



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
IFCE *CAMPUS* FORTALEZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA E GESTÃO AMBIENTAL
MESTRADO ACADÊMICO EM TECNOLOGIA E GESTÃO AMBIENTAL

JOANA MARIA DE SOUZA RIBEIRO

**ANÁLISE DO DESEMPENHO AMBIENTAL DE ARGAMASSAS HISTÓRICAS
CEARENSES**

FORTALEZA
2021

JOANA MARIA DE SOUZA RIBEIRO

ANÁLISE DO DESEMPENHO AMBIENTAL DE ARGAMASSAS HISTÓRICAS
CEARENSES

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado Acadêmico em Tecnologia e Gestão Ambiental do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - *Campus* Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestra em Tecnologia e Gestão Ambiental. Área de concentração: Instrumentos de Gestão Ambiental.

Orientador: Prof. Titular Dr. Adeildo Cabral da Silva

Coorientador: Prof Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI

Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

RIBEIRO, JOANA MARIA DE SOUZA.

ANÁLISE DO DESEMPENHO AMBIENTAL DE ARGAMASSAS HISTÓRICAS
CEARENSES / JOANA MARIA DE SOUZA RIBEIRO. - 2021.

74 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Tecnologia e Gestão
Ambiental, Campus Fortaleza, 2021.

Orientação: Prof. Dr. Adeildo Cabral da Silva .

Coorientação: Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita.

1. Argamassas históricas. 2. Análise química. 3. Reconstituição. 4. Impactos ambientais.
I. Título.

CDD 628



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
Av. 13 de maio, 2081 , - Bairro Benfica - CEP 60040-531 - Fortaleza - CE - www.ifce.edu.br

AVALIAÇÃO

Processo: 23256.008477/2021-70

Interessado: Adeildo Cabral da Silva

FOLHA DE APROVAÇÃO

JOANA MARIA DE SOUZA RIBEIRO

ANÁLISE DO DESEMPENHO AMBIENTAL DE ARGAMASSAS HISTÓRICAS CEARENSES

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - Campus Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental. Área de concentração: Gestão e Saneamento Ambiental.

Aprovada em: 30/09/2021



Documento assinado eletronicamente por **Marisete Dantas de Aquino, Usuário Externo**, em 04/10/2021, às 07:46, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Teresa Raquel Lima Farias, Professor(a) do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico**, em 04/10/2021, às 17:33, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Adeildo Cabral da Silva, Professor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico**, em 13/10/2021, às 20:53, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade do documento pode ser conferida no site https://sei.ifce.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 informando o código verificador **3010641** e o código CRC **B8547519**.

Ao meu filho Bernardo.

“O Senhor é meu Pastor, nada me faltará”

Salmo 23

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho não seria possível sem a colaboração e incentivo de uma rede de apoio pessoal e profissional a quem serei eternamente grata.

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Rossana e Admilson por sempre acreditarem e me incentivarem a ir além. É por vocês que nunca desisti de cada novo desafio e dificuldade que apareceu ao longo dessa jornada. Ao meu irmão José por me apoiar em todas as situações e ser um porto seguro quando precisei. A minha prima e irmã de coração, Cristiany, por toda ajuda e doação aos cuidados com meu filho quando precisei me ausentar para me dedicar a escrita ou atividades. A Dona Régia, que por seu amor incondicional, representou a força que eu precisava para seguir, progredir e caminhar em busca do meu objetivo. Ao meu companheiro de vida, Gustavo, que na fase final, foi meu maior incentivador,

Agradeço e dedico este trabalho ao meu filho Bernardo. É por você e para você essa vitória. Meu combustível diário, meu companheiro em todos os momentos e minha razão para sempre seguir!

Agradeço ao meu orientador, prof Adeildo Cabral por tornar a finalização deste trabalho possível. Sua experiência, ensinamentos e conselhos sempre serão lembrados e aplicados na minha vida pessoal e profissional.

Agradeço ao meu Coorientador, prof Esequiel Mesquita, por me acolher no início da dissertação, montar junto comigo a base que me levaria ao desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

Agradeço aos amigos do PGTGA, em especial a Adrya Albuquerque, Priscila Karine e Lia Teles por toda colaboração nas pesquisas e atividades inerentes ao programa.

Agradeço ao fomento da CAPES com a bolsa de mestrado e apoio a pesquisa.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental, em nome da sua coordenação e professores, pela formação e suporte no desenvolver deste mestrado.

RESUMO

A recuperação estrutural em edifícios históricos deve ser feita com o objetivo de manter suas características originais, logo, a busca de técnicas mais apuradas para proceder tais reparos é necessária. Dessa forma, o presente trabalho analisou quimicamente três argamassas coletadas nas cidades de Sobral, Icó e Fortaleza, no estado do Ceará escolhidas por abrigarem relevantes sítios históricos. Tal análise, utilizou o método do IPT para reconstituição de argamassas, que consiste em proceder ataque com ácido clorídrico nas amostras de origem para formar duas frações distintas: uma solúvel que constitui os aglomerantes utilizados e a insolúvel que representa os agregados se tratarmos de uma argamassa com agregado quartzoso. Ainda, a fração solúvel expressa os valores na forma dos óxidos: anidrido silícico (SiO_2), óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio (MgO) e óxidos de ferro e alumínio (R_2O_3). A relação aglomerante: agregado das três cidades analisadas apresenta valores baixos, ou seja, trata-se de argamassas pobres. As porcentagens de resíduos inorgânicos encontradas em Icó, Sobral e Fortaleza, respectivamente, são de 78,8%, 93,58% e 85,19%. Os teores de SiO_2 encontrados apresentam valores relativos abaixo de 1%, os valores referentes a MgO são 4,36%, 1,64% e 0,45% e CaO são 13,18%, 1,80% e 0,28% para Icó, Sobral e Fortaleza, respectivamente. Este resultado converge com as argamassas em estudo uma vez que os constituintes para sua produção no século XIX, segundo a literatura, são cal, água e areia quartzosa. O cimento ainda não era utilizado no Brasil, logo a presença de SiO_2 pode ser relativa a alguma adição que contenha sílica em seu constituinte. Foi realizada no estudo Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) de caráter comparativo entre 30 cenários, variando teores de areia, agregado reciclado de Resíduo de Construção e Demolição (RCD), cimento e cal na mistura. A relação água/ aglomerante foi mantida. O software utilizado foi o SimaPro e a base de dados do inventário Ecolnvent. Dos resultados encontrados, percebe-se que o transporte do RCD é preponderante no desempenho ambiental e necessita ser ponderado quando for feita a escolha do material. Ainda, o consumo de água de amassamento não influencia nos impactos gerais do compósito. O cimento deve ser excluído dos traços por não fazer parte da composição do substrato e piorar o desempenho ambiental dos compósitos.

Palavras-chave: Argamassas históricas. Análise química. Reconstituição. Impactos ambientais.

ABSTRACT

Structural recovery in historic buildings must be carried out in order to maintain their original characteristics, therefore, the search for more refined techniques to carry out such repairs is necessary. Thus, the present work chemically analyzed three mortars collected in the cities of Sobral, Icó and Fortaleza, in the state of Ceará, chosen for sheltering relevant historical sites. This analysis used the IPT method for reconstitution of mortars, which consists of attacking with hydrochloric acid, the samples originate to form two distinct fractions: a soluble one that constitutes the binders used and an insoluble one that represents the aggregates if we are dealing with a mortar with aggregate Quarsozo. Furthermore, the soluble fraction expresses the values in the form of oxides: silicic anhydride (SiO_2), calcium oxide (CaO), magnesium oxide (MgO) and iron and aluminum oxides (R_2O_3). The binder: aggregate ratio of the three cities analyzed has low values, that is, they are poor mortars. The percentage of inorganic waste found in Icó, Sobral and Fortaleza, respectively, are 78.8%, 93.58% and 85.19%. The SiO_2 contents found show relative values below 1% and the values for MgO 4.36%, 1.64% and 0.45% and CaO 13.18%, 1.80% and 0.28% for Icó, Sobral and Fortaleza, respectively, are found in parallel with the mortar under study since the constituents for its production in the 19th century, according to the literature, are lime, water and quartz sand. Cement was not yet used in Brazil, so the presence of SiO_2 may be related to some addition that contains silica in its constituent. The LCA carried out in the study was comparative in character between 30 scenarios varying the contents of sand, RCD, cement and lime in the mixture. The water:binder ratio was maintained. The software used was SimaPro and the EcolInvent inventory database. From the results found, it is clear that the transport of CDW is preponderant in environmental performance and needs to be considered when choosing the material. Also, the consumption of mixing water does not influence the overall impacts of the composite. Cement must be excluded from the traces as it is not part of the substrate composition and worsens the environmental performance of the composites.

Keywords: Historic grouts. Chemical analysis. Reconstitution. Environmental impacts.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Evolução do uso da cal aérea, cal hidráulica e cimento como aglomerante	17
Figura 2- Estrutura e aplicações diretas da ACV.....	26
Figura 3 – Etapas metodológicas da pesquisa.....	28
Figura 4 - Cidades que abrigam edificações em estudo	30
Figura 5 - Edificação em estudo na cidade de Sobral (CE).....	31
Figura 6 - Igreja Nossa Senhora da Conceição do Monte em Icó (CE).....	32
Figura 7 - Estação Ferroviária Dr João do Monte (CE)	33
Figura 8 - Estação Ferroviária Dr João Felipe após sua inauguração.....	33
Figura 9 - Andamento Principal (I).....	36
Figura 10 - Andamentos II e III	37
Figura 11 - Amostras separadas e pesadas para início de ensaios	38
Figura 12 - Etapas do processo experimental desenvolvido em laboratório	38
Figura 13 - Fluxogramas simplificados do processo de produção de argamassas históricas	44
Figura 14 – Análise de contribuição cenário base argamassas com areia.....	57
Figura 15 - Análise de contribuição cenário base argamassas com RCD	59
Figura 16 - Categoria de impacto aquecimento global	61
Figura 17 - Categoria de impacto depleção da camada de ozônio	62
Figura 18 - Categoria de impacto acidificação terrestre	63
Figura 19 - Categoria de impacto eutrofização de água doce	64
Figura 20 - Categoria de impacto escassez dos recursos minerais	65
Figura 21 - Categoria de impacto escassez dos recursos fósseis.....	66
Figura 22 - Categoria de impacto consumo de água.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Organização de cenários por teores para a cidade de Icó	42
Tabela 2 – Inventários base EcolInvent	45
Tabela 3 - Unidades de avaliação das categorias de impacto	46
Tabela 4 - Resultados Análise Química Icó.....	47
Tabela 5 - Teores segundo método IPT Icó	48
Tabela 6 - Resultados Análise Química Sobral	49
Tabela 7 – Teores segundo método IPT Icó	50
Tabela 8 – Resultados Análise Química Fortaleza.....	51
Tabela 9 - Resultados Teores Materiais Fortaleza.....	51
Tabela 10 - Traço segundo método IPT Icó	52
Tabela 11 - Traço de argamassa com um aglomerante Icó	52
Tabela 12 - Resultados Teores Materiais Icó.....	53
Tabela 13 - Resultados Teores Materiais Sobral	54
Tabela 14 - Traço de argamassa com um aglomerante Sobral.....	54
Tabela 15 - Resultados Teores Materiais Sobral	55
Tabela 16 - Resultados Teores Materiais Fortaleza.....	55
Tabela 17 - Traço de argamassa com um aglomerante Fortaleza.....	55
Tabela 18 - Resultados Teores Materiais Fortaleza.....	56

