas, a de chapisco no traço 1:3 (em volume) teve maior impacto ambiental. O cimento foi o insumo de maior representatividade para as argamassas simples em quase todas as categorias de impactos ambientais, com destaque para a de GWP 100. Para as argamassas mistas, a cal hidratada superou os impactos ambientais do cimento exercendo influência principalmente nas categorias de GWP100, AP, POCP e ADP-ff. Para produzir 1 m² de vedação vertical, o bloco de concreto se mostrou o de maior impacto, superando a argamassa de chapisco, isso porque esta é usada em pouca quantidade (espessura de 5 mm).

Caldas et al. (2016) buscaram quantificar as emissões de CO₂ para quatro especificações de chapisco disponíveis no SINAPI. O chapisco convencional rodado preparado na betoneira foi o que apresentou maior quantidade de emissão de CO₂ (277,4 kgCO₂), o chapisco rolado preparado no misturador foi o menor (64,0 kgCO₂). Para os autores isso é explicado pelo fato do chapisco rolado tem um traço mais pobre (1:4), enquanto o convencional possui traço 1:3, e em termo de insumos o cimento é o material que impulsiona os resultados nos dois tipos seguido do adesivo polimérico para aquele aplicado com rolo.

De Paula (2016) analisou argamassas com resíduos cerâmicos. Para a unidade funcional de 1 m³ de argamassa, este resíduo reduz os impactos ambientais dessas misturas em relação às convencionais em até a mesma porcentagem de cimento substituído. Também

avaliou concretos com RCC e concluiu que o agregado reciclado teve pouca influência nos impactos ambientais das misturas frente à de referência, isso sem considerar os potenciais benefícios da não destinação destes resíduos para aterros. Ainda, a classe de resistência à compressão é diretamente proporcional aos impactos, porém, avaliando conjuntamente a unidade funcional desempenho, essa proporcionalidade passa a ser inversa.

Silva (2015) produziu concretos de 25 MPa e 60 MPa trocando parte do cimento por pozolanas. O sistema de produto estudado foi a produção de concreto, cuja fronteira adotada foi do “berço-ao-portão”. Foram considerados os processos de obtenção das principais matérias-primas (cimento, cinzas, agregados, superplastificante), o transporte e o processo de mistura do concreto em uma central de concretagem. A modelagem de ciclo de vida foi realizada através do software SimaPro 8.0, no qual optou-se pela metodologia de avaliação de impactos CML-IA do tipo Midpoint orientada ao problema, com 10 categorias de impacto ambiental.

Sobre a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA), a mesma foi capaz de propiciar diminuição dos impactos ambientais em função da menor quantidade de cimento usado. Por mais que tenha provocado uma pequena diminuição da resistência mecânica à compressão, o teor ótimo para os concretos convencionais foi de 20% de substituição por CBCA ultrafina. Entretanto, para os concretos de alto desempenho, esse foi o teor com a maior carga de impactos ambientais. Nessa classe de resistência, os teores de 10% e 15% apresentaram desempenhos próximos ou até mesmo superiores do que o teor de 20%.

Para estas duas classes de resistência do estudo, a cinza da casca de arroz (CCA) foi a que apresentou melhores resultados, 90% menos impactos para a maior parte das categorias estudadas com 20% de substituição do cimento pelo resíduo ultrafino. Seu efeito se deu mais significativamente nas categorias de impacto mais influenciadas pelo cimento, como as mudanças climáticas eutrofização e acidificação.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Seleção e caracterização dos materiais

3.1.1. Cimento

O cimento Portland utilizado foi do tipo CP II - E 32 comercialmente disponível na região metropolitana de Belém/PA. A caracterização do cimento foi realizada no Laboratório de Engenharia Civil da UFPA. A determinação da massa específica do cimento foi feita seguindo as recomendações da NBR 16605 (ABNT, 2017) e seu valor obtido foi de 3,01 g/cm³. Na Tabela 1 estão representados os resultados referentes às características físicas e mecânicas do cimento CP II – E 32. A Tabela 2 apresenta algumas características químicas do cimento utilizado fornecidas pelo fabricante.

Tabela 1 - Características físicas e mecânicas do cimento CP II E – 32 (fornecido pelo fabricante).

Característica avaliada	Resultado	Normas
Massa específica	3,01 g/cm ³	NBR 16605 (ABNT, 2017)
Tempo de início de pega	≥ 1h	NBR 16607 (ABNT, 2018)
Tempo de fim de pega	≤ 10h	NBR 16607 (ABNT, 2018)
Finura na peneira # 200	≤ 12h	NBR 11579 (ABNT, 2012)
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	-
	3 dias	≥ 10,0
	7 dias	≥ 20,0
	28 dias	≥ 32,0

3.1.2. Sílica ativa

A sílica ativa usada na pesquisa é da marca Silmix, a mesma é proveniente do município de Breu Branco/PA, onde está localizada uma das filiais da empresa Dow Corning Silício do Brasil. A composição química deste material é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição química da sílica ativa. Fonte: Dow Corning, 2010.

Substância	Teor (%)
Sílica amorfa (SiO ₂)	≥ 85,0
Sílica Cristalina (SiO ₂)	≤ 0,50
Óxido de Sódio (Na ₂ O)	≤ 1,50
Carbono total (C)	≤ 6,00
Umidade (H ₂ O)	≤ 3,00

A determinação da massa específica e finura da sílica ativa, NBR 16605 (ABNT, 2017) e NBR 16372 (ABNT, 2015), respectivamente. Os ensaios foram realizados no laboratório de engenharia civil da Universidade Federal do Pará – UFPA utilizando o mesmo procedimento adotado para o cimento e, para essa propriedade se obteve valor igual a 2,22 g/cm³. A empresa que produz a sílica ativa utilizada na pesquisa afirma que o material está de acordo com a NBR 13956-1 (ABNT, 2012). Na Tabela 3 estão apresentadas algumas características da sílica ativa.

Tabela 3 - Características físicas e mecânicas da sílica ativa.

Característica avaliada	Resultados
Finura Blaine (cm ² /g)	1.531,65
Umidade	0,95
Massa específica (g/cm ³)	2,22
Diâmetro médio (d50) µm	32,70

Objetivando encontrar a faixa granulométrica de maior predominância para a amostra de sílica ativa, foi realizada a análise granulométrica do material. O equipamento utilizado é um medidor de partículas a laser, Analysette 22 MicroTec Plus, patenteado pela empresa FRITSCH GmbH – Fresagem e Dimensionamento, pertencente ao laboratório do Instituto de Geociências da UFPA.

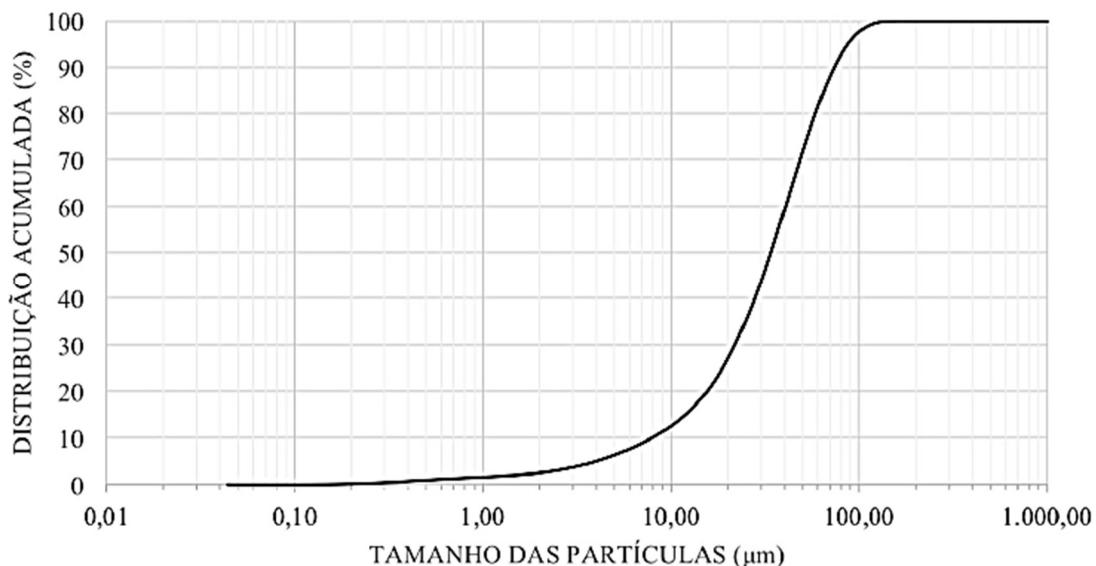


Figura 4 - Curva granulométrica da sílica ativa. Fonte: Autor, 2023.

O Método utilizado consiste em: numa suspensão de água destilada (7 mL) colocar a amostra (1g) e com o auxílio de uma pipeta, adicionar a mistura de água destilada e sílica ativa numa unidade de dispersão que, como líquido de suspensão também faz uso da água. A faixa de medição foi de 0,08 a 2.000 μm e com um tempo de medição de ciclo completo de 2 minutos. A Figura 4 evidencia que a maior quantidade de partículas da amostra tem tamanhos de grãos entre 10 e 100 μm .

A partir da Figura 7 é possível determinar que o diâmetro médio das partículas da amostra é de 32,70 μm , evidenciando uma elevada área específica. Essa característica é responsável por permitir que os grãos de sílica adentrem entre os vazios formados quando da hidratação do cimento, uma vez que a reação deste material ocorre em poucos minutos após o contato com água. Após a reação do cimento originar hidróxido de cálcio, a sílica ativa usará este produto em sua reação para originar compostos com propriedades aglomerantes.

3.1.3. Agregados miúdos

Como agregado miúdo utilizou-se a areia quartzosa comercialmente disponível na região metropolitana de Belém/PA. Antes de realizar a mistura do material na produção das argamassas, o material foi então deixado para secagem ao ar livre e posteriormente o mesmo passou por processo de peneiramento na malha 4,8 mm, descartando o material retido.

Como agregado miúdo reciclado utilizou-se o resíduo de concreto proveniente de corpos de provas de dimensões 150 cm x 300 cm com faixa de resistência de 20 a 40 MPa, obtidos em central dosadora de concreto localizada nas proximidades da Universidade Federal do Pará - UFPa. Inicialmente os corpos de prova foram beneficiados em britadores do tipo mandíbulas e em seguida submetidos a peneiramento mecânico, onde, o material passante na peneira de malha 4,8 mm foi selecionado para uso.

A caracterização dos agregados miúdos naturais e reciclados foi feita mediante o emprego de normas regulamentadoras como também com o auxílio de ensaios recomendados na literatura.

A determinação da composição granulométrica foi definida através da NBR 248 (ABNT, 2003), massa unitária por meio da NBR 16972 (ABNT, 2021). Para a massa específica dos agregados miúdo natural e miúdo reciclado, foram utilizadas a NBR 16916 (ABNT, 2021), que prescreve o uso do frasco de Chapman.

A determinação da granulometria dos agregados miúdos natural e reciclado foi realizada atendendo às determinações da NBR 248 (ABNT, 2003). Nas Tabela 6 e 7, estão apresentados os resultados da granulometria das amostras de agregados natural e reciclado, respectivamente.

Ao passo que o valor do módulo de finura dos materiais se eleva, o tamanho de suas partículas também será maior, sua superfície específica será menor e consequentemente será preciso menos pasta para envolver todos os grãos. O AMRC obteve um módulo de finura de 2,01 e dimensão máxima característica de 2,40 mm, enquanto o AMN apresentou um módulo de finura de 1,34 e dimensão máxima característica de 1,19 mm, o que seria possível dizer que a necessidade de água para o agregado reciclado será maior, porém outras propriedades também devem ser consideradas quando se vai analisar a quantidade de água para as misturas, como o formato, porosidade e textura das partículas.

O gráfico com as curvas granulométricas obtidas para os agregados miúdo natural e reciclado estão apresentados na Figura 5.

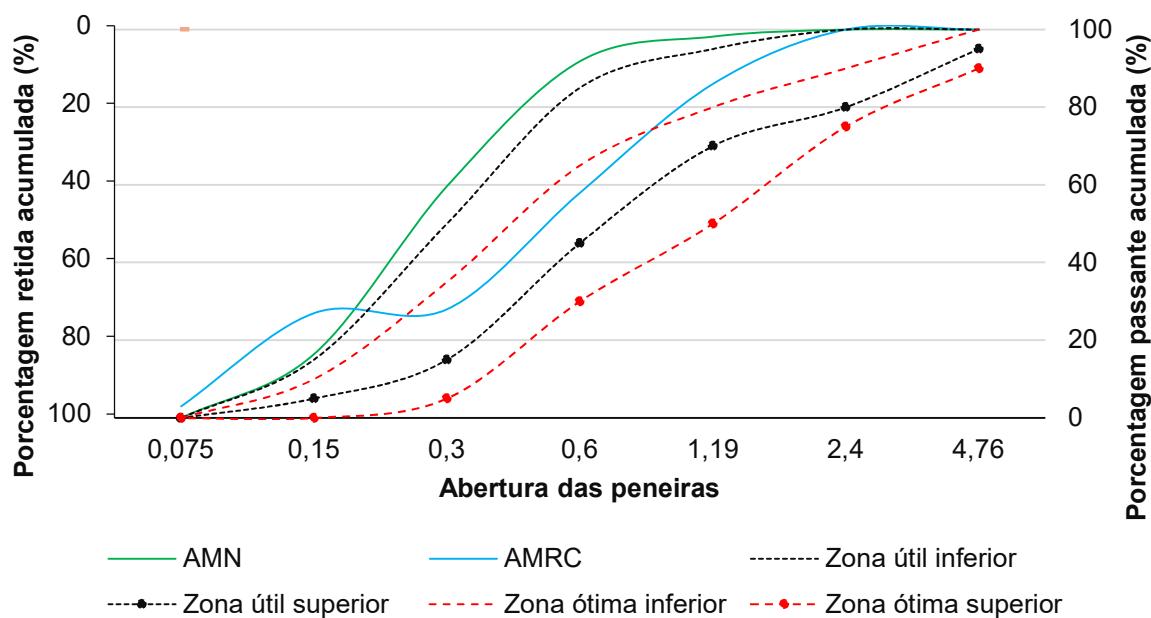


Figura 5 - Curvas granulométricas do AMN e RCC. Fonte: Autor, 2023.

O conhecimento do valor para a massa específica dos agregados é muito importante para o cálculo do consumo de materiais necessários para a produção de concretos e argamassas. Sua definição é feita através da massa do material por unidade de volume, considerando os espaços vazios internos do mesmo, conforme a NBR 16916 (ABNT, 2021).