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Análise do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida
CaO	Óxido de Cálcio
CO ₂	Dióxido de Carbono
CFC	Cloro Flúor Carboneto
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPHAN	Instituto do Patrimônio Histórico Artístico e Cultural
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
HCl	Ácido Clorídrico
HNO ₃	Ácido Nítrico
MgO	Óxido de Magnésio
NBR	Norma Brasileira
ISO	Organização Internacional de Normalização
NV	Não Volátil
P	Fósforo
R ₂ O ₃	Óxido de Ferro e Alumínio
RCD	Resíduos Sólidos da Construção
RI	Resíduo Inorgânico
SiO ₂	Dióxido de Silício

LISTA DE SÍMBOLOS

™	Marca comercial
®	Marca registrada
©	<i>Copyright</i>
%	Porcentagem

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	15
2.1 Objetivo geral	15
2.2 Objetivos específicos	15
3 ReFERENCEIAL TEÓRICO	16
3.1 Reconstituição de argamassas históricas	16
3.2 Patrimônio histórico das cidades em estudo	20
3.3 Argamassas com adição de Resíduo de construção e demolição	21
3.4 Análise do ciclo de vida de argamassas	24
4 METODOLOGIA.....	28
4.1 Organograma da pesquisa.....	28
4.2 Natureza da pesquisa	29
4.3 Reconstituição de argamassas	29
4.3.1 Áreas de estudo.....	29
4.3.2 Coleta das amostras	34
4.3.3 Procedimentos laboratoriais	34
4.4 Elaboração de traços	38
4.4.1 Método de cálculo IPT	39
4.4.2 Definição de metodologia de elaboração de traços na pesquisa	40
4.5 Avaliação do Ciclo de Vida	43
5 RESULTADOS E DISCURSSÃO	47
5.1 Reconstituição de argamassas	47
5.1.1 Caracterização Química das Amostras de Icó	47
5.1.2 Caracterização Química das Amostras de Sobral	49

5.1.3 Caracterização Química das Amostras de Fortaleza.....	50
5.2 Elaboração de traços	52
5.2.1 Traço de argamassa Icó	52
5.2.2 Traço de argamassa Sobral.....	54
5.2.3 Traço de argamassa Fortaleza	55
5.3 Avaliação do ciclo de vida	56
5.3.1 Análise de contribuição.....	57
5.3.2 Análise comparativa.....	60
6 CONCLUSÃO.....	68
REFERÊNCIAS	71

1 INTRODUÇÃO

A recuperação estrutural em edifícios históricos deve ser feita com o objetivo de manter suas características originais. Dessa forma, a academia deve investir em busca de técnicas mais apuradas para proceder tais reparos a fim de garantir segurança e bem-estar a quem utiliza a edificação (PUCCIONI, 1997).

Segundo Cajado (2016), a ação de agentes climáticos e uso da edificação contribuem para o processo de degradação natural da edificação. A manutenção preventiva ajuda no processo de conservação do edificado, mas não pode interromper por completo o seu processo de deterioração ao longo do tempo. Logo, eventualmente, pode-se afirmar que todas as construções precisarão passar por ações de reabilitação em algum momento da sua vida útil.

Em geral, as operações de manutenção em edifícios antigos são insuficientes ou até mesmo inexistentes porque os proprietários não sabem avaliar o impacto que uma manutenção adequada proporcionará no valor do imóvel. Atrelado a tal realidade, o centro urbano das grandes cidades brasileiras, que reúne a maior parte de seu patrimônio cultural e, geralmente, onde estão localizadas as edificações mais antigas, nas últimas décadas, sofreram com o esvaziamento devido a investimentos para expansão das cidades e oferta de estruturas mais modernas em outros espaços (CAJADO, 2016).

Percebe-se que o Brasil nos últimos anos, vem buscando implantar projetos e políticas para renovar as construções dos centros urbanos. Além disso, sua influência é essencial para a revitalização econômica, social e cultural destas áreas (MARQUES DE JESUS, 2008).

Para proceder os devidos reparos faz-se necessário compreender materiais que perduram durante décadas e séculos e como os novos materiais de reconstituição se comportam nas obras, é o passo inicial para as intervenções de conservação e restauração terem sucesso (KANAN, 2008 apud RODRIGUES, 2013).

Para Rodrigues (2013), a compatibilidade entre os materiais, o substrato antigo e a nova camada de reconstituição, torna a caracterização de argamassa antiga um assunto de grande importância, pois a preocupação com a preservação cultural, tem se tornado crescente nos últimos tempos.

Os revestimentos argamassados ainda sofrem algumas discriminações em um processo de restauro, pois ainda são tratados sem nenhuma preocupação quanto ao

registro. Técnicas ancestrais são perdidas como resultado do desconhecimento da constituição e da tecnologia envolvidas, sendo menosprezado o seu valor histórico. Logo, há a preocupação com o desenvolvimento de revestimentos ainda sobreviventes (VEIGA, 2003).

Em muitos países, o estudo da composição de argamassas antigas desempenha um papel fundamental nas investigações evolutivas de uma edificação, pois os conhecimentos de seus constituintes levam a identificar técnicas de construção utilizada nos períodos passados.

Trabalhar com argamassas antigas pressupõe um estudo minucioso de sua composição e como a nova argamassa de reconstituição irá se comportar em um substrato tão antigo. Para estudar a composição destas requer utilizar técnicas de caracterização química, mineralógica e estrutural, pois somente assim é possível conhecer seus constituintes (VIEGA ET AL, 2001).

Conforme Kanan (2008), o trabalho de investigação não se responde como um único método de análise, mas combinando-os e recolhendo informações sobre o bem.

Logo, em paralelo ao desenvolvimento e caracterização física e mecânica dos materiais em estudo, a avaliação do ciclo de vida (ACV), como ferramenta de gestão ambiental, têm uma importância notória na análise de alternativas com potencial ecológico. É possível gerar um diagnóstico da viabilidade ambiental das diversas alternativas propostas através desta análise.

Nesse contexto, o estudo visa caracterizar quimicamente três argamassas coletadas dos sítios históricos de Sobral, Icó e Fortaleza e, em paralelo, traçar o ciclo de vida das argamassas de reconstituição.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho ambiental de argamassas históricas cearenses a partir da reconstituição de argamassas coletadas em três cidades do centro histórico do Ceará.

2.2 Objetivos específicos

- Analisar o centro histórico do Ceará e definir as três cidades em estudo;
- Coletar amostras de argamassas para desenvolvimento das análises;
- Reconstituir argamassas do centro histórico do Ceará;
- Elaborar traços compatíveis com o substrato estudado de diferentes constituições;
- Analisar do ciclo de vida das argamassas em estudo;
- Comparar os impactos ambientais gerados pela produção das argamassas de reparo.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Reconstituição de argamassas históricas

Caracterizar argamassas classificadas como históricas, bem como o patrimônio cultural e sua preservação, é um desafio para a comunidade científica. Sua extrema importância e aplicabilidade fazem deste um assunto consolidado nas pesquisas atuais, visto que, para proceder o correto restauro das edificações antigas, faz-se necessário caracterizar os materiais de construção utilizados.

Argamassas históricas podem ser definidas como as produzidas anterior ao uso do cimento Portland, em 1824. O aglomerante predominante era a cal, podendo, também, ser encontrados alguns outros dependendo da região e data da edificação (JAPIASSÚ, 2011).

As premissas utilizadas em trabalhos com argamassas históricas baseiam-se em princípios trazidos da Carta de Veneza (1964). Dentre eles, ressalta-se o conceito de intervenção mínima, que, segundo Brandi (2004), é tido como fundamental e interfere diretamente no restauro dos revestimentos, uma vez que há a necessidade de aumentar a vida útil da edificação com intervenções que sejam compatíveis com a estrutura existente.

Carasek (2007) afirma que os primeiros registros de emprego de argamassa como material de construção datam da pré-história, há cerca de 11.000 anos. O gesso e a cal foram os primeiros materiais ligantes utilizados em argamassas desde o tempo do antigo Egito e Oriente Médio. O emprego de cal aérea como aglomerante, foi datado em 1700 a.C., no palácio de Knossos (TORRACA, 2009).