A massa unitária no estado solto das amostras natural e reciclada foi determinada com o auxílio da NBR 16972 (ABNT, 2021). Sua definição é feita através da massa das partículas ocupando uma unidade de volume, em outras palavras, o volume preenchido pelas partículas, considerando os espaços vazios entre os mesmos.

A Tabela 5 apresenta as características físicas dos materiais utilizados nesta pesquisa, assim como as respectivas normas utilizadas. Como pode ser observado, a areia reciclada de concreto (AMRC) apresentou massas específica e unitária cerca de 8% menores que às da areia natural.

A massa unitária para o resíduo reciclado apresentou proporção ainda menor quando comparada com o material natural. Como pode ser observado pela Tabela 4, a areia reciclada de concreto (AMR) apresentou massa unitária cerca de 10% menor que à da areia natural (AMN).

Tabela 4 - Caracterização física dos materiais.

Características	Cimento	Sílica	AMN	AMRC
Massa Específica (kg/m ³) - NBR 7251:1982	3.015	2.220	2.591	2.378
Massa Unitária (kg/m ³) - NBR 16605:2017	-	-	1.537	1.377
Absorção 1 (%) – NBR 16916:2021	-	-	1,01	-
Absorção 2 (%) – (LEITE, 2001)	-	-	-	12,00
Módulo de Finura – NBR NM 248:2003	-	-	1,34	2,01
Dimensão Máx. – NBR NM 248:2003	-	-	1,20	2,40
Coef. de Uniformidade – NBR 7181:2016	-	-	2,75	5,00
Coef. de Curvatura – NBR 7181:2016	-	-	0,91	1,00

Para a absorção de água do agregado natural, a norma utilizada foi a NBR 16916 (ABNT, 2021), enquanto para o agregado reciclado foi utilizado o método proposto por Leite (2001). Devido a grande quantidade de finos presente na amostra de AMRC, o método da norma supracitada não seria adequado devido à forte coesão entre os grãos, o que dificultaria determinar a condição saturada superfície seca do material, também poderia ocorrer a perda de parte do AMRC durante o ensaio quando o agregado fosse submerso.

A absorção da amostra reciclada conta com um recipiente munidos com tampa e fundo revestidos por uma malha quadriculada de 0,044 mm. Este vasilhame foi acoplado à uma balança dotada de um suporte para medida hidrostática da massa. A amostra foi

submetida a secagem na estufa e colocada para resfriamento natural até a temperatura ambiente e, posteriormente, a mesma foi colocada no recipiente e submersa em água. As leituras dos ganhos de massa do resíduo foram feitas no período de 24 horas da seguinte maneira:

- 10 minutos iniciais: realizar uma leitura em intervalos de 2 minutos;
- 10min. até 30 minutos: realizar uma leitura em intervalos de 5 minutos;
- 30min. Até 1 hora: realizar uma leitura em intervalos de 10 minutos;
- 1 horas até 2 horas: realizar uma leitura em intervalos de 15 minutos;
- 2 horas até 9 horas: realizar uma leitura em intervalos de 1 hora, e
- 24 horas: realizar a última leitura.

Para os 10 minutos iniciais foi realizada a leitura a cada 2 minutos em razão da rápida absorção de água pelas partículas mais finas da amostra, o que dificultou a primeira medida. A curva de absorção d'água do material reciclado apresentada na Figura 6, constata que o agregado é capaz de absorver antes dos 30 minutos iniciais 50% da massa total de água que absorveria.

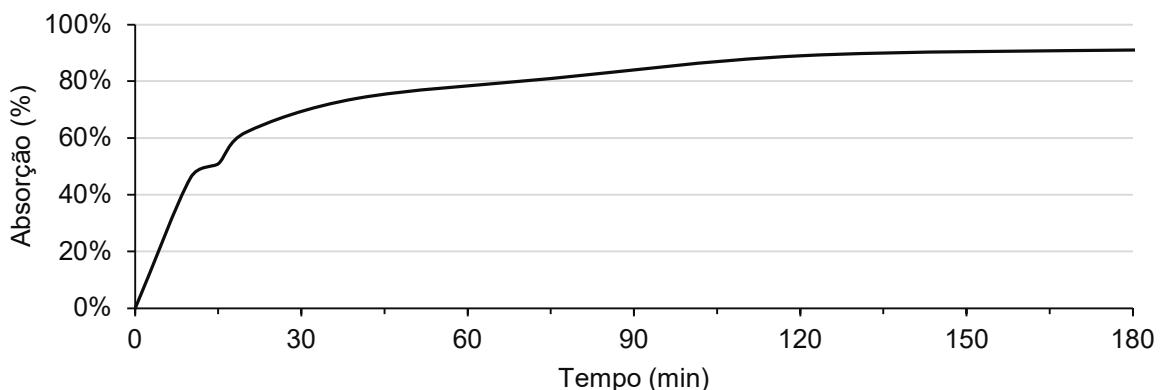


Figura 6 - Curva de absorção de água do agregado reciclado. Fonte: Autor, 2023.

Desta maneira, foi decidido que seria feita a compensação da absorção de água do agregado miúdo reciclado de concreto umidificando o material 10 minutos antes de se iniciar a produção das argamassas no misturador. Assim, foi adicionada à água de cada traço o correspondente a 50 % da taxa de absorção média do resíduo. Compensar apenas parcialmente a taxa de absorção do agregado miúdo reciclado de concreto possibilita que a

mistura não apresente excesso de água, o que reduziria os valores de sua resistência mecânica e durabilidade.

O ensaio de absorção de água para o agregado miúdo reciclado mostra uma taxa de absorção de água consideravelmente maior se comparada com AMN, 12 % para o primeiro (Tabela 5). Esse comportamento típico do AMR se justifica em razão da argamassa aderida ao agregado natural, formando uma estrutura porosa sobre o mesmo, fato constatado em trabalhos realizados por Leite (2001) e Barra (2011).

Tabela 5 - Taxa de absorção média dos agregados reciclados.

	Seco	Submerso
Absorção (%)	7,80	14,20
Absorção média (%)		12,00

3.1.4. Água

A água utilizada para a produção das argamassas é fornecida pela Universidade Federal do Pará através da sua estação de tratamento de água. Não foi empregado nesta pesquisa qualquer tipo de aditivo para alterar a consistência e a trabalhabilidade das argamassas mesmo quando do uso do agregado miúdo reciclado de concreto.

3.2. Produção das argamassas

Após o beneficiamento do agregado reciclado de concreto e a caracterização dos materiais foi iniciada a produção das argamassas.

Para a produção da argamassa de cimento, adotaram-se dois traços em massa, 1:3 e 1:4, que foram escolhidos por conta dos seus teores ricos em cimento, e também com o intuito de compensar a diminuição de rigidez causada pelo aumento do teor de substituição de RCC nas argamassas, que controla a capacidade de restrição da deformação da matriz, rigidez esta determinada pela porosidade do RCC (LEITE, 2001).

Como esta pesquisa objetiva avaliar a influência da substituição parcial do cimento por sílica ativa nas propriedades de argamassas RCC, 3 teores de substituição de agregado miúdo natural (AMN) por agregado miúdo reciclado (AMR) foram adotados, nos valores de

0%, 30% e 50%. A escolha foi baseada em pesquisas bibliográficas (LEITE, 2001; CORINALDESI, 2009; CORINALDESI e MARCONI, 2009; CALCADO 2015).

Para a produção das argamassas foi necessário inicialmente realizar a compensação em volume dos agregados miúdos. De acordo com Cabral (2007), a substituição dos agregados em massa sem levar em consideração esta compensação iria resultar em traços com volumes maiores de AMR e maior consumo de água para obter misturas equivalentes à mistura de referência, em consistência e resistência mecânica, já que os agregados reciclados possuem massa específica menor do que os naturais.

A compensação do volume do material foi realizada através da Equação 1:

$$M_{amr} = M_{amn} * \frac{\gamma_{amr}}{\gamma_{amn}} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

M_{amr} = Massa do agregado miúdo reciclado (kg)

M_{amn} = Massa do agregado miúdo natural (kg)

γ_{amr} = Massa específica do agregado miúdo reciclado (kg/dm³)

γ_{amn} = Massa específica do agregado miúdo natural (kg/dm³)

Outro fator que foi considerado na produção das argamassas, antes da incorporação do agregado reciclado, foi a pré-molhagem dos agregados miúdos reciclados. O RCC é capaz de absorver em 10 minutos 60% de toda a água que seria capaz de absorver em 24 horas. Esta etapa prévia, de acordo com Leite (2001) e Cabral (2007), evita que o AMR, por conta de sua alta porosidade, consuma toda a água de amassamento do aglomerante, o que impediria sua completa hidratação.

Diante disso, é importante ressaltar que, devido a de taxa de absorção do AMR ser relativamente alta optou-se por utilizar como taxa de compensação desta o valor de 50%. De acordo com estudos anteriores desenvolvidos por Leite (2001), Reis (2013) e Krüger (2013) isto tem influência positiva no índice de consistência de argamassas, que é diretamente proporcional à relação água/aglomerantes, dessa forma evitando problemas com a perda de trabalhabilidade devido à falta de água na mistura.

Para um melhor entendimento, as argamassas foram previamente divididas em 6 famílias, correspondendo aos traços com apenas incorporação de 0%, 30% e 50% de RCC para os traços 1:3 e 1:4 (proporção de cimento e areia, em massa), e 12 subgrupos distintos que correspondem a substituição do cimento por sílica ativa nos teores de 0%, 5%, 10% e 15%, segundo a representação esquemática mostrada na Figura 7.

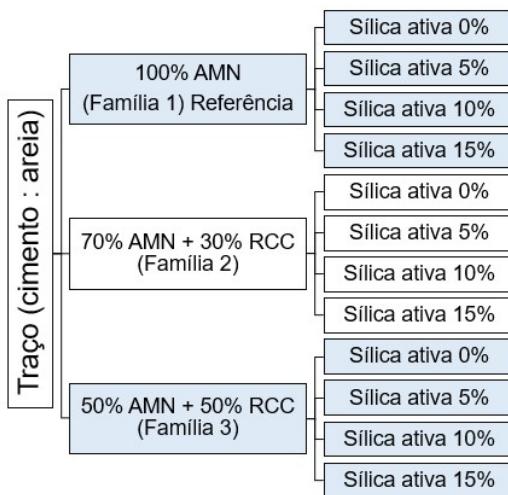


Figura 7 - Representação esquemática dos traços (1:3 e 1:4). Fonte: Autor, 2023.

As argamassas para revestimento de paredes e tetos desta pesquisa seguiu as recomendações de preparo da NBR 16541 (ABNT, 2016) e os métodos de ensaio da NBR 13276 (ABNT, 2016). Objetivando definir a relação água/cimento para as argamassas, o índice de consistência adotado como referência para a produção das argamassas aqui estudadas foi de 260 ± 5 mm, conforme recomendação do item 5.2.1 da primeira norma supracitada. Portanto, o teor de água das argamassas não foi fixado, pois, quando adicionado o material reciclado de concreto e/ou sílica ativa à mistura, esses materiais isoladamente ou combinados, promovem maior consumo de água em razão da elevada porosidade para o RCC e devido à expressiva área específica da sílica. Nas tabelas 19 e 20 do APÊNDICE A estão os traços unitários utilizados nesta pesquisa para os traços de proporção 1:3 e 1:4, em massa de cimento e areia.

A metodologia de preparo das argamassas seguiu as recomendações da NBR 16541 (ABNT, 2016). O preparo destas argamassas foi realizado num misturador mecânico com capacidade para 4,5 litros, dotado de 2 velocidades, cuja velocidade máxima de rotação da pá metálica é da ordem de 140 ± 5 Rr/min (rotações por minuto) e o movimento planetário desta pá desenvolve uma velocidade de 62 ± 5 Rr/min.

A preparação da mistura da argamassa no estado fresco para todos os traços foi realizada conforme recomendação da NBR 16541 (ABNT, 2016).

Para a determinação do módulo de elasticidade, tração na flexão, densidade de massa aparente e absorção de água por capilaridade foram moldados corpos de prova prismáticos 40 mm x 40 mm x 160 mm (Figura 10). Esses corpos de prova prismáticos foram moldados conforme recomendações da NBR 13279 (ABNT, 2005).

3.3. Análise da influência da sílica ativa no comportamento físico-mecânico das argamassas de revestimento com agregados reciclados

3.3.1 Descrição dos produtos avaliados

Neste trabalho serão estudadas argamassas de revestimento de proporção 1:3 e 1:4, em massa, em razão de ser o traço comumente empregados nas obras da região. O estudo experimental desta pesquisa foi organizado em 4 etapas. Na primeira etapa, a escolha do agregado reciclado foi realizada e posteriormente houve o beneficiamento do mesmo para seu emprego em argamassas. Na sequência, a definição dos métodos para caracterizar o material e sua caracterização de fato compõem a segunda etapa deste estudo. Na terceira etapa, as argamassas de referência para cada traço, 1:3 e 1:4 (proporção de cimento e areia, em massa) foram produzidas e logo em seguida foi a vez de variar os teores de substituição de cimento e agregado miúdo. Por fim, na quarta etapa os ensaios mecânicos foram realizados.

Para uma melhor avaliação e entendimento de cada uma das argamassas produzidas, para cada traço, 1:3 e 1:4, (proporção de cimento e areia, em massa) algumas variáveis controle (Tabela 6) foram elaboradas e também variáveis respostas (Tabela 7) como mostradas na sequência. Os ensaios a serem realizados nas argamassas no estado endurecido foram designadas como sendo as variáveis respostas, como destacadas a seguir.

Tabela 6 - Variáveis controle da pesquisa.

Variáveis controle	
Substituição do AMN pelo AMRC nas argamassas	0%, 30% e 50%
Substituição do cimento por sílica ativa nas argamassas	0%, 5%, 10% e 15%
Idade das argamassas para os ensaios mecânicos	28 dias

Tabela 7 - Variáveis resposta da pesquisa.

Variáveis resposta	
Resistência à compressão	NBR 7215 (ABNT, 2019)
Resistência à tração na flexão	NBR 13279 (ABNT, 2005)
Módulo de elasticidade	NBR 15630 (ABNT, 2008)
Densidade de massa aparente	NBR 13280 (ABNT, 2005)
Absorção de água por capilaridade	NBR 15259 (ABNT, 2016)

A seguir, na Tabela 8 está esquematizado a estruturação experimental para a produção das argamassas de revestimento recicladas, tanto em função do percentual de substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo reciclado de concreto nos teores de 0%, 30% e 50%, quanto do cimento Portland pela sílica ativa (SA) nos teores de 0%, 5%, 10% e 15%. O esquema apresentado é válido para os traços de proporção 1:3 e 1:4, em massa.