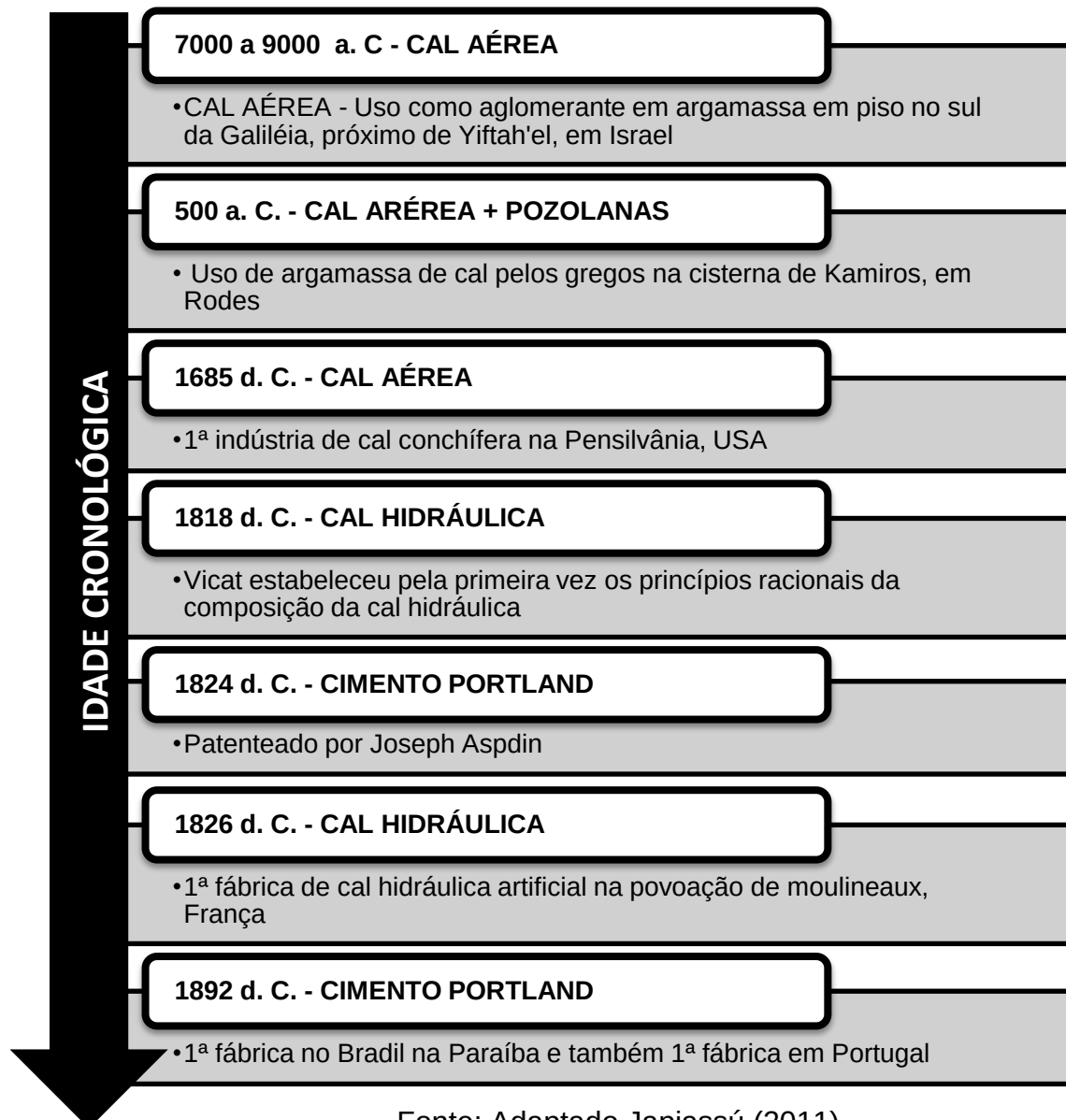
Entretanto, apenas com os gregos e romanos que os primeiros testes de outros materiais de origem animal e vegetal, como ceras e óleos animais a fim de aumentar a resistência mecânica destas começaram a serem feitos, iniciando, assim, o desenvolvimento das argamassas hidráulicas (Moropoulou apud Marques, 2005).

Logo, ao longo dos anos, diversos tipos de argamassa e novos materiais adicionados foram surgindo, necessitando, assim, estudos aprofundados e pontuais

para cada edificação onde há a necessidade de restauro. Dessa forma, alguns fatores a serem levados em conta no início do trabalho de investigação são: local da edificação e época de construção.

Em paralelo, um desafio recorrente em obras de restauração do patrimônio histórico em edificações antigas está na compatibilidade físico-química e mecânica entre a argamassa de restauro e original sem alterar ou interferir na estética e característica do edificado para garantir sua integração e durabilidade. Para tanto, há a necessidade de se utilizar o mesmo tipo de material do substrato nas intervenções e, se tratando de edificações antigas, a compatibilidade não é totalmente assegurada visto que há uma lacuna de informações acerca da construção (MARQUES, 2005).

Figura 1– Evolução do uso da cal aérea, cal hidráulica e cimento como aglomerante



Fonte: Adaptado Japiassú (2011)

Os fatores físico-químicos e biológicos interferem de maneira direta na composição dos materiais de construção. Logo, para se reconstituir corretamente uma argamassa antiga é necessário conhecer a mistura utilizada, o substrato de aderência e as condições climáticas (RODRIGUES, 2013).

Se utilizados aditivos orgânicos na produção das argamassas, é praticamente impossível determinar com exatidão a constituição destas, uma vez que sua deterioração com o tempo tende a ser maior. Logo, entende-se que a reconstituição plena da argamassa do substrato é algo impraticável. Busca-se, então, caracterizar para que, ao ser reconstituída, a argamassa de restauro se assemelhe ao substrato (SANTIAGO, 2002).

Veiga (2003) afirma que a correta caracterização e restauro irá proceder por meio da compreensão da composição dessas argamassas muito embora algumas lacunas não sejam preenchidas, pois algumas questões como estado do substrato, tipo de água, relação de água, modo de amassadura, tempo e algumas misturas orgânicas não sejam possíveis serem analisadas e dificilmente reproduzidas.

A compatibilidade entre substrato e argamassa de restauro, apresentação de textura e cor o mais próximo da original e mesma resistência são aspectos destacados por Recena (2007) como importantes para seguir na reconstituição dos traços.

Como base científica e investigativa, pode-se obter informações sobre as produções acerca do tema em plataformas online, onde constatou-se que há uma produção significativa nos países da Europa acerca desse tema, com destaque a Itália, que detém cerca de 28% das publicações segundo busca realizada na plataforma *Web of Science*. Espanha, Grécia, República Checa e Estados Unidos também apresentam produção expressiva. Dentre eles, destacam-se os autores Asterios Bakolas, com 16 artigos publicados e Antonia Maropoulou, ambos da *Nathural Technology Univerty Athens*, na Grécia. Dentre as produções, que focam na reconstituição de argamassas e seu desempenho em áreas sísmicas, constam técnicas apuradas de produção e análise de desempenho dos compósitos.

No Brasil, de maneira geral, os referidos estudos desenvolvidos utilizam o método Teutônico para a produção das argamassas reconstituídas, análises químicas baseadas no método de Fluorescência de Raio X e mineralógicas através da difração de raios-x (SENRA; CASTRO; RIBEIRO, 2016; MENEZES, 2019; ROSA, 2016; RIBEIRO; MAIA; BRAGA, 2018).

O estudo de Nascimento et al. (2009) apresenta o método de trabalho que contempla a análise mineralógica por difratometria de raios X, análise petrográfica, análise química e microscopia óptica para caracterização de argamassas antigas, como utilizado pelo IPT/SP. Os autores destacam que conhecer o histórico da edificação apresenta bastante relevância no processo para a obtenção dos resultados. Com base neste processo, foi possível identificar a natureza das cals utilizadas, uma dolomítica e outra cálcica e a provável procedência do agregado, como de rio.

Candeias et al (2006), desenvolveu um estudo que ressalta a necessidade de se desenvolver e aplicar uma metodologia mais padronizada para tais análises. Esta deve contemplar as seguintes etapas: amostragem, tamanho da amostra, observação in loco, observação ao microscópio e desagregação da amostra para análises de caracterização. Após, procede-se as análises micro estrutural, mineralógica e química.

Um método que contempla a análise química para argamassas mistas de cal, cimento Portland e agregado é o proposto pelo IPT. Este, baseia-se no ataque com ácido clorídrico da argamassa, onde forma duas frações distintas: insolúvel, composta por agregados e solúvel, composta pelos aglomerantes. Também, é possível mensurar a fração volátil, que representa as reações ocorridas após a aplicação da argamassa. Deste método, o traço é dado pela relação aglomerante e agregado (RODRIGUES, 2013).

Entretanto, a fragilidade de tal método encontra-se nas limitações quando analisadas argamassas inorgânicas e é adequado para agregados quartzoso e não para agregado carbonático. Argamassas com material pozolânico geralmente se torna insolúvel ao ataque de ácido clorídrico, o que impossibilita a utilização desse método (RODRIGUES, 2013).

A complexidade dos materiais antigos, no caso das argamassas, torna necessário mais de um tipo de técnica para caracterização das amostras, em que muitas devem ser usadas em conjunto, contribuindo para resultados mais realistas, embora, como já foi mencionado, existam características deixadas nos anos de sua existência que não serão reproduzidas, principalmente em argamassas orgânicas (SENRA; CASTRO; RIBEIRO, 2016).

As etapas de coleta de amostras in situ e as análises laboratoriais constituem, em conjunto, etapas necessárias para auxílio da identificação do material do substrato e orientam a tomada de decisões dos passos a serem seguidos. Também, é

importante conhecer, se possível, as técnicas de construção, mão de obra da época, de cura e das condições climáticas (VEIGA et al, 2001).

3.2 Patrimônio histórico das cidades em estudo.

A cidade de Fortaleza, capital do estado do Ceará, é um dos grandes destaques da região Nordeste por diversos fatores, dentre eles o potencial econômico e as atrações turísticas. As riquezas naturais da região, a irreverência da cultura do povo fortalezense, bem como a riqueza de sua história, em conjuntura com os aspectos urbanísticos e arquitetônicos da cidade a tornam um polo turístico em destaque nacional e não apenas regional.

A cidade de Sobral, localizada a na região Norte do Estado do Ceará, dista da capital 235 km. É uma cidade que vem crescendo de forma bastante significativa, estando, hoje, inserida entre as cidades que mais cresceram do Brasil nos últimos 10 anos, além de estar também no ranking das 30 melhores cidades para morar no contexto nacional.

Vale ressaltar a grande riqueza e patrimônio histórico presente na cidade. No tocante ao desenvolvimento comercial, esta, apresenta considerável processo de modernização da sua estrutura econômica, que impacta em várias características da cidade. Berço de um polo estudantil e industrial considerável, a cidade de cerca de 200 mil habitantes, segundo o IBGE, abriga, também, traços culturais do seu conjunto arquitetônico e urbanístico bem preservados uma vez que o núcleo histórico desta cidade foi elevado à condição de Patrimônio Nacional em 1999. Este título colabora com as políticas de preservação a serem desenvolvidas nas edificações públicas da cidade, bem como defende a preservação e restauro dos prédios protegidos pelo tombamento.

O município de Icó, localizado a 370 km da capital, Fortaleza, localiza-se na região centro-sul do estado do Ceará. Ele surgiu a partir da resistência de tribos indígenas aos colonizadores, no período do início do século XVIII. Um arraial localizado entre as serras do Pereiro e os vastos sertões do Cedro surgia em momentos turbulentos de resistência à colonização, no qual, depois de lutas sangrentas, obteve sua pacificação, protagonizada pelo padre João de Matos Serra, prefeito das Missões.