Tabela 8 - Representações dos grupos de argamassas produzidas.

Grupos	Subgrupos	Extensão da composição macro dos subgrupos
Família 1	R0S0	Argamassa com agregado natural
	R0S5	Argamassa com agregado natural e 5% de SA
	R0S10	Argamassa com agregado natural e 10% de SA
	R0S15	Argamassa com agregado natural e 15% de SA
Família 2	R30S0	Argamassa com 30% de agregado reciclado e 0% de SA
	R30S5	Argamassa com 30% de agregado reciclado e 5% de SA
	R30S10	Argamassa com 30% de agregado reciclado e 10% de SA
	R30S15	Argamassa com 30% de agregado reciclado e 15% de SA
Família 3	R50S0	Argamassa com 50% de agregado reciclado e 0% de SA
	R50S5	Argamassa com 50% de agregado reciclado e 5% de SA
	R50S10	Argamassa com 50% de agregado reciclado e 10% de SA
	R50S15	Argamassa com 50% de agregado reciclado e 15% de SA

De modo a facilitar o gerenciamento da produção e análise dos corpos de prova, as argamassas foram previamente divididas em 3 famílias e 12 subgrupos distintos para cada

traço de proporção 1:3 e 1:4, (em massa) segundo a representação esquemática mostrada na Tabela 9. Cada traço possui uma família de referência. O consumo dos materiais constituintes das misturas de argamassas produzidas de ambos os traços se encontra nas Tabelas 21 e 22, no Apêndice B.

As argamassas de cimento foram produzidas e moldadas seguindo as recomendações normativas da NBR 16541 (ABNT, 2016). O tipo de cura adotada foi do tipo úmida e a idade para a realização dos ensaios mecânicos foi para a idade de 28 dias. Os resultados apresentados de cada ensaio foram obtidos através da média aritmética simples dos resultados individuais, para cada conjunto formado por 3 corpos de prova confeccionados com a mesma argamassa.

A Tabela 9 apresenta a relação de ensaios realizados no estado endurecido bem como as normas regulamentadoras, especificando a quantidade de corpos-de-prova ensaiados e a idade de ensaio adotada.

Tabela 9 - Relação de ensaios e parâmetros dos copos-de-prova.

Ensaios	Normas	CP's	Idade
Resistência à compressão	NBR 7215 (ABNT, 2019)	3	28 dias
Resistência à tração na flexão	NBR 13279 (ABNT, 2005)	3	28 dias
Módulo de elasticidade	NBR 15630 (ABNT, 2008)	3	28 dias
Densidade de massa aparente	NBR 13280 (ABNT, 2005)	3	28 dias
Absorção de água por capilaridade	NBR 15259 (ABNT, 2016)	3	28 dias

3.4. Análise da influência da sílica ativa nos aspectos ambientais de argamassas de revestimentos com agregados reciclados

3.4.1. Definição do objetivo e escopo

Este estudo teve como objetivo principal avaliar o efeito da substituição parcial do cimento por sílica ativa no comportamento físico-mecânico e quantificar os impactos ambientais provenientes da produção das argamassas de revestimentos com agregados reciclados de concreto e sílica ativa. A comunidade acadêmica, órgão públicos, empresário da indústria da construção civil e aqueles envolvidos direta ou indiretamente com a produção dos materiais envolvidos são o público a que se destina esta pesquisa, que ainda busca a atenção do poder público para esta temática.

Como sistema de produto avaliado tem-se a produção de argamassa, e a fronteira estabelecida foi do portão ao portão. De acordo com a fronteira do sistema de produto definida, vale destacar que não foram avaliados quaisquer impactos evitados em decorrência da reutilização dos resíduos mencionados, principalmente em função da não disposição dos mesmos em aterros ou na destinação adequada de acordo com seu tipo. Com relação a alocação de impactos, considerou-se que os impactos de produção da sílica ativa são computados apenas na indústria de origem, mais especificamente à indústria siderúrgica, sendo assim, os impactos da sílica foram considerados nulos.

3.4.2. Definição da unidade funcional

Neste trabalho, a unidade funcional será o volume de argamassa, em metro cúbico, necessário para desenvolver um (01) MPa de resistência à compressão aos 28 dias.

3.4.3. Inventário do ciclo de vida

Para a realização da avaliação do ciclo de vida das argamassas de revestimento foram utilizados dados trazidos por De Paula (2016) e Dong (2018), que avaliaram os impactos ambientais na produção de traços de argamassas e concretos reciclados e Concreto de Ultra Alto Desempenho (UHPC), respectivamente, onde estes autores utilizaram os dados provenientes da base de dados Ecoinvent v.3.02 fazendo uso da ferramenta computacional SimaPro v.8.0.5.

Neste trabalho, o inventário do ciclo de vida se deu através de processos atribucionais sistêmicos, uma vez que esta pesquisa objetiva avaliar o uso de resíduos alternativos em argamassas.

3.4.4. Metodologia de avaliação de impacto do ciclo de vida

Nesta pesquisa, após revisão bibliográfica definiu-se a metodologia adotada para a avaliação dos impactos do ciclo de vida (AICV) das argamassas, sendo a CML-IA (Guinée et al., 2004), desenvolvida pelo Institute of Environmental Sciences (CML) da Universidade de Leiden – Holanda e utilizada por diversos autores (SILVA, 2015; DE PAULA, 2016; DONG, 2018). Esta metodologia possui abordagem do tipo “Midpoint” orientada para o problema e possui 10 categorias de impacto de impacto ambiental, como mostra a Tabela 10.

Tabela 10 - Categorias de impacto ambiental do método CML-IA.

Categoria de impacto	Fator de caracterização	Unidade	Sigla
Depleção dos recursos abióticos	Potencial de depleção abiótica	KgS _{Beq}	ADP
	Potencial de depleção abiótica	MJ	ADP (ff)
Toxicidade humana	Potencial de toxicidade humana	Kg1,4- DB _{eq}	HTP
Ecotoxicidade de águas doces	Potencial de ecotoxicidade de água doces	Kg1,4- DB _{eq}	FAETP
Ecotoxicidade de águas marinhas	Potencial de ecotoxicidade de água marinhas	Kg1,4- DB _{eq}	MAETP
Ecotoxicidade terrestre	Potencial de ecotoxicidade terrestre	Kg1,4- DB _{eq}	TETP
Mudanças climáticas	Potencial de aquecimento global (GWP 100 anos)	Kg1,4- DB _{eq}	TETP
Mudanças climáticas	Potencial de aquecimento global (GWP 100 anos)	KgCO _{2eq}	GWP100
Depleção da camada de ozônio	Potencial de depleção do ozônio	KgCFC- 11 _{eq}	ODP
Formação de fotooxidantes	Potencial de criação de ozônio fotoquímico	KgC ₂ H _{4eq}	POCP
Acidificação	Potencial de acidificação	KgSO _{2eq}	AP
Eutrofização	Potencial de eutrofização	KgPO _{4-3eq}	EP

A metodologia CML-IA foi desenvolvida na Holanda retratando a realidade ambiental europeia, portanto, para a realidade brasileira pode não ser tão preciso os seus resultados. Apesar desta metodologia contar com 10 categorias de impacto de diferentes níveis de abrangências, a discussão será feita sobre o potencial de aquecimento global, cuja abrangência é global (GWP100) e também potencial de depleção abiótica (ADP-ff).

Para o desenvolvimento desse trabalho, foi feita uma coleta de dados referentes à emissão de CO₂ e consumo de energia para a produção dos materiais constituintes das argamassas em trabalhos acadêmicos e em declaração ambiental do produto (do inglês Environmental Product Declaration, EPD). Os dados de cada material são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Emissão de CO_{2eq}. e consumo de energia dos materiais.

Material	GWP(100) (kg CO _{2eq} / kg material)	ADP (MJ / kg material)	Referência
Cimento Portland	0,9060	1,8957	VOTORANTIM (2016)
Sílica ativa	0,0000	0,0000	DONG (2018)
Areia natural	0,0127	0,1870	DE PAULA (2016)
Agregado reciclado	0,0111	0,1700	DE PAULA (2016)
Água	0,0000	0,0000	DE PAULA (2016)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Características das argamassas no estado fresco

Os resultados de caracterização das argamassas no estado fresco para os traços 1:3 e 1:4, em massa, encontram-se na Tabela 12. Quanto a relação água/cimento, os valores adotados na formulação das misturas variaram de 0,51 a 0,86. Nota-se que as misturas com maior teor de agregados necessitaram de mais água para atender os requisitos de consistência pré-estabelecidos que foi de 260 ± 5 mm. Ainda, com o aumento no teor de adição também influenciou no consumo de água, sendo maior nas misturas com a maior proporção de sílica.

Tabela 12 - Propriedades das argamassas de revestimento no estado fresco.

Misturas	a/c		Índice de consistência (mm)		Densidade de massa no estado fresco (kg/m ³)		Teor de ar incorporado (%)		Retenção de água (%)	
	1:3	1:4	1:3	1:4	1:3	1:4	1:3	1:4	1:3	1:4
R0S0	0,51	0,63	259	260	2208	2193	2	2	86	86
R0S5	0,53	0,63	261	257	2196	2188	2	2	88	88
R0S10	0,54	0,63	256	253	2195	2173	3	3	89	89
R0S15	0,57	0,68	255	255	2152	2157	2	2	90	90
R30S0	0,58	0,67	256	256	2101	2103	4	4	85	85
R30S5	0,60	0,70	255	258	2100	2093	4	4	85	85
R30S10	0,65	0,77	255	258	2099	2093	1	1	87	87
R30S15	0,67	0,77	255	258	2089	2073	2	2	90	90
R50S0	0,56	0,73	254	263	2111	2047	4	4	87	87
R50S5	0,59	0,75	252	259	2085	2027	4	4	88	88
R50S10	0,60	0,82	251	256	2083	2009	4	4	89	89
R50S15	0,65	0,86	248	256	2054	2002	3	3	91	91

As Figuras 8 e 9 apresentam a variação do índice de consistência das argamassas de revestimento. Os resultados demonstram uma perda de espalhamento com o incremento de areia reciclada e sílica ativa.

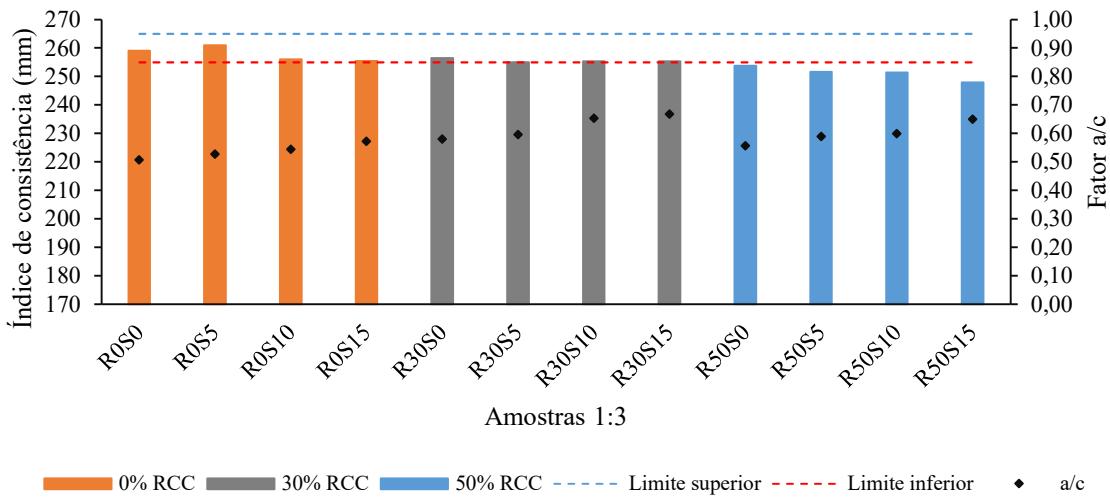


Figura 8 - Resultados médios de índice de consistência das argamassas 1:3

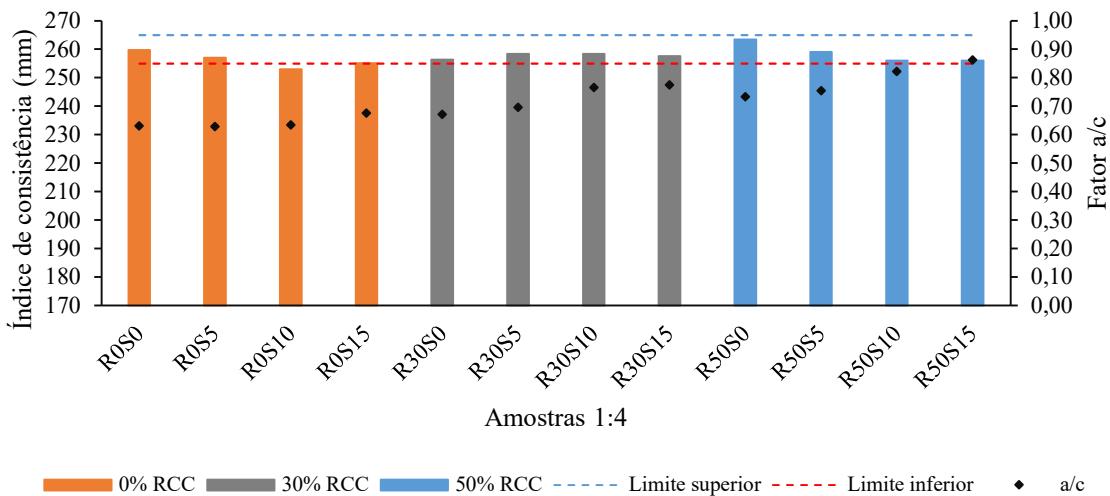


Figura 9 - Resultados médios de índice de consistência das argamassas 1:4.

Com relação ao efeito das características físicas do agregado miúdo reciclado no comportamento plástico das argamassas percebe-se que a incorporação de um material de aspecto rugoso, formato angular, baixa densidade e elevada capacidade de absorção impacta diretamente nos aspectos reológicos das argamassas. Quanto a granulometria, os resultados demonstram um maior módulo de finura para areia reciclada o que diminuiria a necessidade de água na mistura, no entanto, este resíduo proporcionou aumento na relação água/cimento das misturas, uma vez que o teor de materiais finos foi maior frente a areia natural, cerca de 10%. Esses achados vão de encontro àqueles encontrados por outros pesquisadores (PEDROZO, 2008; CALCADO, 2015; CORRÊA, 2019).

Com relação ao uso de sílica ativa a mesma foi incorporada nas misturas com o intuito de lubrificar a superfície dos materiais reciclados e evitar o intertravamento dos grãos durante a mistura. Porém, essa escolha afetou em parâmetros como a relação água/cimento, uma vez que partículas finas como a sílica ativa necessitam de mais água por conta de sua superfície específica, que é superior que do cimento (Qing et al 2007).

Nas Figuras 10 e 11 estão apresentados os resultados de densidade de massa das argamassas recicladas de revestimento e suas variações frente à argamassa de referência.

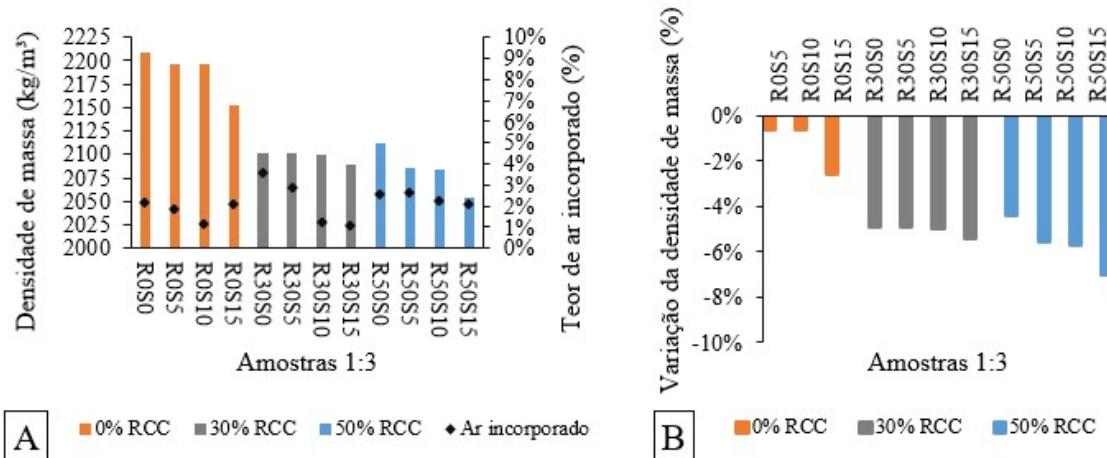


Figura 10 - Resultados médios das argamassas 1:3. A) Densidade de massa. B) Variação da densidade de massa.

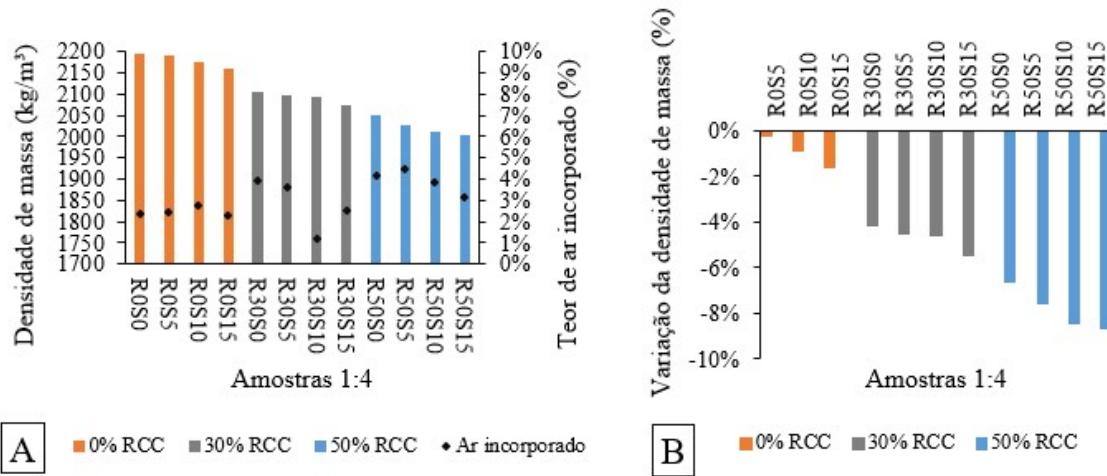


Figura 11 - Resultados médios das argamassas 1:4. A) Densidade de massa. B) Variação da densidade de massa.

No que tange a densidade no estado fresco, todas argamassas formuladas enquadram-se na classe DF4, conforme prescrição da NBR 13281-1 (ABNT, 2023).

Percebe-se que mesmo utilizando um material mais leve, a variação de densidade para os diferentes traços foi pequena, com reduções inferiores a 10% conforme mostra as Figuras 9 e 11. Estes resultados corroboram àqueles encontrados por outros autores, que ao produzirem argamassas com substituição de 25% a 100% de RCC alcançaram valores da ordem de 1.950 a 2.150 kg/m³ (PEDROZO, 2008; BARRA, 2011; e CARASEK et al., 2018).

Diante disso, os resultados encontrados neste trabalho se mostraram satisfatórios e próximos daqueles presentes na bibliografia. A redução da densidade das argamassas recicladas frente a de referência é consequência da argamassa aderida na superfície dos grãos da areia reciclada que a torna mais porosa. A baixa densidade de massa obtida com esses materiais é vantajosa, uma vez que facilita o processo de mistura, transporte, manuseio, aplicação do produto e ainda proporciona maior produtividade do profissional.

A Figura 12 apresenta a capacidade de retenção de água das argamassas recicladas de revestimento. Com relação capacidade de retenção de água dessas argamassas, observa-se que os materiais utilizados promoveram grandes alterações, todas argamassas formuladas enquadram-se nas categorias U2 e U3 que são de produtos com alta capacidade de retenção de água.

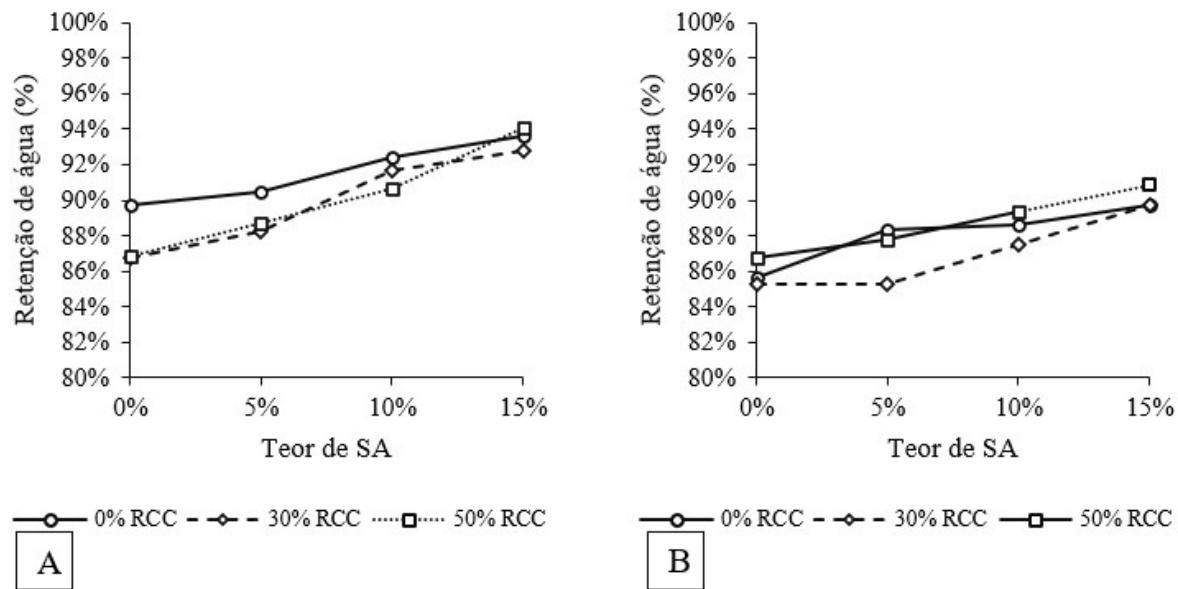


Figura 12 – Resultados médios de retenção de água das argamassas. A) Traço 1:3. B) Traço 1:4.

Essa característica promovida pela grande quantidade de fino no resíduo como também pela SA, faz com que as argamassas sejam trabalháveis por mais tempo, apresentem extensão de aderência, reduzindo falhas de contato entre a argamassa e o substrato. Além

disso, uma alta retenção das argamassas torna mais gradativa as reações de hidratação do cimento, o que melhora as propriedades mecânicas e ainda pode atenuar os efeitos da retração nas idades iniciais. (BAÍA e SABBATINI, 2008).

Gomes et al., (2010) constatou que a retenção evolui à medida que se aumenta o teor de material reciclado nas argamassas ao incorporar 15%, 30% e 45%, obtendo 86%, 90% e 92% de retenção, respectivamente. Tanaka et al., (2010) encontrou o valor médio de 89% de retenção para argamassas compostas por diferentes granulometrias de areias recicladas combinadas com sílica. Os resultados encontrados pelos autores referenciados e os encontrados nesta pesquisa são justificados pela presença de finos, que favoreceu esta propriedade, devido a superfície específica elevada.

A tabela 13 apresenta um resumo da classificação geral das argamassas no estado fresco para os traços de proporção 1:3 e 1:4, em massa, de acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2023).

Tabela 13 – Classificação das argamassas no estado fresco.

Misturas	Densidade (kg/m³)		Retenção de água (%)	
	1:3	1:4	1:3	1:4
R0S0	DF4	DF4	U2	U2
R0S5	DF4	DF4	U2	U2
R0S10	DF4	DF4	U3	U2
R0S15	DF4	DF4	U3	U2
R30S0	DF4	DF4	U2	U2
R30S5	DF4	DF4	U2	U2
R30S10	DF4	DF4	U3	U2
R30S15	DF4	DF4	U3	U2
R50S0	DF4	DF4	U2	U2
R50S5	DF4	DF4	U2	U2
R50S10	DF4	DF4	U3	U2
R50S15	DF4	DF4	U3	U3

4.2. Características das argamassas no estado endurecido

Os resultados de caracterização das argamassas no estado endurecido encontram-se na Tabela 14.

Tabela 14 - Propriedades das argamassas de revestimento no estado endurecido.

Misturas	Módulo de elasticidade (GPa)		Densidade de massa E. endurecido (kg/m ³)		Tração na Flexão (MPa)		Compressão (prisma) (MPa)		Coeficiente de abs. Cap. (g/dm ² .min ^{1/2})	
	1:3	1:4	1:3	1:4	1:3	1:4	1:3	1:4	1:3	1:4
R0S0	31,5	22,7	2172	1938	8,3	5,39	24,2	17,8	0,12	0,30
R0S5	30,0	21,9	2149	1936	7,7	6,52	16,6	19,3	0,09	0,18
R0S10	28,7	20,1	2084	1929	5,6	4,02	16,1	17,3	0,07	0,17
R0S15	27,5	18,3	2081	1918	4,5	3,09	26,7	18,2	0,06	0,13
R30S0	23,2	15,0	1935	1916	7,6	3,91	20,2	12,3	0,21	0,30
R30S5	21,8	14,4	1927	1880	7,4	5,59	17,3	15,9	0,13	0,29
R30S10	19,9	11,8	1918	1847	3,9	3,59	23,9	12,0	0,09	0,31
R30S15	18,2	9,9	1913	1825	3,6	2,93	22,3	11,5	0,09	0,37
R50S0	15,1	9,8	1906	1801	8,4	4,88	18,0	10,5	0,10	0,22
R50S5	14,8	9,5	1900	1727	6,9	3,79	19,0	12,2	0,09	0,31
R50S10	14,4	7,6	1890	1717	6,6	2,89	21,3	10,1	0,26	0,32
R50S15	13,4	4,2	1886	1707	4,1	1,33	14,7	6,8	0,24	0,40

4.2.1. Módulo de elasticidade

Os resultados médios para o módulo de elasticidade dinâmico frente ao consumo de cimento das argamassas de revestimento encontram-se apresentados nos gráficos das Figuras 13 e 14. Com relação aos efeitos das características físicas do agregado reciclado de concreto nas propriedades mecânicas das argamassas, percebe-se que a incorporação de um material altamente poroso, com elevado teor de finos impacta diretamente nas propriedades mecânicas das argamassas. O aumento do teor de agregados ocasiona a elevação do fator a/c para manter um índice de consistência padrão, resultando numa pasta com menor consumo de cimento e consequentemente menor rigidez, reduzindo o módulo de elasticidade.

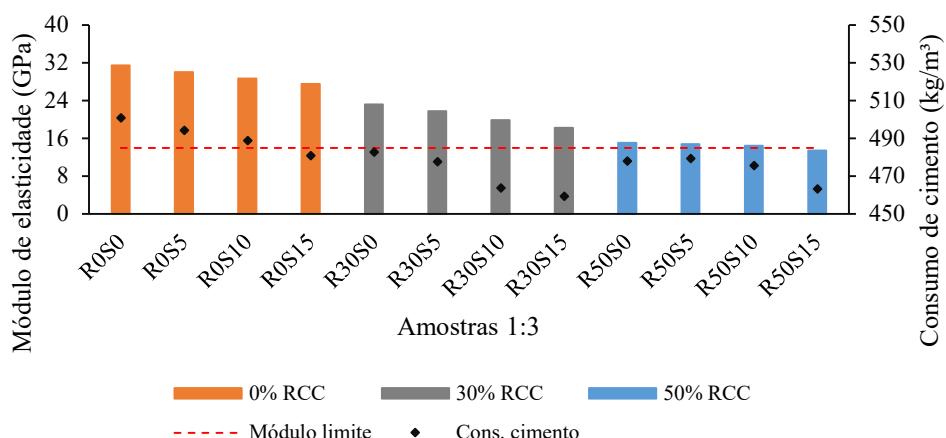


Figura 13 - Resultados médios do módulo de elasticidade das argamassas. Traço 1:3.