Passando esse período turbulento, o arraial foi se desenvolvendo, principalmente nos arredores da Capela Nossa Senhora da Expectação. O

povoamento e crescimento da região foi o principal fator para que o arraial da Ribeira dos Icó passasse a ser a Vila do Icó, localizada na área mais dinâmica das capitâneas do Ceará, ou seja, pontos de cruzamento e acesso para importantes vias de comunicação colonial.

Atualmente, apesar da evolução econômica da cidade, o processo de tombamento oriundo do Iphan, em 1998, fez com que fosse preservada o conjunto arquitetônico e urbanístico local, já que o mesmo é considerado o melhor da arquitetura tradicional do estado. Esse patrimônio é encontrado, principalmente, em ruas principais que destacam aos traços urbanos característicos das construções portuguesas, que em Icó estabelece uma relação harmoniosa entre simplicidade e despojamento.

Vale ressaltar que alguns fatores influenciaram diretamente para a preservação do núcleo histórico da região, fazendo com que ele permanecesse praticamente intacto desde sua concepção até os tempos atuais. Dentre esses fatores está o fato de que Icó era considerado o principal caminho das boiadas, ou seja, o principal entreposto comercial entre as províncias do Ceará, isso auxiliou bastante no processo de infraestrutura da cidade, com a construção de igrejas, mercado e sobrados, porém, devido à queda abrupta da exportação de produtos oriundos da criação de gado, relacionado com as secas devastadoras que aconteciam na região, e também a criação de rotas alternativas para tais atividades, foi ocorrendo um enfraquecimento político e econômico local, originando um declínio de movimentação naqueles trechos, ao passo que novas áreas de expansão urbana iam surgindo ali perto. Isso ajudou a poupar os principais pontos históricos de maiores alterações ao passar do tempo.

3.3 Argamassas com adição de Resíduo de construção e demolição

Segundo ABNT (2001), argamassas são materiais de construção obtidos a partir da mistura homogênea de um ou mais aglomerantes, agregado miúdo e água, contendo ou não aditivos e adições minerais, com propriedades de aderência e endurecimento. A argamassa de revestimento é utilizada para revestir paredes, muros, tetos, os quais, geralmente, recebem acabamentos como pintura, revestimentos cerâmicos, laminados, entre outros (CARASEK, 2007).

Para garantir um desempenho satisfatório dos revestimentos de argamassa de parede durante o seu tempo de vida útil, deve-se cumprir determinadas funções que, de acordo com Bauer (2005), vão desde a proteção à alvenaria, regularização das

superfícies, isolamento térmico e acústico, estanqueidade a água, até funções de natureza estéticas.

Ainda, segundo Bauer (2005), a execução dos revestimentos exige propriedades particulares das argamassas, tais como plasticidade, para se deformar sobre a superfície do substrato quando do lançamento e aplicação, fluidez para envolver a rugosidade do substrato e retenção de água para manter a trabalhabilidade durante a aplicação.

Para atender as funções de um sistema de revestimento, certas propriedades tornam-se imprescindíveis ao bom desempenho das argamassas de revestimento, no estado fresco: a trabalhabilidade, consistência, plasticidade, adesão inicial, viscosidade, entre outras. Já no estado endurecido, devem possuir baixa retração e permeabilidade à água, aderência adequada, capacidade de absorver deformações e resistência mecânica (CARASEK, 2007).

O agregado reciclado poderá ser definido como material heterogêneo uma vez que a composição varia de região a região e da própria unidade recicladora. Também, destaca-se a maior porosidade em relação aos agregados naturais.

No tocante a utilização e escolha dos agregados para a argamassa, Mehta e Monteiro (1994) expõem as características que são importantes, principalmente ao utilizar agregados reciclados: porosidade, composição, granulometria, absorção de água, forma e textura superficial das partículas, resistência à compressão, módulo de elasticidade e os tipos de substâncias deletérias.

As argamassas com adição dos resíduos de construção são utilizadas na Itália e na Argentina há mais de 80 anos. Já as argamassas com agregado reciclado possuem características que possibilitam a sua aplicação em serviços de assentamento e revestimento. De acordo com ANVI (s.d.) a geração de boa quantidade de finos, aumentando a plasticidade e a coesão, liberação de cal e cimento com potencial reativo e pozolanicidade de materiais cerâmicos são vantagens de utilizar resíduos adicionados. E ainda, para Lima (1999) e Corinaldesi (2009), com o uso do resíduo de construção, obtém-se boa aderência aos substratos.

Dentre os benefícios advindos da utilização do RCD em argamassas, pode-se citar: a utilização do resíduo no próprio local; economia na aquisição de matéria-prima, devido à substituição de materiais convencionais pelo resíduo; diminuição da poluição originada pelo RCD; preservação das reservas naturais de matéria-prima e o uso da fração menor que 4,8 mm do agregado reciclado (RESENDE, 2004).

A maior desvantagem de utilizar esses resíduos de RCD na própria obra onde foi gerado, são os problemas operacionais de aplicação que podem ocorrer, como estabelecer uma trabalhabilidade e uma relação água/cimento (a/c) adequados. Lima (1999) observou, em suas pesquisas, que a resistência mecânica de argamassas com agregado reciclado, na maioria das vezes, é maior que a de argamassas convencionais. Este comportamento é atribuído à pozolanicidade e ao efeito filler dos finos do agregado reciclado, contribuindo para a melhoria das propriedades mecânicas das argamassas.

Poon e Chan (2007) concluíram que um efeito positivo na resistência de aderência pode ser atribuído à maior tendência para reter a água das argamassas com agregados reciclados. Para Silva; Brito e Veiga (2007) a retenção de água é favorável para evitar a absorção rápida por parte do substrato e da evaporação, que evitam a hidratação completa do cimento, fazendo com que parte do cimento passe a funcionar como filler.

Resende (2004) comenta que uma retenção de água elevada (em torno de 85%) é importante também para um ganho de resistência mecânica e de aderência, ocasionado devido ao endurecimento adequado da argamassa. Segundo Silva; Brito e Veiga (2007) uma alta permeabilidade ao vapor de água é uma característica apreciável na argamassa, pois permite uma boa secagem da água que penetra na argamassa e facilita a eliminação do vapor de água que se forma no interior dos edifícios. Este fator pode significar características positivas, como uma menor absorção por capilaridade ou uma menor permeabilidade à água sob pressão, sendo que estes fatores dependem da quantidade e do tamanho dos poros.

Corinaldesi (2009) ressalta que as argamassas com agregado reciclado apresentam maior porosidade aberta devido a maior porosidade dos agregados. Entretanto, seu teor de macro poros é menor.

As propriedades das argamassas com agregado reciclado, ligada à qualidade são: a trabalhabilidade (consistência, plasticidade, coesão e aderência). E as propriedades ligadas à durabilidade são: a resistência à compressão, à abrasão e à tração; aderência; absorção de água, 41 porosidade e estanqueidade; retração; estabilidade volumétrica; durabilidade (LIMA, 1999).

Apesar das vantagens na utilização do agregado reciclado, faltam informações para que seu uso se amplie. Sabe-se que o uso do agregado reciclado em argamassas pode causar retração por secagem, conforme o tipo de resíduo utilizado

e o traço aplicado. Por isso, é utilizado às argamassas com uma parte de agregado reciclado e quantidade considerável de agregado natural, para evitar o aparecimento de patologias. Sendo assim, nota-se que é necessária a elaboração de métodos e especificações de ensaios exclusivos para o agregado reciclado, para que não seja aplicada apenas em serviços simplificados, visto que o agregado reciclado possui características adequadas para o uso em argamassas. Assim, a possibilidade do seu uso é promissora, podendo obter compósitos de boa qualidade

3.4 Análise do Ciclo de Vida (ACV) de argamassas

A Análise do Ciclo de Vida (ACV) trata-se de uma ferramenta que permite avaliar o impacto ambiental potencial associado a um produto ou atividade durante seu ciclo de vida. A Análise do Ciclo de Vida de acordo com Jensen et al (1997), engloba a avaliação de alguns aspectos ambientais, de um sistema de produto através de todo o seu ciclo de vida. Essa técnica, também pode ser encontrada na literatura e no meio prático como Enfoque Ciclo de Vida, Análise do berço ao túmulo ou Ecobalance.

A NBR ISO 14.040:2009, que trata dos princípios e estrutura da ACV, preconiza que esta deve incluir em suas fases a definição de objetivo e escopo, a análise de inventário, a avaliação de impactos e interpretação de resultados. Conforme a ABNT NBR ISO 14040 (2009), a ACV consiste na compilação e avaliação das entradas, saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida. Esta, gera informações que possibilitam avaliar impactos, comparar desempenho ambiental de produtos podendo influenciar no marketing e rotulagem ambiental, isto através da quantificação e comprovação de impactos; viabilizando tratamento, minimização e gerenciamento mais preciso nos aspectos dos impactos ambientais.

A preocupação em relação aos impactos ambientais gerados ao longo do ciclo de vida dos produtos, processos ou atividades emergem durante as décadas de 1960 e 1970 por ocasião da crise energética mundial provocada pelo que ficou conhecido como crise do petróleo. Por terem surgido em um contexto de crise energética, após a superação da fase crítica do petróleo, os estudos de ACV enfraqueceram. Porém com o fortalecimento da preocupação ambiental, tais pesquisas retornam à agenda de estudos relacionados à produção ambientalmente responsável (FABRÍCIO et al., 2017).

Diante do exposto, existe grande preocupação com os impactos ambientais associados ao uso de bens e serviços e isso fez com que novas metodologias fossem desenvolvidas, visando auxiliar na compreensão, controle e/ou redução desses impactos, por meio da implementação de medidas de melhoria do desempenho ambiental de sistemas de produtos. A ACV é uma dessas metodologias e considera todo o ciclo de vida do produto, desde a extração da matéria-prima utilizada na produção, passando pelo seu uso e finalizando com a disposição final do produto (ANDRADE, 2016).

Allen e Rosselot (1997) destacam que uma ACV apresenta três componentes: inventário de resíduos, emissões, e matérias-primas e uso de energia associado através de todo o ciclo de vida de um produto desde a extração das matérias-primas até a disposição final; análise dos impactos ambientais associados com os resíduos, emissões, e matérias-primas e uso de energia; e análise de melhoria onde mecanismos para reduzir impactos ambientais adversos são implementados.