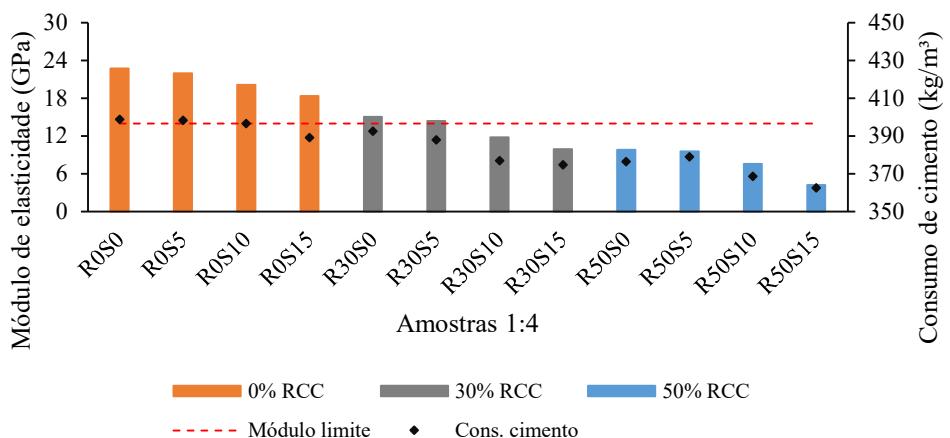


Figura 14 - Resultados médios do módulo de elasticidade das argamassas. Traço 1:4.

Com relação ao uso de sílica ativa, a mesma foi incorporada nas misturas em virtude de seu efeito microfiler e da atividade pozolânica elevada, capaz de densificar o esqueleto granular das argamassas. Aos 28 dias, àquelas misturas com areia reciclada e SA na sua composição reduziram gradualmente o valor do módulo conforme o teor do resíduo siderúrgico subia. Isso se deve a elevada superfície específica da sílica que demanda maior quantidade de água na mistura para atingir a consistência desejada e por consequência o módulo diminui. Comportamento similar foi observado por Pimentel et al. (2018) ao substituir diferentes teores de cimento por sílica em argamassas com relação água/aglomerante de 0,6 e traço 1:3.

À medida que o consumo de cimento cresce nas argamassas, a relação água/cimento tende a reduzir e mais rígida elas serão, com o módulo de elasticidade também tendendo ao crescimento. As argamassas com um alto teor de cimento estão mais sujeitas às tensões que causarão o aparecimento de fissuras prejudiciais durante a secagem, além das trincas e possíveis descolamentos da argamassa junto ao substrato já no estado endurecido.

No que tange o módulo de elasticidade dinâmico para o traço 1:3, apenas a argamassa R50S15 atendeu o requisito normativo, enquadrando-se na classe E1, indicada como ARV-I, destinada para ambientes internos e fachadas com altura máxima de 10 metros. As outras misturas, ultrapassaram o valor limite de 14 GPa, não sendo recomendadas para aplicação em revestimento vertical.

Quanto ao traço 1:4, as amostras R30S10, R30S15, R50S0 e R50S5 enquadram-se na classe E2 podendo ser classificadas como ARV-I e ARV-II, destinadas para ambientes

internos e fachadas com até 60 metros de altura. A mistura R50S10 enquadrou-se na classe E3 sendo classificada como ARV-I, ARV-II e ARV-III indicadas para alturas maiores que 60 metros e, por fim, a amostra R50S15 atendeu a classe E4, indicada como ARV-I, ARV-II, ARV-III e AET, indicada para primeira camada de revestimento de edificações, fazendo parte de um revestimento ATD multicamadas.

As Figuras 15 e 16 apresenta uma análise comparativa para a densidade de massa das argamassas de revestimento recicladas, com substituição de 0%, 5%, 10% e 15% de sílica ativa em relação ao cimento, traço 1:3, em massa.

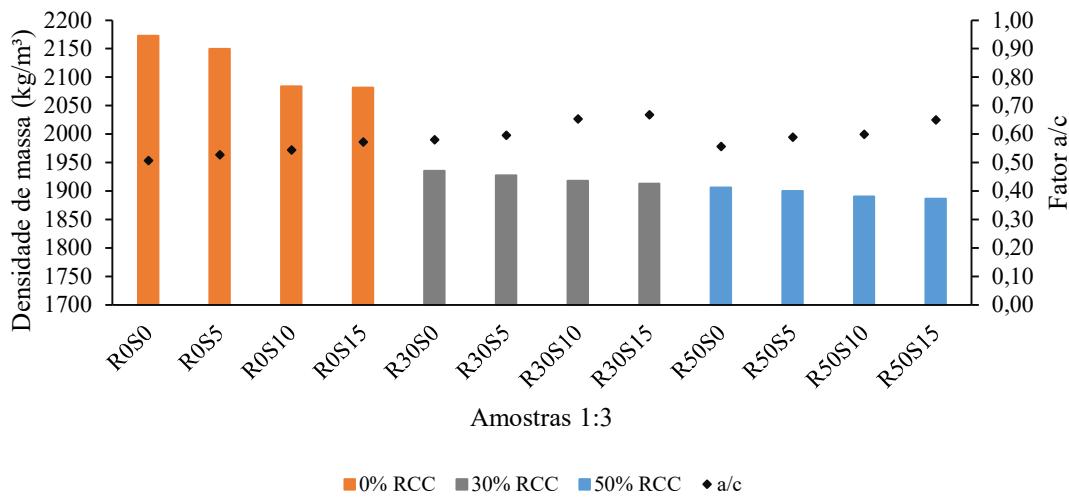


Figura 15 - Resultados médios de densidade de massa frente ao fator a/c. Traço 1:3 (em massa).

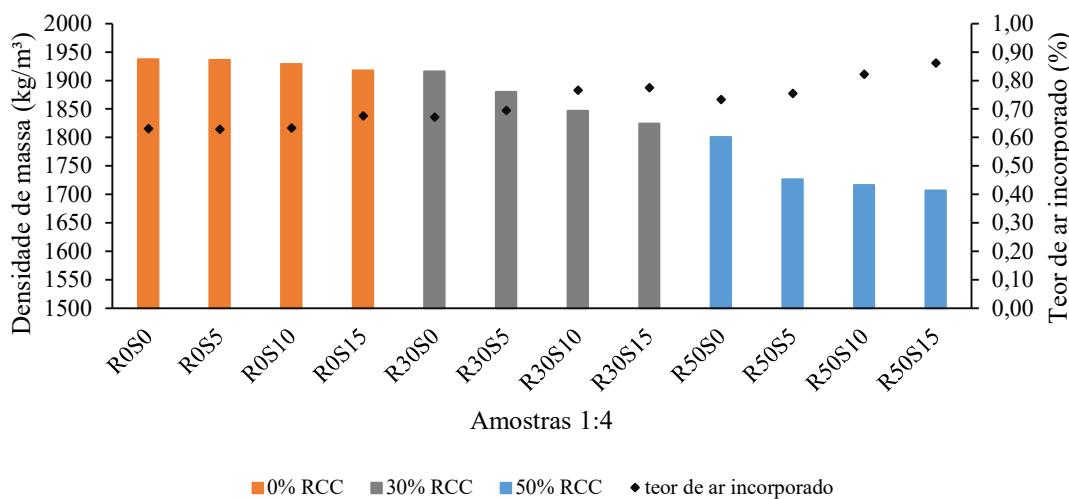


Figura 16 - Resultados médios de densidade de massa frente ao fator a/c. Traço 1:4 (em massa).

Verificou-se que aos 28 dias, o uso do agregado reciclado foi capaz de reduzir a densidade de massa das amostras à medida que aumentava o teor de resíduo de concreto quando comparadas à mistura de referência, R0S0. Para a argamassa de referência, a densidade de massa foi de 2.172,40 kg/m³, 8,29% superior que o valor obtido para a amostra R30S0 e 16,40% maior para a argamassa em que o agregado miúdo natural foi substituído em 50% pelo RCC. Na família sem a presença do resíduo de concreto, a SA promoveu reduções de 1,42%, 2,79% e 3,94% para as misturas com 5%, 10% e 15% de sílica ativa.

Quanto à substituição do cimento por sílica ativa nas argamassas de revestimento, o aumento do teor desta pozolana não proporcionou decréscimos significativos nesta propriedade, sendo inferiores à 5%. Este resultado já era esperado em razão deste material ter sido utilizado como substituição ao cimento, cuja massa específica é superior à da sílica ativa. Outra explicação se dá em razão da atividade pozolânica da SA ser cineticamente lenta e restrita em idades precoces, podendo equiparar suas propriedades às misturas de referências em idades mais avançadas, ao formar novos produtos de hidratação e assim preencher os vazios presentes. (QING et al., 2006; PIMENTEL et al., 2017).

Os resultados corroboram com os apresentados por (GAYARRE et al., 2010; MALTA et al., 2013; CARASEK et al., 2018), que observaram densidade média de 1.910 kg/m³ ao substituir 20% a 45% de areia por RCC, com reduções desta propriedade não superando 10%. Pimentel et al., (2017) observou que ao substituir sílica em argamassas, estas aos 28 dias desenvolviam massa específica pouco abaixo da referência, no entanto, aos 91 dias as respostas foram contrabalanceadas, deste modo, os valores obtidos nesta pesquisa são satisfatórios, uma vez que a baixa densidade das argamassas, acarretariam menor sobrecargas nas estruturas sem comprometer sua durabilidade, uma vez que a sílica ativa reduziria o índice de vazios ao passar do tempo.

Diante dos resultados obtidos para densidade de massa no estado endurecido das argamassas formuladas, todas se enquadram na classe DE4, com exceção das amostras R50S5, R50S10 e R50S15, classificadas como DE3, conforme prescrição da NBR 13281-1 (ABNT, 2023).

4.2.2. Absorção de água por capilaridade

As Figuras 17 e 18 apresentam os resultados médios do coeficiente de absorção de água por capilaridade frente ao fator a/c das argamassas recicladas de revestimento.

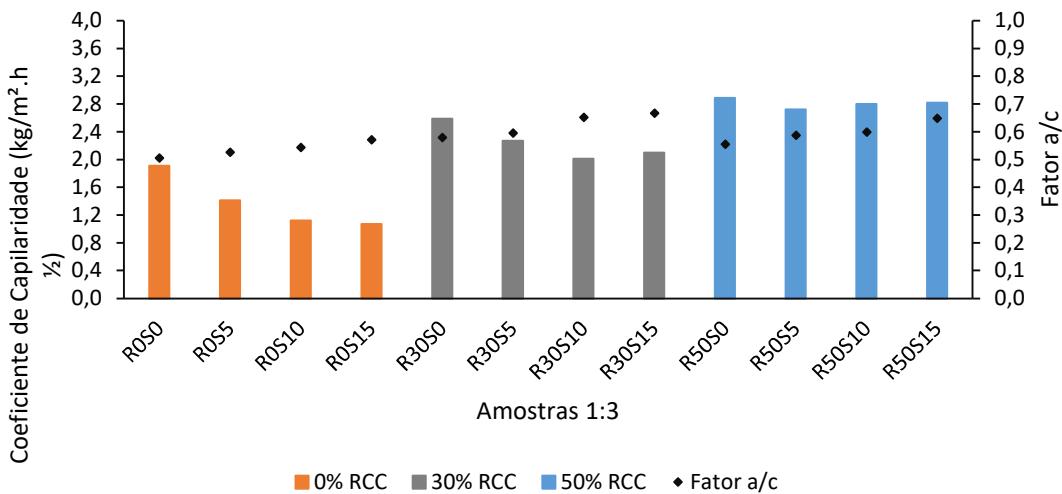


Figura 17 - Resultados médios do coeficiente de absorção de água por capilaridade frente ao fator a/c. Traço 1:3.

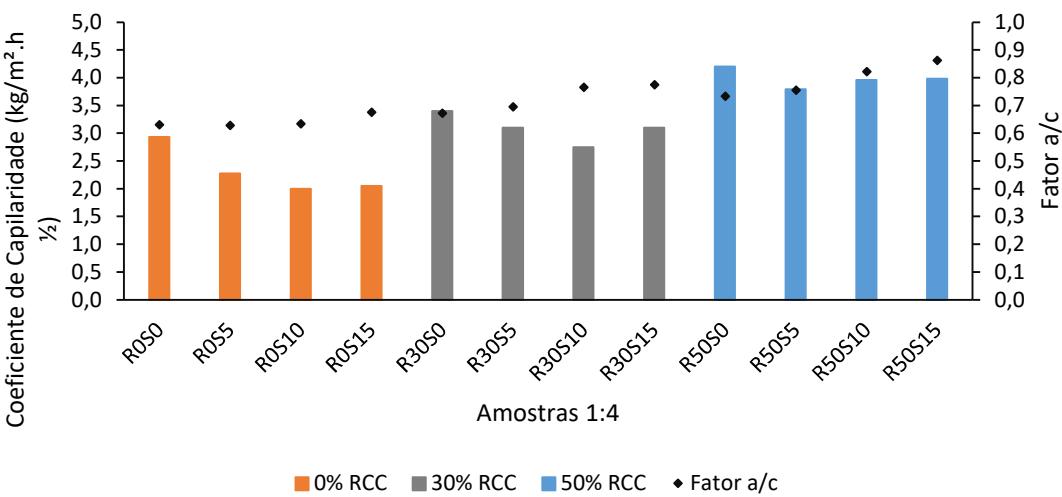


Figura 18 - Resultados médios do coeficiente de absorção de água por capilaridade frente ao fator a/c. Traço 1:4.

Com relação aos efeitos das características físicas do agregado reciclado de concreto, observa-se que o emprego de um material altamente poroso, de forma angular e com elevado teor de finos impacta negativamente a absorção capilar das argamassas. À medida que o teor de areia reciclada aumentava nas misturas, a quantidade de água adicionada também aumentava a fim de manter a consistência adequada, em razão do maior tamanho dos grãos e da elevada absorção de água deste agregado. A maior quantidade de água livre nas misturas se mostrou prejudicial ao aumentar o volume de vazios contribuindo para o aumento do coeficiente de absorção das argamassas de revestimento.

Verificam-se reduções do coeficiente de absorção capilar de cerca de 41% quando nas argamassas de referência (traço 1:3) é incorporado um percentual de 15% de sílica, corroborando com os resultados encontrados por Braga, (2010). O refinamento dos poros provocado pelo efeito de enchimento dos interstícios da mistura nas idades iniciais, servem de pontos de nucleação dos produtos de hidratação da sílica em idades avançadas, quando ocorrerá sua reação pozolânica. No entanto, observa-se que, com a mesma taxa de incorporação de sílica, ao reduzir-se o traço da argamassa de 1:3 para 1:4, o coeficiente de absorção aumenta. De fato, isso ocorre em razão da diminuição do teor de cimento das argamassas e ao aumento da relação água/cimento, promovendo aumento dos poros capilares e maior fluxo de água entre os mesmos.

O incremento de 10% de sílica ativa foi aquele que apresentou melhores resultados nas argamassas das famílias com 30% de agregado reciclado na composição para ambos os traços estudados. Acima deste percentual de sílica, as amostras demandaram maior quantidade água na mistura resultando em coeficientes mais elevados, mesmo assim, ainda, se equiparando à argamassa de referência. Os resultados das misturas com sílica ativa para as famílias com 50% de agregado reciclado apresentaram reduções máximas de 6% e 10% quando comparadas as amostras R50S0 dos traços 1:3 e 1:4, respectivamente.

Estes resultados se assemelham aos encontrados por diversos autores (NENO, 2010; BRAGA, 2010; OLTULU & SAHIN 2014; RAHMAN et al., 2016) ao avaliarem argamassas com RCC e sílica ativa, na qual encontraram o teor de 10% de SA como o mais satisfatório. Entretanto, os autores ressaltam que o aumento da absorção capilar em argamassas se deva exclusivamente à presença do agregado reciclado na mistura, mas sim por uma mudança na estrutura interna proveniente da adição destes materiais.

4.2.3. Resistência à tração na flexão

As Figuras 19 e 20 apresentam a variação da resistência à tração na flexão das argamassas frente ao consumo de cimento aos 28 dias. Os resultados demonstram um decréscimo da resistência mecânica em função do menor consumo de cimento, do incremento da sílica ativa nas argamassas e do aumento do teor de agregados nas argamassas. Observa-se que todas argamassas formuladas enquadram-se na classe R4, exceto as amostras R30S15 e R50S10, classificadas como R3 e a amostra R50S15 como R2.

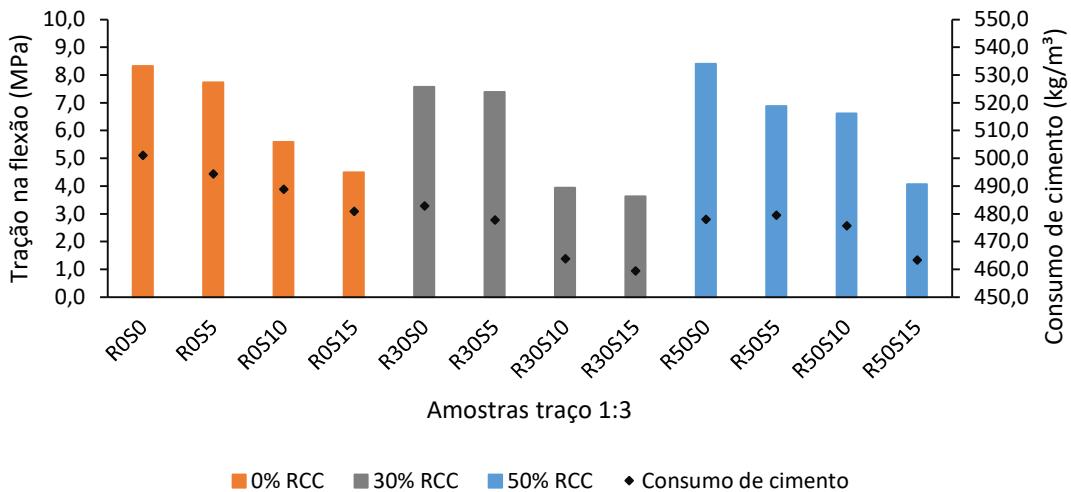


Figura 19 - Resultados médios da resistência à tração na flexão das argamassas frente ao consumo de cimento. Traço 1:3.

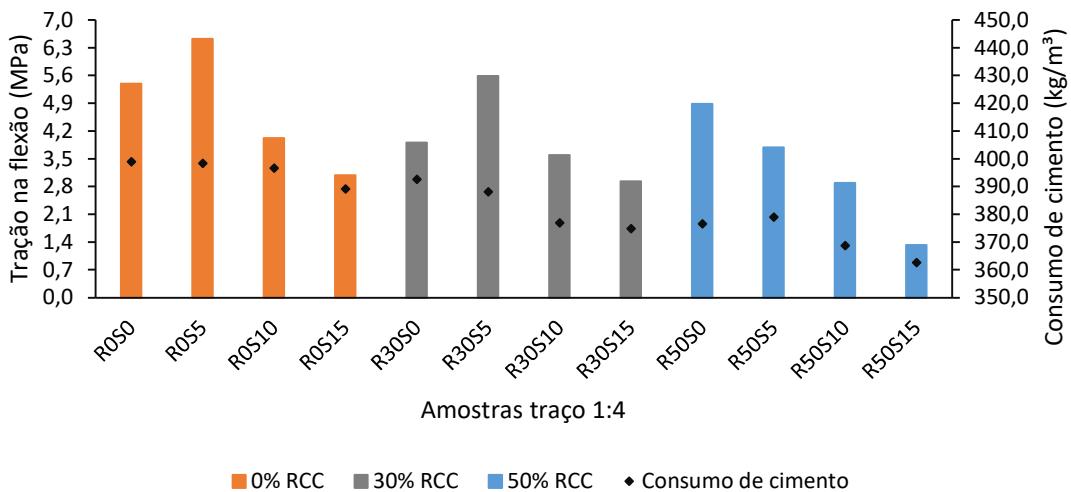


Figura 20 - Resultados médios da resistência à tração na flexão das argamassas frente ao consumo de cimento. Traço 1:4.

As argamassas R30S15 (traço 1:3) e R50S15 (traço 1:4) consumiram menos cimento e mais água frente à referência, e apresentaram as maiores reduções para a resistência à tração na flexão, 56% e 75%, respectivamente. A incorporação do agregado reciclado e da sílica ativa na mistura reduz o consumo de cimento em razão do aumento da relação água/cimento para garantir uma trabalhabilidade adequada, deixando o esqueleto granular com maior porosidade. A maior resistência para o traço 1:3 foi vista para a argamassa R50S0 mesmo consumindo menos cimento e mais água que a amostra de referência. A melhoria da resistência está relacionada a presença de grãos de cimento ainda por hidratar na areia reciclada que aumentou sua densidade de massa aparente.

Para as argamassas do traço 1:4, a incorporação de 5% de sílica ativa aumentou a resistência à tração das amostras sem uso de areia reciclada e também naquela que fez uso de 30% de RCC. O maior aumento ocorreu para a amostra R0S5, 21%, mesmo com consumo de cimento e água praticamente iguais à de referência. Esse ganho de resistência é explicado pelo efeito físico promovido pela sílica que preenche os interstícios da mistura, servindo como sítios de nucleação para os produtos de hidratação e, consequentemente densificando o esqueleto granular. O aumento do teor de agregados nas misturas provoca reduções de até 67% quando se compara as amostras com teores iguais de RCC e SA. Esse aumento reduz a quantidade de cimento nas argamassas e aumenta a relação água/cimento, reduzindo a densidade através do aumento da quantidade dos poros capilares e maior fluxo de água.

Essas observações estão de acordo com os resultados obtidos por outros autores que estudaram a incorporação de agregado reciclado e/ou sílica ativa em argamassas. Por exemplo, Pedrozo (2008) ao variar de 25% a 100% de resíduos de construção de concreto e misto em argamassas de revestimentos, encontrou reduções mais expressivas conforme aumentava o teor do resíduo, sendo amenizado pela atividade pozolânica dos finos incrementados.

A classificação geral das argamassas quanto aos critérios estabelecidos para o estado endurecido está apresentada na Tabela 15.

Tabela 15 – Classificação das argamassas no estado endurecido.

Misturas	Módulo de elasticidade (GPa)		Densidade de massa E. endurecido (kg/m ³)		Tração na Flexão (MPa)		Coeficiente de abs. Cap. (kg/m ² .H ^{1/2})	
	1:3	1:4	1:3	1:4	1:3	1:4	1:3	1:4
R0S0	-	-	DE4	DE4	R4	R4	W6	W5
R0S5	-	-	DE4	DE4	R4	R4	W6	W6
R0S10	-	-	DE4	DE4	R4	R4	W6	W6
R0S15	-	-	DE4	DE4	R4	R4	W6	W6
R30S0	-	-	DE4	DE4	R4	R4	W5	W5
R30S5	-	-	DE4	DE4	R4	R4	W6	W5
R30S10	-	E2	DE4	DE4	R4	R4	W6	W5
R30S15	-	E2	DE4	DE4	R4	R3	W6	W5
R50S0	-	E2	DE4	DE4	R4	R4	W5	W4
R50S5	-	E2	DE4	DE3	R4	R4	W5	W5
R50S10	-	E3	DE4	DE3	R4	R3	W5	W5
R50S15	E1	E4	DE4	DE3	R4	R2	W5	W5

4.3. Emissões de dióxido de carbono (CO₂) e consumo de energia

Os resultados obtidos para as emissões de CO₂ e consumos de energia de produção de 1 metro cúbico das argamassas são apresentados nas Tabelas 5 e 6, respectivamente. As emissões geradas na fabricação dos insumos das argamassas foram calculadas com base nos valores citados na literatura e, tendo em vista que tanto para a sílica quanto para a água as emissões de CO₂ e consumos energia são nulas, optou-se por não apresentar os valores nas Tabelas 16 e 17.

Tabela 16 – Resultados médios das emissões de CO₂ (kgCO₂/m³) das argamassas.

Amostras	Cimento		Areia		RCC		Total	
	1:3	1:4	1:3	1:4	1:3	1:4	1:3	1:4
R0S0	453,90	361,51	19,09	20,27	0,00	0,00	472,99	381,78
R0S5	425,48	342,91	18,83	20,24	0,00	0,00	444,32	363,15
R0S10	398,63	323,45	18,63	20,15	0,00	0,00	417,26	343,60
R0S15	370,35	299,74	18,32	19,77	0,00	0,00	388,67	319,52
R30S0	437,47	355,81	12,88	13,97	4,45	4,80	454,79	374,57
R30S5	411,23	334,10	12,74	13,80	4,40	4,74	428,38	352,64
R30S10	378,16	307,40	12,37	13,41	4,27	4,60	394,80	325,41
R30S15	353,82	288,70	12,25	13,33	4,23	4,58	370,31	306,61
R50S0	433,09	341,20	9,11	9,57	7,32	7,69	449,52	358,46
R50S5	412,67	326,31	9,13	9,63	7,34	7,74	429,15	343,69
R50S10	387,90	300,74	9,06	9,37	7,29	7,53	404,25	317,64
R50S15	356,84	279,33	8,83	9,21	7,10	7,41	372,76	295,95

Tabela 17 - Resultados médios dos consumos de energia (MJ/m³) das argamassas.

Amostras	Cimento		Areia		RCC		Total	
	1:3	1:4	1:3	1:4	1:3	1:4	1:3	1:4
R0S0	949,74	756,42	281,06	298,47	0,00	0,00	1230,79	1054,89
R0S5	890,28	717,50	277,33	298,01	0,00	0,00	1167,61	1015,51
R0S10	834,09	676,79	274,26	296,72	0,00	0,00	1108,36	973,51
R0S15	774,92	627,18	269,79	291,14	0,00	0,00	1044,71	918,32
R30S0	915,35	744,50	189,62	205,63	68,13	73,44	1173,10	1023,57
R30S5	860,46	699,06	187,63	203,25	67,42	72,59	1115,51	974,90
R30S10	791,25	643,21	182,12	197,40	65,44	70,50	1038,81	911,10
R30S15	740,33	604,07	180,42	196,29	64,83	70,10	985,58	870,46
R50S0	906,19	713,93	134,09	140,85	112,14	117,80	1152,42	972,58
R50S5	863,47	682,78	134,49	141,79	112,48	118,59	1110,45	943,16
R50S10	811,63	629,25	133,44	137,94	111,60	115,37	1056,67	882,56
R50S15	746,64	584,47	129,97	135,66	108,71	113,46	985,32	833,58

Como pode ser observado, o cimento mostrou-se como o material que apresenta maior potencial de impacto ambiental em todas as amostras analisadas na fase de produção. Principal fonte de emissão de CO₂ na produção das argamassas, seu potencial de aquecimento global (GWP100) é responsável por, no mínimo, 95,4% e 93,8% das emissões totais nos traços 1:3 e 1:4, respectivamente. Paula (2016), atribuiu ao cimento 97% das emissões de dióxido de carbono nas argamassas contendo resíduo de concreto e Plaza et al., (2021) obteve 91,2% das emissões atreladas a este aglomerante. Portanto, os resultados obtidos neste trabalho e apresentados na Figura 21 corroboram com aqueles encontrados pelos autores supracitados.

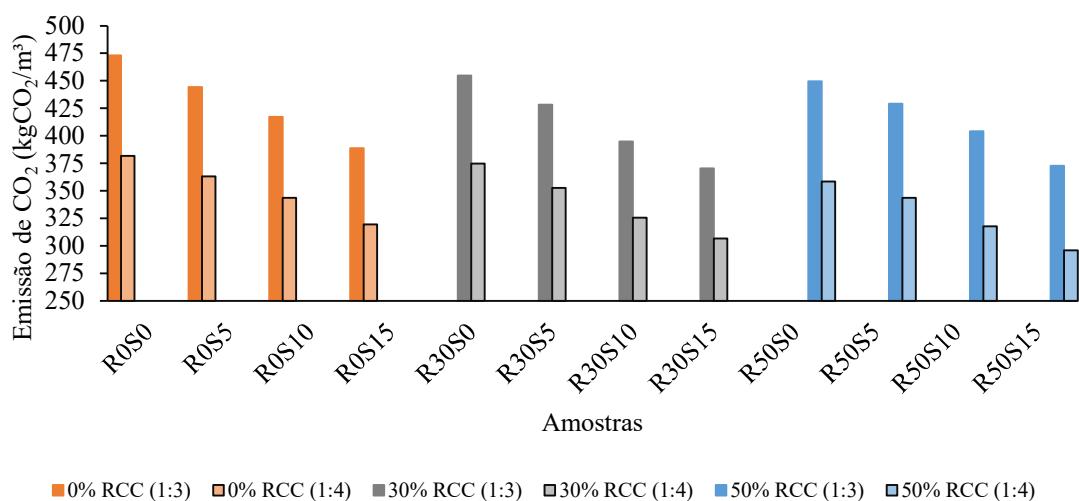


Figura 21 – Resultados médios das emissões de CO₂ das argamassas.