Para proceder uma correta ACV é necessário deter conhecimento sobre as entradas e saídas de informações, uma vez que todas estão correlacionadas. Jensen et al (1997) afirmam que a ACV pode ser definida, também, na análise e na comparação dos impactos ambientais causados por diferentes sistemas que apresentam funções similares. Ou seja, à luz da gestão ambiental, ela estabelece inventários tão completos quanto possível do fluxo de matéria (e energia) para cada sistema e permite a comparação desses balanços, sob a forma de impactos ambientais.

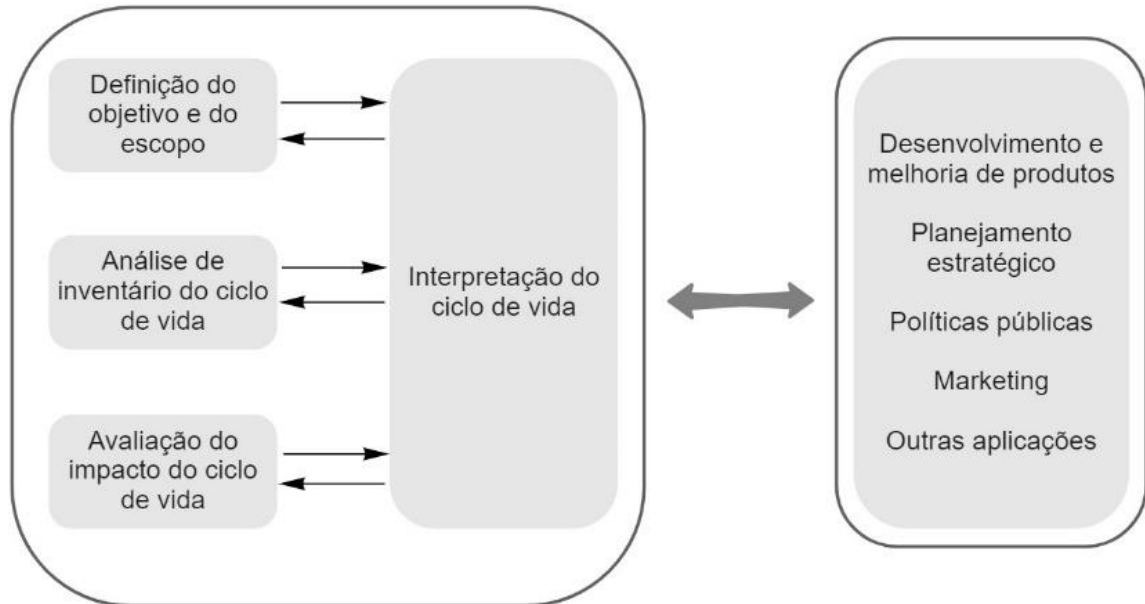
Quanto a normalização vigente para proceder a ACV há um conjunto de normas da série ISO 14000. Em se tratando de Brasil, A NBR ISO 14040 preconiza os princípios gerais (ABNT, 2001), a NBR ISO 14041 contempla a definição de objetivos e escopo e análise do inventário (ABNT, 2004a), a NBR ISO 14042 (ABNT, 2004b) trata da avaliação de impactos ambientais e a NBR ISO 14043 (ABNT, 2005) que estabelece parâmetros para a interpretação do ciclo de vida.

Partindo para o plano internacional, acrescenta-se a ISO/TR 14047 (ISO/TR, 2003), que apresenta exemplos de aplicação, a ISO/TS 14048 (ISO/TS, 2002), que considera o formato de apresentação de dados, e a ISO/TR 14049 (ISO/TR, 2000), que acrescenta exemplos de aplicação especificamente à definição de objetivos.

A Figura 2 apresenta, de forma resumida, o conteúdo presente nas normalizações para uma correta estruturação e aplicação da AVC. Vale ressaltar que

todas as ações são interdependentes e dependem da sensibilidade do executante ao proceder a análise.

Figura 2- Estrutura e aplicações diretas da ACV



Fonte: IBRAHIM et al, 2007.

A norma da série NBR ISO 14040 (ABNT, 2009) contempla a utilização da ACV. Ela afirma que identificar oportunidades de melhorias de aspectos ambientais de produtos em todo o seu ciclo de vida; auxiliar as indústrias e organizações governamentais e não governamentais a tomar decisões relacionadas ao seu planejamento estratégico e a definir prioridades de produtos e processos; selecionar indicadores importantes de desempenho ambiental; e promover ações de marketing são as funções principais da ACV.

Entretanto, é necessário destacar que o desenvolvimento de estudos de ACV em edificações necessitam de uma atenção especial e algumas alterações devido às diferenças apresentadas com relação ao ciclo de vida de produtos industriais que envolvem um curto espaço de tempo. Ao analisar obras de engenharia, a vida útil que se estende por décadas e/ou séculos entra em divergência dos itens industriais com vida útil de semanas ou meses. (SOARES et al., 2006)

Segundo relatório do Diretório Geral para Ciência, Pesquisa e Desenvolvimento da Comissão Europeia (1997), a dificuldade da análise de edificações não está apenas na adaptação da análise para esse tempo de vida útil estendida, mas na estruturação das informações coletadas em partes, de forma que possam ser

utilizadas para várias ou somente uma única fase do ciclo de vida da edificação em questão.

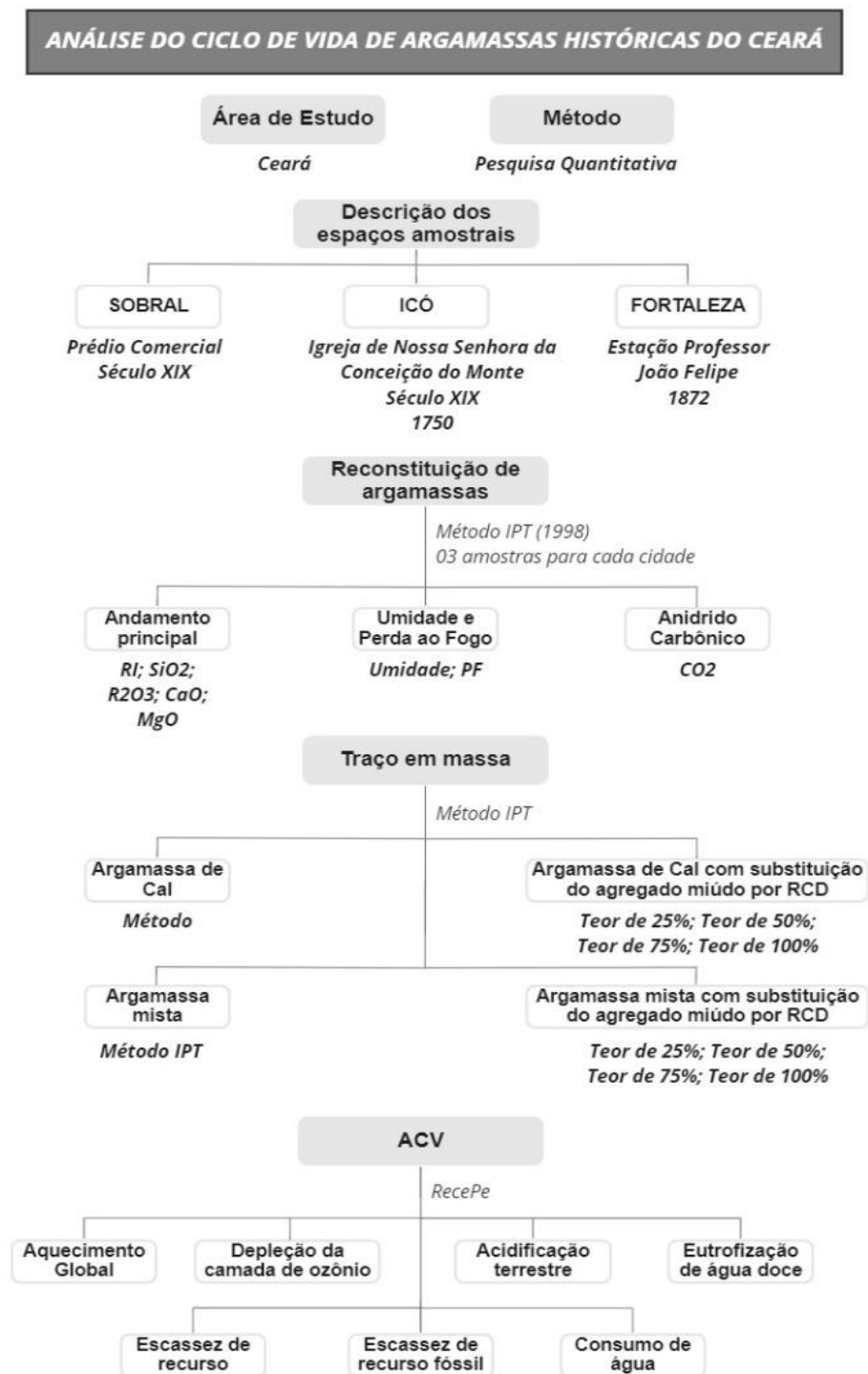
Chavelier e Le Teno (1996), propuseram requisitos especiais para a ACV de sistemas construtivos uma vez que há a notória dificuldade de se aplicar essa metodologia para esse fim. Estes são: regras especiais de fronteira devem ser definidas para forçar a separabilidade; processos específicos para sistemas construtivos devem ser modelados; a hipótese de estabilidade no tempo deve ser forçada ou cancelada; a hipótese de precisão tem que ser cancelada; a qualidade dos dados e as relações entre elas devem ser documentadas; a lista de estressores de impacto deve ser aberta aos critérios definidos pelo utilizador de acordo com um processo de negociação bem documentado; assistência deve ser prestada aos utilizadores para a gestão dos resultados; um programa de computador deve ser utilizado para auxiliar todo o processo.

4 METODOLOGIA

4.1 Organograma da pesquisa

De forma a esclarecer os passos a seguidos no presente trabalho fez-se necessário a reunião das informações relevantes de forma concisa e visual no organograma representado na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Figura 3 – Etapas metodológicas da pesquisa



Fonte: Autora (2021)

Percebe-se que os passos seguidos contemplam etapas de coleta de materiais, ensaios laboratoriais baseados nos princípios da química analítica, elaboração de traços de argamassas com e sem adição de RCD, elaboração de cenários para verificar a viabilidade no tocante aos aspectos da sustentabilidade da produção destas e, ainda, a análise do desempenho ambiental das argamassas de restauro propostas em cenários que buscam explorar a minimização dos impactos nas categorias analisadas neste estudo.

4.2 Natureza da pesquisa

Para proceder essa pesquisa estabeleceu-se um delineamento metodológico a fim de conseguir o alcance dos objetivos propostos. Dessa forma, o foi realizado abordando as seguintes características:

- Quantitativa: os resultados desta podem ser quantificados, visto que através de procedimentos estatísticos analisa os dados numéricos e assim especifica as relações entre as variáveis (GERHARDT; SILVEIRA, 2009).

4.3 Reconstituição de argamassas

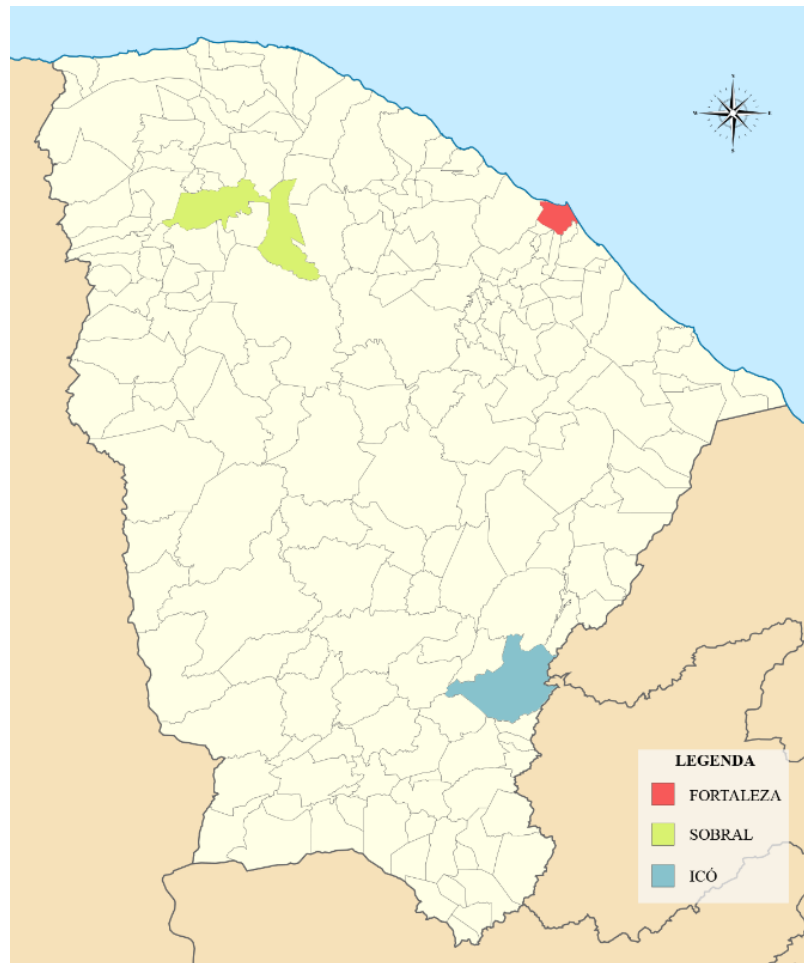
A caracterização do substrato das edificações selecionadas foi feita por meio do processo de reconstituição das argamassas a ser detalhada a seguir, esclarecendo os pontos relevantes a base metodológica estudada.

4.3.1 Áreas de estudo

As áreas de estudo selecionadas estão descritas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, sendo três edificações que fazem parte do patrimônio histórico do estado do Ceará localizadas nas cidades de Sobral, Icó e Fortaleza. As cidades em questão foram escolhidas pela relevância no volume de edificações catalogadas do patrimônio histórico cearense e, também, a disponibilidade de coleta de materiais por parte da administração e/ou proprietários destas, uma vez que para que o estudo ocorresse era necessário a realização de ensaios físicos do substrato extraído do local.

Da análise dos locais escolhidos percebe-se que estão distribuídos no mapa de forma a contemplar regiões distribuídas geograficamente no decorrer do estado. Icó está localizada próximo a região do Cariri; Sobral na região meio norte do estado; e Fortaleza, a capital, no litoral e berço da maior região urbanizada do estado.

Figura 4 - Cidades que abrigam edificações em estudo



Fonte: Adaptado pela Autora (2021)

4.3.1.1 Sobral

As amostras de Sobral utilizadas nessa pesquisa foram coletadas do prédio comercial localizada na Rua Coronel Ernesto Deocleciano, próximo à Praça de Cuba. A estrutura em questão já abrigou uma grande loja do ramo de confecções e, hoje, após pequena reforma, abriga uma loja varejista de móveis. A literatura e registros não tratam especificamente da edificação uma vez que esta está tombada, mas não constitui uma obra destaque no sítio histórico como igrejas, solares e casarões tão bem explorados pela literatura. Ele se enquadra no segundo grande grupo arquitetônico da cidade, limitado pelo trecho que conecta a Igreja das Dores até a Igreja do Rosário e seus arredores.

Dados da literatura mostram que a edificação certamente foi construída em meados de 1850, quando começaram a construir solares com três ou quatro águas e motivos greco-romanos, estilo apontado pela equipe de coleta no momento de obter-

se as amostras em estudo. Apesar da fachada não estar preservada, como mostra a Figura 5, o ambiente interno ainda é da estrutura original.

Figura 5 - Edificação em estudo na cidade de Sobral (CE)



Fonte: (Google Earth Pro, 2018) Sobral, CE. Coordenadas 72"S e 93"W.

Ainda, é necessário ressaltar que o motivo para a escolha de tal edificação deve-se ao fato de, como é uma estrutura explorada diariamente pela atividade comercial, entende-se que haja maior necessidade de inspeções preventivas, reparos preventivos e corretivos. Logo, uma argamassa cujo traço é compatível com o substrato certamente acarretará um restauro mais eficiente e com uma maior vida útil se comparado a um traço sem qualquer compatibilização.

4.3.1.2 Icó

As amostras de Icó foram coletadas da Igreja do Monte, uma construção feita no século XIX, na qual sua arquitetura é semelhante à várias capelas dos engenhos pernambucanos dedicados à Nossa Senhora da Conceição do Monte. Sabe-se que a construção foi edificada sobre um outeiro, que é uma tradição católica na construção de santuários marianos. De lá é possível ter uma vista deslumbrante do Vale do Salgado, onde está Icó. Não se sabe ao certo quem a construiu, apenas que foi por volta de 1750.

Na Figura 6 (a) está registrada a igreja em uma imagem de 1962 onde é possível observar sua localização e robustez e (b), retirada do site da prefeitura de Icó, é possível observar a atual conjuntura da igreja.

A edificação escolhida em Icó deve-se a sua importância histórica e a necessidade de preservação do edificado. Na vistoria realizada no local para a coleta das amostras, foi observado que há necessidade de reparo em vários pontos, reafirmando a necessidade de proceder de forma compatível com o substrato a fim de aumentar a vida útil da edificação.

Figura 6 - Igreja Nossa Senhora da Conceição do Monte em Icó (CE)



Fonte: (A) IBGE¹ (B) Site da prefeitura de Icó. 2021²

4.3.1.3. Fortaleza

A edificação escolhida em Fortaleza deve-se à importância histórica acerca de sua história e a necessidade de preservação do edificado. Na vistoria realizada no local para a coleta das amostras, foi observado que há necessidade de reparo em vários pontos, reafirmando a necessidade de proceder de forma compatível com o substrato a fim de aumentar a vida útil da edificação.

A partir disto, é importante citar um dos principais pontos da cidade que representa a cultura urbanística do local: a estação ferroviária Dr. João Felipe, construída no final do século XIX (1872 – 1880), com características neoclássicas bem definidas, como aponta informações do Ipatrimônio.

A edificação está tombada pelo Iphan, desde 1980, sendo um marco da cultura arquitetônica de Fortaleza pela sua exuberância e construção. Atualmente está com seu funcionamento interrompido desde 13 de janeiro de 2014 em decorrência das

¹ <https://biblioteca.ibge.gov.br/biblioteca-catalogo.html?id=410700&view=detalhes>

² <https://www.ico.ce.gov.br/localidades.php>

obras do metrô de Fortaleza. A **Figura 7** figura 7 apresenta o atual estado de conservação desta.

Figura 7 - Estação Ferroviária Dr João do Monte (CE)



Fonte: (Google Earth Pro, 2016) Fortaleza, CE. Coordenadas 72"S e 93"W..

Em uma breve retomada no histórico da edificação os dados da literatura apontam que o terreno da estação João Felipe, na praça da estação, funcionou o cemitério de São Casimiro até 1865. Após esta data, houve o abandono das atividades e, em 1877, houve a completa demolição e exumação dos corpos para outro cemitério na cidade. Posteriormente, afirma-se que a estação central foi construída sobre esses túmulos antigos. O engenheiro Henrique Foglare projetou e coordenou a execução desta sob os restos do cemitério utilizando mão de obra dos retirantes da seca de 1877. Dados constam que em 30 de novembro de 1873 a pedra fundamental da obra foi consolidada, as obras iniciadas posteriormente em 1879 e ao término, a inauguração aconteceu em 9 de julho de 1880. A Figura 8 mostra a estrutura da edificação após sua inauguração.

Figura 8 - Estação Ferroviária Dr João Felipe após sua inauguração



Fonte: Governo do Estado do Ceará³

³ <https://www.ceara.gov.br/2021/06/22/estacao-das-artes-resgate-historico-e-incentivo-a-cultura-norteiam-a-obra-no-centro-de-fortaleza/>

Na visita para coleta das amostras foi notado que a edificação comporta um único pavimento, e está localizada em uma área quase total da Praça Castro Carreira (popularmente chamada de Praça da Estação). Foi possível notar a exuberância de sua fachada que, no bloco central, apresenta colunas sobre pedestal e acima há a presença de um frontão triangular. Ainda do bloco central é notada a presença de escadaria de acesso ao interior do edifício. As fachadas laterais possuem fenestração com aberturas em arco pleno, arrematadas superiormente por cornijas e platibandas.