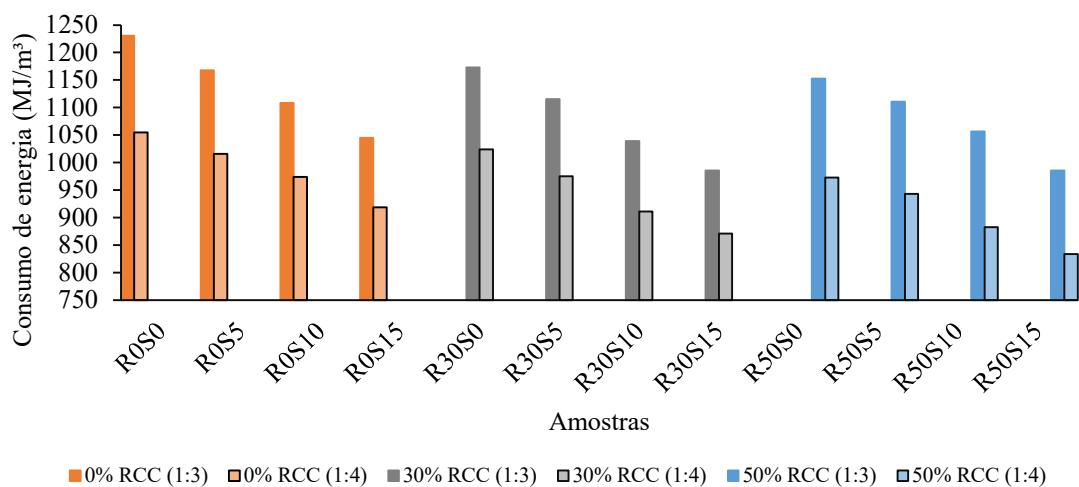


Figura 22 - Resultados médios do consumo de energia para produção das argamassas.

Os resultados médios para o consumo de energia para se produzir 1 metro cúbico das argamassas são apresentados na Figura 22. Comportamento semelhante ao apresentado para as emissões de CO₂ foi observado para o consumo de energia, onde o cimento continua a apresentar o maior consumo dentre os insumos de todas as amostras, sendo responsável por, no mínimo, 74% e 68% nos traços 1:3 e 1:4, respectivamente.

No que tange o uso isolado da areia reciclada, todas as argamassas formuladas apresentaram decréscimos de emissões totais e consumo de energia à medida que se aumenta o teor deste resíduo na mistura. Quanto às emissões de CO₂, as reduções foram inferiores a 6% e para o consumo de energia foi de no máximo 8%, conforme as Figuras 23 e 24.

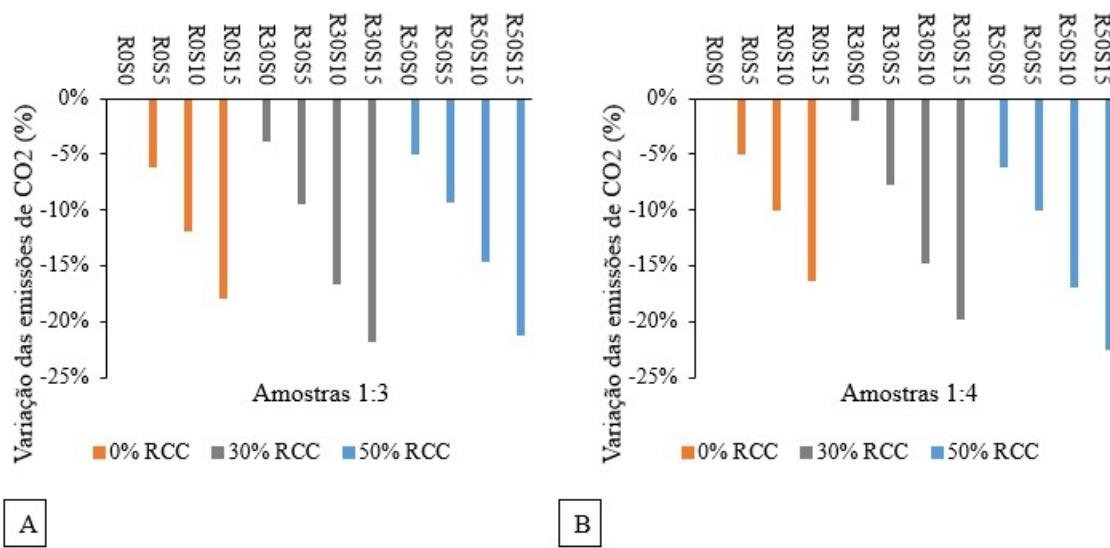


Figura 23 – Variação das emissões de CO₂ das argamassas. A) Traço 1:3. B) Traço 1:4.

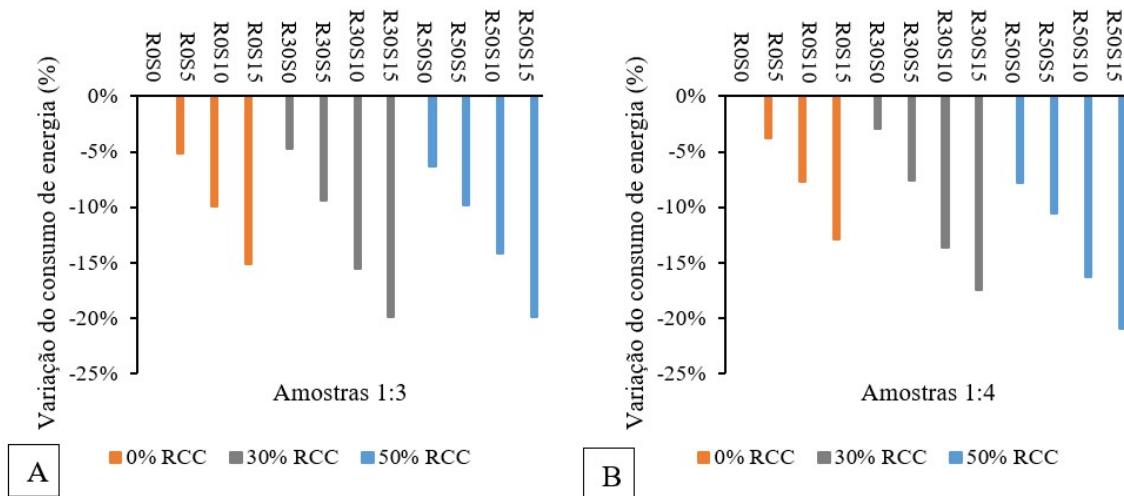


Figura 24 - Variação do consumo de energia das argamassas. A) Traço 1:3. B) Traço 1:4.

Percebe-se que os valores de emissões de CO₂ para os agregados natural e reciclado não variam muito entre si, com o resíduo sendo o de menor valor, logo, a maior influência se dá pela variação das quantidades destes materiais utilizados nas amostras (SUMITOMO et al., 2021). A redução do traço também exerce influência na redução das emissões totais de CO₂, uma vez que mais agregado na argamassa demanda mais água de amassamento e consequentemente o consumo de cimento é reduzido.

A emissão de CO₂ total e o consumo de energia também são minimizados à medida que se aumenta os teores de sílica e areia reciclada, alcançando reduções de até 22% e 21%, respectivamente, para as amostras R50S15. Como é o cimento que está sendo substituído, era de se esperar que isto ocorresse, já que é o material que tem a produção mais impactante. Por ser um subproduto da indústria do silício e seu impacto de produção ser contabilizado noutra cadeia produtiva, o impacto ambiental da sílica ativa neste processo deve ser considerado nulo, e por este motivo, haverá redução nas emissões de dióxido de carbono como também no consumo de energia (SUMITOMO et al., 2021; DONG, 2018).

A ecoeficiência da produção de 1 metro cúbico das argamassas foi avaliada tanto para as emissões de CO₂ quanto para o consumo de energia, correlacionando estas com a resistência à compressão obtida dos corpos de prova prismáticos. Os resultados médios são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Relação entre impactos ambientais e resistência à compressão das argamassas.

Amostras	Resistência à compressão (MPa)		kg CO _{2eq} / MPa		MJ/ MPa	
	1:3	1:4	1:3	1:4	1:3	1:4
R0S0	24,2	17,8	19,5	21,4	50,8	59,2
R0S5	16,6	19,3	26,7	18,8	70,1	52,6
R0S10	16,1	17,3	25,8	19,9	68,6	56,3
R0S15	26,7	18,2	14,6	17,6	39,1	50,5
R30S0	20,2	12,3	22,6	30,4	58,2	83,0
R30S5	17,3	15,9	24,8	22,1	64,6	61,1
R30S10	23,9	12,0	16,5	27,2	43,5	76,1
R30S15	22,3	11,5	16,6	26,6	44,1	75,5
R50S0	18,0	10,5	25,0	34,1	64,1	92,5
R50S5	19,0	12,2	22,6	28,2	58,5	77,5
R50S10	21,3	10,1	19,0	31,5	49,7	87,5
R50S15	14,7	6,8	25,4	43,3	67,1	122,0

Considerando os impactos ambientais causados pela emissão de CO₂ e consumo de energia das argamassas, as de menores impactos na produção foram as amostras R0S15, tanto para o traço 1:3 quanto 1:4, com reduções inferiores de 25% e 18% frente às de referência, respectivamente. Atribui-se este comportamento ao fato destas amostras terem um dos menores consumos de cimento, elemento mais representativo de impacto ambiental, pelo alto teor de sílica, e ainda assim desenvolvido elevadas resistências, justificando os melhores resultados.

Nas argamassas do traço 1:4, os maiores impactos ambientais foram vistos para todas as amostras que substituíram 50% da areia natural pela reciclada. Estas argamassas apresentaram as menores resistências à compressão em função da maior necessidade de água na mistura, o que acarretou no elevado impacto ambiental. O agregado reciclado não exerceu tanta influência nos resultados, uma vez que seus valores de emissão de CO₂ e consumo de energia são bem próximos ao do natural.

Comparando os dois traços principais desta pesquisa, a argamassa R0S15 de proporção 1:3 (em massa) apresentou menor impacto ambiental que a 1:4 (em massa). Isso mostra que a utilização de argamassas com maiores resistências à compressão, apesar dos materiais indicarem maiores impactos ambientais, tendem a apresentar menores impactos por unidade de MPa.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. CONCLUSÕES

O objetivo principal desta dissertação foi avaliar o efeito da substituição parcial do cimento por sílica ativa no comportamento físico-mecânico e ambiental de argamassas de revestimentos com agregados reciclados de concreto. Este estudo permitiu ampliar o entendimento da interação da sílica com a areia reciclada, como também permitiu que os objetivos do estudo fossem alcançados.

O aspecto rugoso, forma angular, baixa densidade e alta absorção de água do RCC impacta na reologia das argamassas, influenciada também pela elevada superfície específica da sílica. O agregado reciclado utilizado possui massa específica inferior à do natural e maior porosidade. Quanto maior o teor destes materiais nas misturas, maior foi a quantidade de água necessária para atingir a consistência padrão. Assim, reduziu a densidade de massa no estado fresco e endurecido e a capacidade de retenção de água das argamassas. O aumento do teor de SA incorporada minimizou estes efeitos devido seu efeito microfiler.

Observou-se também que o aumento da quantidade de agregado reciclado nas misturas reduziu o módulo de elasticidade e aumentou o coeficiente de absorção capilar das argamassas aos 28 dias, sendo potencializadas com a redução do traço. Isso ocorre devido ao aumento da relação água/cimento e da alta capacidade de absorção de água RCC. A incorporação da sílica ativa atenuou estes efeitos devido seu efeito microfiler, densificando o esqueleto granular das argamassas. A substituição de 15% de sílica foi capaz de reduzir em até 41% o coeficiente de absorção capilar das argamassas.

A resistência à tração na flexão das argamassas foi maior na argamassa com uso de 50% de agregado reciclado, sem sílica, para o traço de proporção 1:3, em massa. Este fato se deve a presença de grãos de cimento a hidratar presente no agregado reciclado. Para a proporção 1:4, em massa, os melhores resultados foram atingidos nas amostras contendo 5% de sílica ativa, justificados pela maior densidade da amostra proporcionada pela ação física da sílica.

Considerando o impacto ambiental para produção de 1m³ dos traços analisados, o cimento é o material que mais causa danos ao meio ambiente, sendo responsável por 93% das emissões de CO₂ e 68% do consumo energético. O uso do agregado reciclado foi capaz

de promover reduções de 6% na emissão de dióxido de carbono e 8% no consumo de energia frente à argamassa de referência. Diante disso, observa-se que o uso da areia reciclada não promove grandes reduções, o que já era de se esperar em razão dos valores de emissão de CO₂ e consumo de energia destes materiais não serem tão distintos, o que leva a conclusão que a maior redução se dará pela maior quantidade de resíduo utilizada. A incorporação da sílica reduziu em 22% as emissões de CO₂ e 21% o consumo de energia, diferença justificada pela menor quantidade de cimento nas misturas, já que a sílica tem seus impactos contabilizados noutra cadeira produtiva.

As amostras de menor impacto ambiental para produzir 1m³ de argamassa foram as R30S15 e R50S15 para os traços de proporção 1:3 e 1:4, em massa. No entanto analisando o impacto para produção de uma argamassa que desenvolva 1 MPa de resistência à compressão, nestes traços principais, as amostras R0S15 foram as que apresentaram maiores resistências, logo, apresentaram os menores impactos ambientais de seus respectivos traços. No geral, a argamassa que apresentou o menor impacto para produzir 1 MPa foi a amostra do traço 1:3.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho avaliou o efeito da substituição parcial do cimento por sílica ativa no comportamento físico-mecânico e ambiental de argamassas de revestimentos com agregados reciclados de concreto. Neste trabalho, o sistema de produto teve suas fronteiras definidas como do “portão ao portão”, ou seja, somente os processos de produção das argamassas foram considerados.

Como recomendação para trabalhos futuros, sugere-se avaliar a influência da sílica ativa nas argamassas com resíduo de concreto em idades mais avançadas, para então analisar os impactos ambientais conforme o aumento da resistência à compressão e a relação de impacto por MPa e criar uma possível correlação.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados para concreto – Especificação. NBR 7211. Rio de Janeiro. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados - Determinação da composição granulométrica. NBR NM 248. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. NBR 16972. Rio de Janeiro. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. NBR 16916. Rio de Janeiro. 2021.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. NBR 15630. Rio de Janeiro. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. NBR 15259. Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios. NBR 16541. Rio de Janeiro. 2016.

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. NBR 7215. Rio de Janeiro. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega. NBR 16607. Rio de Janeiro. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). NBR 11579. Rio de Janeiro. 2012.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). NBR 16372. Rio de Janeiro. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 1: Requisitos. NBR 13956-1. Rio de Janeiro. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 2: Ensaios químicos. NBR 13956-2. Rio de Janeiro. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. NBR 14.040, Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. NBR 14.044, Rio de Janeiro, 2009.