4.3.2 Coleta das amostras

As amostras em Sobral, Icó e Fortaleza foram coletadas no ano de 2019. Nas três edificações a serem estudadas o procedimento seguiu as etapas previstas na normalização vigente. De maneira geral, destaca-se que as áreas escolhidas não passaram por processo de restauro, exceto a edificação de Sobral, onde procedeu-se a retirada inferior a camada de reparo existente. Foi retirada argamassa in loco, em apenas um local por edificação, até completar, aproximadamente, 1 kg de amostra total para cada cidade.

A área escolhida para coleta em Sobral foi parede do térreo, próxima à entrada principal. Por se tratar de uma edificação comercial, é degradada de forma mais incisiva que as demais áreas internas e protegidas das intempéries naturais externas.

A área da edificação de Icó, Igreja do Monte, foi a parede lateral da nave central, local preservado, mas que iniciava processo de degradação natural.

A área da edificação de Fortaleza, da estação Dr João Felipe, foi uma parede interna da entrada da edificação.

4.3.3 Procedimentos laboratoriais

A etapa laboratorial desta pesquisa procedeu em utilizar método de ataques químicos às argamassas em estudo, para que fossem conhecidas sua constituição pelos elementos químicos presentes. Posteriormente, duas metodologias de traços foram utilizadas a fim de gerar os traços de argamassa a serem explorados no estudo.

4.3.3.1 Método IPT para reconstituição de argamassas.

A etapa crucial do estudo foi a caracterização química das argamassas. Para tanto, o processo de reconstituição de argamassas escolhido foi seguindo a metodologia proposta por Quarcioni e Cincotto (1997).

Este método é uma atualização do Método IPT para argamassas, e baseia-se no princípio de que a argamassa, ao ser atacada com ácido clorídrico, dá origem a duas frações distintas: uma insolúvel e outra solúvel. Para argamassas convencionais de cimento Portland, cal hidratada e agregado quartzoso, a fração solúvel é composta pelos aglomerantes, cujos resultados são expressos na forma dos óxidos: anidrido silícico (SiO_2), óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio (MgO) e óxidos de ferro e alumínio (R_2O_3) e fração insolúvel é constituída pelo agregado e a fração volátil, que permite quantificar as reações ocorridas após a aplicação da argamassa e determina a umidade, perda ao fogo e anidrido carbônico (CO_2) (QUARTICIONI; CINOTTO, 1997).

O método de análise química pode ser desenvolvido em três etapas: andamento principal apresentado na Figura 9, umidade e perda ao fogo (PF) e anidrido carbônico. O primeiro processo, o mais longo da análise é descrito na Figura 09 e necessita de no mínimo 05 dias para a correta execução.

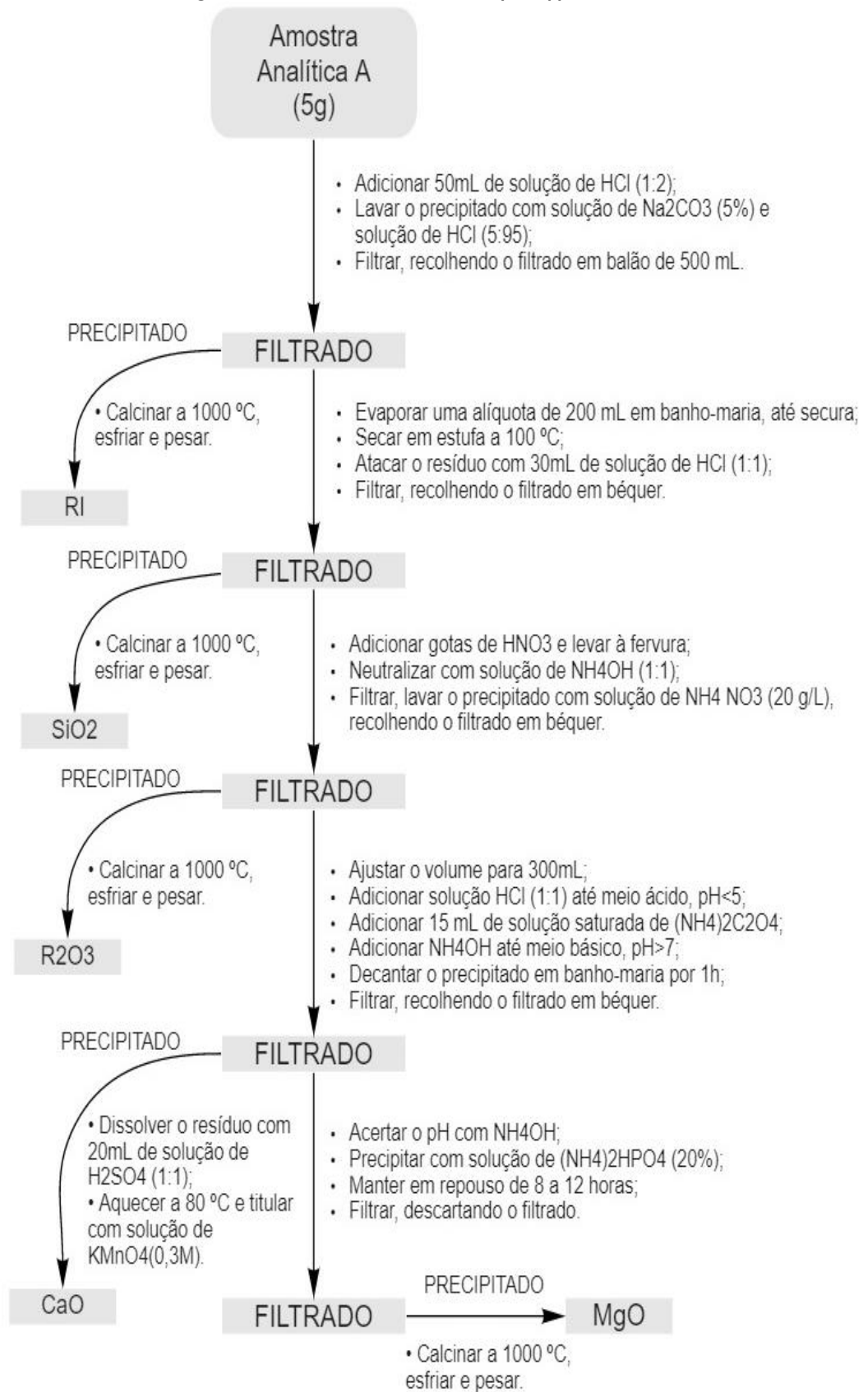
Essa etapa da pesquisa foi desenvolvida em parceria no Laboratório de Corrosão da Universidade Federal do Ceará (UFC). Logo, o processo operacional das etapas partiu da separação por quarteamento de cada amostra e moagem do material até granulometria inferior a 0,84 mm. As amostras analíticas foram separadas posteriormente, sempre realizando os ensaios em triplicata, ou seja, três amostras para cada cidade em estudo a fim de uma maior assertividade nos resultados.

São processos de sucessivas filtrações e calcinações, intercaladas por ataques ácidos como HCl e HNO_3 , neutralizações com bases fortes, evaporações para formar precipitado, banho maria, ajustes de pH e titulação.

Sobre essa etapa é possível verificar que todos os procedimentos são baseados na química analítica e realizados em um laboratório de química experimental, não necessitando de equipamentos de maior valor para compra. O intuito de investir na utilização desse tipo de análise consiste em tornar viável sua realização em cidades do interior que não tem acesso a equipamentos mais técnicos e caros de constituição química de substâncias.

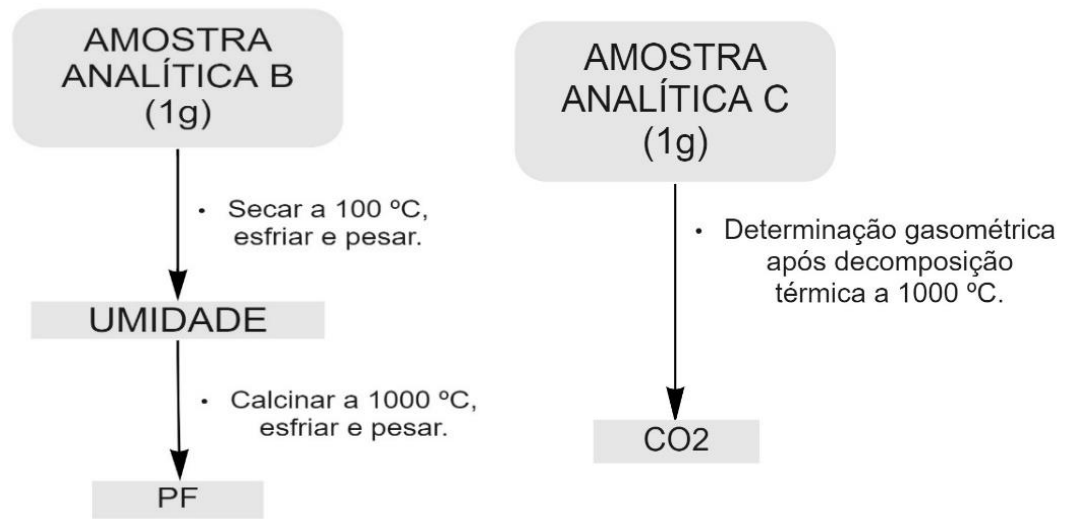
O primeiro processo desta etapa, ataque por HCl , filtração do precipitado e calcinação forma o substrato que constitui o resíduo inorgânico. Como descrito no método, o valor resultante da calcinação representa o agregado da amostra analisada. Este valor bruto de aglomerante e agregado separado será a base das duas metodologias de cálculo utilizadas.

Figura 9 - Andamento Principal (I)



Fonte: Adaptado Quarcioni e Cincotto (1997).

Figura 10 - Andamentos II e III



Fonte: Adaptado Quarcioni e Cincotto (1997).

Os andamentos II e III, umidade e perda ao fogo, representado na figura acima por PF, (amostra analítica B) e anidrido carbônico (amostra analítica C), respectivamente, estão representados na Figura 10. As etapas metodológicas são mais simples, contemplam apenas secagem em estufa e calcinações.

Ainda sobre o processo de calcinação presente no estudo, o tempo depois da estabilização da temperatura a 1000°C foi de quarto horas. Após desligar o equipamento, aguardou-se o tempo de total resfriamento natural das amostras para proceder a pesagem. O peso do filtro utilizado na etapa anterior a calcinação foi computado no cálculo final dos resultados, sendo este subtraído do total encontrado.

A secagem em estufa deu-se em uma hora após a estabilização da temperatura e a calcinação após quatro horas. Logo, é necessário apenas um dia para a realização desses procedimentos nessa etapa do estudo.