ABRELPE, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos resíduos sólidos no brasil. Brasília, 2021.

ABRAINC, Associação Brasileira de Incorporadoras Imobiliárias. Relatório Anual 2021. São Paulo, 2021.

ALVES, L.A., 2012, Influência de Agregados Miúdos Reciclados de Argamassas no Comportamento Mecânico de Argamassas de Cimento Portland. Projeto de Graduação, Escola Politécnica/ UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

BARRA, A. T. P. Caracterização física e mecânica de argamassas não estruturais com agregados finos reciclados. Dissertação (Mestrado). Universidade de Lisboa. Lisboa, 2011.

BAÍA, L. L. M; SABBATINI, F. H. Projeto e execução de revestimento de argamassa – São Paulo: O nome da rosa, 4 Ed, 2008. (coleção primeiros passos da qualidade no canteiro de obras – ISBN 85-86872-06-7).

BLENGINI, G. A. “Life cycle of buildings, demolition and recycling potential: A case study in Turin, Italy”. Building and Environment, v.44, pp. 319-330. 2009.

BOVEA, M. D.; POWELL, J. C., 2016 Developments in life cycle assessment applied to evaluate the environmental performance of construction and demolition wastes. Waste Management, 50 (2016), 151-172.

CABRAL, A. E. B. Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCC. 2007. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos.

CABRAL, A. E. B et al. Determinação da influência do tipo de agregado reciclado de resíduo de construção e demolição sobre o módulo de deformação de concretos produzidos com agregados reciclados. In: IBRACON, v. 1, p. 171-192 2008.

CALCADO, G. C. S. Influência da adição de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho de argamassas de cimento Portland. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

CARASEK, H.; GIRARDI, A. C. C.; ARAÚJO, R. C.; ANGELIM, R.; CASCUDO, O. Estudo e avaliação de agregados reciclados de resíduo de construção e demolição para argamassas de assentamento e de revestimento. Cerâmica, v. 64, p. 288-300, 2018.

COELHO, J. F. M. Análise do ciclo de vida de argamassas com resíduos de madeira. Dissertação (Mestrado). Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2019.

CALDAS, L. R.; SPOSTO, R. M. Emissões de CO₂ referentes ao transporte de materiais de construção no Brasil: estudo comparativo entre blocos estruturais cerâmicos e de concreto. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 91-108, out./dez. 2017.

CALDAS, L. R.; SPOSTO, R. M.; CARVALHO, M. T. M. Emprego do SINAPI para quantificação de emissões de CO₂: estudo de caso para o chapisco em uma habitação unifamiliar. In: *encontro nacional de tecnologia do ambiente construído*, 16., 2016, São Paulo. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2016.

CALDAS, L. R.; FILHO, R. D. T. Avaliação do ciclo de vida de materiais cimentícios utilizados no Brasil: estudo para argamassas, graute e bloco de concreto. *R. Latino-americano em avaliação do ciclo de vida*, Brasília, v. 2, n. 2, p. 34-61, jul./dez. 2018.

CORRÊA, C. A. R. (2019) Influência das frações granulométricas de agregados miúdos no comportamento de argamassas de cimento. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD-002A/19, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 246 p.

ÇAKIR, Ö. Experimental analysis of properties of recycled coarse aggregate (RCA) concrete with mineral additives. *Construction and Building Materials*, v. 68, p. 17–25, 2014. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061814006515>>. Acesso em: 6/11/2014.

DE PAULA, R. R. Avaliação do ciclo de vida (acv) de argamassas e concretos produzidos com resíduos de construção e demolição (RCD). Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

DIEESE, Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Socioeconômicos. *A Construção Civil e os Trabalhadores: panorama dos anos recentes*, nº 95. São Paulo, 2020.

DILBAS, H.; ŞİMŞEK, M.; ÇAKIR, Ö. An investigation on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete (RAC) with and without silica fume. *Construction and Building Materials*, v. 61, n. March 2006, p. 50–59, 2014. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061814002207>>.

DONG, Y. Performance assessment and design of ultra-high performance concrete (UHPC) structures incorporating life-cycle cost and environmental impacts. *Construction and Building Materials*, v. 167, p.414–425, abr. 2018.

EVANGELISTA, L. et al. Physical, chemical and mineralogical properties of fine recycled aggregates made from concrete waste. *Construction and Building Materials*, v. 86, p. 178–188, 2015.

GOEDKOOP, M., OLE, M., LEIJTING, J., PONSIOEN, T., MEIJER, E. introduction to LCA with SimaPro. Pre Sustainability. 2013. Disponível em: <https://www.presustainability.com/>.

GARBALIŃSKA H., WYGOCKA A, (2014), Microstructure modification of cement mortars: Effect on capillarity and frost-resistance, *Construction and Building Materials* 51, pp. 258-266.

KRUGER, P.; CABRAL, L. A.; SOUZA, V. F. C. Confecção de argamassa utilizando areia residual do processo de fundição. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 5, p. 45-63, 2013.

LEITE, M.B. Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. 2001. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2001.

LEDESMA, E. F. et al. Properties of masonry mortars manufactured with fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 71, p. 289–298, 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 2^a Ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MEDEIROS, M. L., MACHADO, D. F. C., PASSADOR, J. L., & PASSADOR, C. S. (2012). Adoção da certificação LEED em meios de hospedagem: esverdeando a hotelaria? *RAE - Revista de Administração de Empresas*, 52(2), 179-192.

MACHADO, V. C.; CRUZ, W. S.; CORDEIRO, L. N. P. Efeito Da Sílica Ativa Em Argamassas De Chapisco Com Amrc. *Xiii Simpósio Brasileiro De Tecnologia Das Argamassas – Sbta*, P. 750-758, 2019.

MORALES, M. M., ZAMORANO M., MOYANO A. R, ESPINOSA, V. Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08. *Cement and Building Materials*. nº 25, pp. 742-748, 2011.

MELO, F. C. A. C. Análise de argamassas com substituição parcial do cimento portland por cinza residual de lenha de algaroba. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

MARTÍNEZ, I. et al. A comparative analysis of the properties of recycled and natural aggregate in masonry mortars. *Construction and Building Materials*, v. 49, p. 384–392, 2013.

OLTULU, M., SAHIN, R, (2014). Pore structure analysis of hardened cement mortars containing silica fume and different nano-powders, *Construction and Building Materials* 53, pp. 658–664.

PIMENTEL, M. G.; CHAVES, P. S.; MOREIRA, V. A.; CORDEIRO, L. N. P.; SOUZA, P. S. L. Avaliação dos efeitos da substituição parcial do cimento por sílica ativa nas propriedades de argamassas. In: XIV Congresso Latino-Americano de Patología de Construcción, 2017, Asunción. XIV Congreso Latino-Americano De Patología De Construcción, 2017.

PIMENTEL, M. G.; MARTINS, W. S.; MEDEIROS, M. G.; PICANÇO, M. S.; NETO P. B. B.; MACÊDO, A. N. Avaliação da Substituição do cimento por sílica ativa em argamassas com agregado reciclado de concreto (ARC). In: 23º Congresso brasileiro de engenharia e ciência dos materiais, 2018, Foz do Iguaçu.

PEDROZO, R. F. E. Influência Da Substituição Do Agregado Miúdo Natural Por Agregado Reciclado Fino Em Propriedades De Argamassas E Concretos. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal De Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

PACHECO-TORGAL, F.; TAM, V.; LABRINCHA, J. A.; DING, Y.; DE BRITO, J. *Handbook of recycled concrete and demolition waste*. 2^a ed. Oxford: [s.n.], 2013.

PIGNATELLI I., KUMAR A., FIELD K G., WANG B., YU Y., PAPE Y L., BAUCHY M., SANT G. (2016), Direct experimental evidence for differing reactivity alterations of minerals following irradiation: the case of calcite and quartz, *Scientific Reports* 665, pp. 1-10, a.

QING Y., ZENAN Z., DEUY K., RONGSHEN. (2007), Influence of Nano-SiO₂ Addition on Properties of Hardened Cement Paste as Compared with Silica Fume, *Construction and Building Materials* 21, pp 539-545.

QING Y., ZENAN Z., LI S., CHEN R. (2006), A comparative study on the pozzolanic activity between nano-SiO₂ and silica fume, Journal of Wuhan University of Technology Materials Science Edition 21, pp. 153-157.

RAHMAN A. A., ABO-EL-ENEIN A S., ABOUL-FETOUH M., SHEHATA K. (2016), Characteristics of Portland blast-furnace slag cement containing cement kiln dust and active silica, Arabian Journal of Chemistry 9, pp. 138-143.

SNIC, Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. Relatório Anual 2020. São Paulo, 2020

SILVA, L. C. Avaliação de ciclo de vida de concretos com substituição parcial de cimento por cinzas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

SIDDIQUE R., CHAHAL N. (2011). Use of silicon and ferrossilicon industry by-products (silica fume) in cement paste and mortar. Resources, Conservation and Recycling 55, pp. 739–744.

STARLING, Tadeu. RIBEIRO, C.C. PINTO, J.C.S.; Materiais de construção civil. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2006.

Tsai C. H., Huang R., Lin W. T., Wang H N. (2014), Mechanical and cementitious characteristics of ground granulated blast furnace slag and basic oxygen furnace slag blended mortar, Materials and Design 60, pp. 267-273.

VÁZQUEZ, E. Recycling of aggregates in Spain. International Workshop on Recycled Aggregate. Proceedings. Niigata, Japan. pp. 27-41, 2000.

VASKE, N. R.; CAMPAGNOLO, J. L.; DAL MOLIN, D. C. C. Relação entre a resistência à compressão da argamassa com adição de sílica ativa aplicada ao substrato e àquela obtida em corpos-de-prova cilíndricos normatizados. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 3, p. 322-345, 2010.

Wada, P. H.; Estudo da incorporação de resíduos de cerâmica vermelha na composição de concreto para uso em estacas moldadas in loco, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, 108 p, 2010.

Zhang Z., Zhang B., Yan P. (2016), Comparative study of effect of raw and densified silica fume in the paste, mortar and concrete, Construction and Building Materials 105, pp. 82-93.

7. APÊNDICES

7.1. Apêndice A - Traços unitários das argamassas formuladas.

Tabela 19 - Traço unitário e espalhamento das argamassas. Traço 1:3 (em massa).

Amostras	Cimento	Sílica	AMN	AMRC	a/c	E. (mm)
R0S0	1,00	0,00	3,00	0,00	0,51	259
R0S5	0,95	0,05	3,00	0,00	0,54	261
R0S10	0,90	0,10	3,00	0,00	0,60	256
R0S15	0,85	0,15	3,00	0,00	0,67	255
R30S0	1,00	0,00	2,10	0,83	0,59	257
R30S5	0,95	0,05	2,10	0,83	0,64	255
R30S10	0,90	0,10	2,10	0,83	0,73	255
R30S15	0,85	0,15	2,10	0,83	0,58	255
R50S0	1,00	0,10	1,50	1,38	0,57	254
R50S5	0,95	0,05	1,50	1,38	0,61	252
R50S10	0,90	0,10	1,50	1,38	0,67	251
R50S15	1,00	0,00	3,00	0,00	0,51	248

RaSb (a: teor de RCC; b: teor de sílica ativa)

Tabela 20 - Traço unitário e espalhamento das argamassas. Traço 1:4 (em massa).

Amostras	Cimento	Sílica	AMN	AMRC	a/c	E. (mm)
R0S0	1,00	0,00	4,00	0,00	0,63	260
R0S5	0,95	0,05	4,00	0,00	0,66	257
R0S10	0,90	0,10	4,00	0,00	0,70	253
R0S15	0,85	0,15	4,00	0,00	0,80	255
R30S0	1,00	0,00	2,80	1,10	0,67	256
R30S5	0,95	0,05	2,80	1,10	0,73	258
R30S10	0,90	0,10	2,80	1,10	0,85	258
R30S15	0,85	0,15	2,80	1,10	0,91	258
R50S0	1,00	0,10	2,00	1,84	0,73	263
R50S5	0,95	0,05	2,00	1,84	0,78	259
R50S10	0,90	0,10	2,00	1,84	0,85	256
R50S15	0,85	0,15	2,00	1,84	1,01	256

RaSb (a: teor de RCC; b: teor de sílica ativa)

7.2.Apêndice B – Consumo de materiais por metro cúbico das argamassas formuladas.

Tabela 21 – Consumo de materiais para produção de 1m³ de argamassa. Traço 1:3.

Amostras	Cimento (kg)	Sílica (kg)	AMN (kg)	AMRC (kg)	Água (kg)
R0S0	500,99	0,00	1502,98	0,00	253,75
R0S5	469,63	24,72	1483,04	0,00	260,72
R0S10	439,99	48,89	1466,64	0,00	265,99
R0S15	408,78	72,14	1442,74	0,00	275,10
R30S0	482,86	0,00	1014,00	400,77	279,96
R30S5	453,90	23,89	1003,36	396,57	284,68
R30S10	417,39	46,38	973,92	384,93	302,92
R30S15	390,53	68,92	964,84	381,34	306,68
R50S0	478,03	47,80	717,04	659,67	265,77
R50S5	455,49	23,97	719,20	661,66	282,31
R50S10	428,14	47,57	713,57	656,49	285,10
R50S15	393,86	69,50	695,05	639,44	300,90

RaSb (a: teor de RCC; b: teor de sílica ativa)

Tabela 22 - Consumo de materiais para produção de 1m³ de argamassa. Traço 1:4.

Amostras	Cimento (kg)	Sílica (kg)	AMN (kg)	AMRC (kg)	Água (kg)
R0S0	399,02	0,00	1596,08	0,00	251,65
R0S5	378,49	19,92	1593,63	0,00	250,43
R0S10	357,01	39,67	1586,72	0,00	251,32
R0S15	330,84	58,38	1556,90	0,00	263,08
R30S0	392,73	0,00	1099,64	432,00	263,67
R30S5	368,76	19,41	1086,88	426,99	269,91
R30S10	339,30	37,70	1055,59	414,70	288,69
R30S15	318,65	56,23	1049,67	412,37	290,45
R50S0	376,61	37,66	753,21	692,95	276,02
R50S5	360,17	18,96	758,25	697,59	286,00
R50S10	331,94	36,88	737,64	678,63	303,22
R50S15	308,31	54,41	725,44	667,40	312,59

RaSb (a: teor de RCC; b: teor de sílica ativa)