A Figura 11 mostra as amostras do processo pesadas e separadas em triplicada para início dos três andamentos, ou seja, para todas as cidades em análise foram utilizadas três amostras para cada procedimento de ensaio.

Figura 11 - Amostras separadas e pesadas para início de ensaios



Fonte: Autora (2021)

A Figura 12 mostra etapas dos processos químicos executados em laboratório: (a) amostra da Estação com o resíduo inorgânico (RI) no cadinho após processo de calcinação no andamento principal, (b) processo de decantação em banho maria e (c) processo de filtração da primeira etapa do andamento principal.

Dentre as etapas metodológicas seguidas destaca-se a necessidade prévia de trabalhar com alguns conceitos químicos e conhecimento laboratorial para realização mecânica dos experimentos. Assim, recomenda-se, se necessário replicar este estudo, o executor possuir conhecimentos prévios de equipamentos e soluções químicas.

Figura 12 - Etapas do processo experimental desenvolvido em laboratório



Fonte: Autora (2021)

4.4 Elaboração de traços

Para a reconstituição das argamassas faz-se necessário elaborar os traços de acordo com os dados obtidos nas análises químicas. Logo, para tanto, foram utilizados dois critérios a fim de se obter de maneira mais assertiva a compatibilização entre substrato e argamassa de reparo: método adaptado do IPT descrito por Quarcioni e

Cincotto (1998), e dados da literatura sobre os aglomerantes utilizados nas datas de construção das edificações em estudo.

4.4.1 Método de cálculo IPT

Este método permite calcular a proporção de aglomerante (s) e agregado com base nos dados da análise química e retorna o traço da argamassa em massa. Nesse estudo de caso, não se dispõe da composição química dos materiais empregados. Dessa forma, faz-se necessário adotar valores médios preestabelecidos para que ocorra a correta interpretação dos dados gerados (QUARTICIONI; CINOTTO, 1997).

Os resultados finais da análise química necessitam ser recalculados na base de material não volátil (diminuindo o valor da perda ao fogo) uma vez que este exclui a água livre, combinada e anidrido carbônico dos materiais empregados ou incorporados à argamassa no processo de final de pega e cura do material. Segundo os autores, este artifício de cálculo é utilizado para permitir que os teores de materiais originalmente utilizados na confecção da argamassa: anidros e não carbonatados sejam descobertos. Logo, com os valores na base não volátil (NV) e adotando o valor obtido de resíduo insolúvel como sendo agregado, ou seja, areia, e os óxidos solubilizados como sendo a fração aglomerante, cimento e/ou cal, são calculadas as respectivas proporções percentuais, em referência aos materiais empregados (QUARTICIONI; CINOTTO, 1997).

Seguindo essa metodologia, o procedimento adotado para calcular os constituintes da argamassa adotados, segue os seguintes passos:

- a) Teor de agregado: é equivalente ao teor de RI da argamassa expresso pela base não volátil ($\%RI_{(ARG,NV)}$);
- b) Teor de cimento: obtido através da porcentagem de sílica solúvel da argamassa ($\%SiO_{2(ARG,NV)}$) e da sílica solúvel do cimento empregado ($\%SiO_{2(cim,nv)}$) pela expressão:

$$\%Cim_{(ARG,NV)} = \frac{(\%SiO_{2(ARG,NV)}) \cdot 100}{(\%SiO_{2(CIM,NV)})} \quad (1)$$

Após essa etapa, para quantificar o teor de cimento originalmente dosado, ($\%Cim_{(ARG,OR)}$), é necessário corrigir o calculado para base não volátil, acrescentando a perda ao fogo do cimento empregado ($\%PF_{(CIM)}$), através de:

$$\%Cim_{(ARG,OR)} = \frac{(\%Cim_{(ARG,NV)})}{(100 - \%PF_{(CIM)})} \times 100 \quad (2)$$

Como a perda ao fogo do cimento não é conhecida, foram adotados valores de referência preestabelecidos neste trabalho segundo os autores;

- c) Teor de cal: neste trabalho, o teor de cal virgem na base não volátil (%CV) segundo a metodologia foi:

$$\%CV = 100 - \%Cim_{(ARG,NV)} - \%RI_{(ARG, NV)} \quad (3)$$

Para se obter o teor de cal hidratada originalmente empregada (%Cal_(ARG,OR)), faz-se a ponderação corrigindo os valores em função da perda ao fogo da cal original (%PF_(CAL)), conforme equação 4:

$$\%Cal_{(ARG,OR)} = \frac{(\%CV)}{(100 - \%PF_{(CAL)})} \times 100 \quad (4)$$

Após o seguimento da metodologia de cálculo, o traço em massa dá-se a partir dos teores percentuais encontrados de cada constituinte expressos em relação ao cimento, ou seja, o valor obtido é resultado da divisão dos valores de cal e agregado em relação ao cimento.

Os autores destacam que esse método possui algumas limitações das quais vale destacar: as adições pozolânicas ou cimento Portland pozolânico inviabilizam esse tipo de análise uma vez que a pozolana é, geralmente, insolúvel ao ataque com ácido clorídrico. Dessa forma, há uma minimização do valor do aglomerante e um superdimensionamento do valor do agregado. Ainda, outra limitação tratada pelos autores é que a presença de agregados carbonático é solúvel ao ataque de ácido clorídrico. Logo, é indicado proceder análise quando há indícios ou certeza de uso de agregado quartzoso (QUARTCIONI; CINOTTO, 1997).

Logo, entende-se que para a análise desse trabalho os resultados são aproximados, uma vez que não se conhece com exatidão a origem dos constituintes empregados.

4.4.2 Definição de metodologia de elaboração de traços na pesquisa

Na literatura, autores relatam que a primeira fábrica de cimento no país se estabeleceu na Paraíba no final do século XIX, em 1972. Esta, teve seu funcionamento de apenas alguns meses e, após isso, essa produção brasileira deu-se alguns anos depois com a instalação de outra fábrica na região sudeste (SUZIGNAN, 1986).

As construções em estudo datam o início e finalização de sua construção anterior ao uso do cimento no país, logo, entende-se que os aglomerantes utilizados eram a base de cal e algumas adições naturais a fim de facilitar a pega e ajudar na trabalhabilidade. Então, o delineamento da pesquisa partiu e fundamentou-se nesse princípio para constituição dos traços.

Traço referencial de argamassa de cal foi elaborado para cada cidade partindo dos dados de %RI da análise química. O que não indicou ser agregado foi adotado como aglomerante. O teor água: aglomerante foi definido posteriormente quando as argamassas foram, de fato, reconstituídas em laboratório.

Traço referencial de argamassa mista, cimento e cal como aglomerantes, foi definido segundo os passos metodológicos acima citados por Quartcioni e Cinotto (1997). A adoção deste método de cálculo deu-se para que, mesmo com a adição de cimento, a argamassa fique compatível com o substrato, uma vez que o teor de sílica é o preponderante para a dosagem do cimento e esta foi encontrada em todas as argamassas. Ainda, houve a necessidade de proceder tal análise visto que desejou-se investigar o impacto ambiental do cimento na produção dessas argamassas porque em restauros onde não há o acompanhamento técnico adequado ainda se utiliza a argamassa mista sem a total preocupação com a aderência entre argamassa de restauro e substrato.

A decisão pela adição de resíduo de construção e demolição (RCD) deu-se, principalmente, por suas características físicas e propriedades que o mesmo possui e agrega a argamassa. Em uma análise da literatura foi possível constatar que estes têm a superfície mais porosa que os agregados naturais, são angulares e irregulares. (ÂNGULO, 2000; LEVY, 2001).

Justifica-se essa escolha baseado nas melhorias advindas dessa substituição ao compósito. Destaca-se que a primeira vantagem é a utilização do resíduo no próprio local em que foi produzido, ou seja, quando há um reparo o próprio material de demolição gerado pode ser britado e utilizado na obra. Ainda, há economia na obtenção de matéria-prima; a poluição advinda do RCD é amenizada uma vez que há a destinação desse resíduo (JOICHEM, 2012).

Ainda, sobre o desempenho mecânico, Lima (1999) constatou em seus estudos que há um acréscimo no desempenho mecânico do material com a utilização do agregado reciclado. Tal fato deve-se, possivelmente, ao efeito filler dos finos

presentes nesse tipo de agregado favorecendo um maior empacotamento granulométrico.

Também, destaca-se uma melhoria na resistência de aderência ao substrato. Segundo Poon e Chan (2007) esse comportamento deve-se a maior tendência de reter mais água em seu preparo levando a uma melhor hidratação dos ligantes e uma secagem mais lenta o que favorece a fixação da argamassa de reparo ao substrato.

Logo, entende-se que adição desse material minimiza os impactos ambientais gerados, principalmente, pela extração da areia quartzosa utilizada convencionalmente como agregado miúdo e, também, tem o potencial em favorecer o desempenho mecânico no quesito resistência da argamassa de reparo e aderência ao substrato. Dessa forma, a sua utilização nesse estudo tornou-se viável.

A Tabela 01 apresenta, de forma resumida, a composição dos traços quanto aos seus constituintes a fim de um melhor entendimento da execução do trabalho. Os cenários base foram numerados de C00 a C29, totalizando 30 cenários, contemplando os traços obtidos para as cidades de Sobral, Icó e Fortaleza, que possuem a mesma metodologia de organização de traços e a tabela explicita composição de uma cidade. O cenário C00 a C09 correspondem a cidade de Icó, C10 a C19 a cidade de Sobral, e C20 a C29 a cidade de Fortaleza.

Na Tabela 01, a célula assinalada com “X” apresenta que o constituinte está presente na argamassa. O teor, sendo ele areia ou RCD, significa a proporção em que ele está presente na argamassa. A variação destes ocorreu com os elementos aglomerantes (cimento e cal) e teores dos agregados (areia e RCD). Os tipos de traço com o RCD (traço 02, 03, 05 e 06) geraram variações de teores de RCD adicionados em 25%, 50%, 75% e 100%. Tal variação e elaboração dessas possibilidades foi-se necessária a fim de avaliar a influência do teor de agregado no compósito.

Tabela 1- Organização de cenários por teores para a cidade de Icó

	AGLOMERANTE			AGREGADO			ÁGUA
	CIMENTO	CAL	AREIA	TEOR	RCD	TEOR	
C00	X	X	X	100%			X
C01	X	X	X	75%	X	25%	X
C02	X	X	X	50%	X	50%	X
C03	X	X	X	25%	X	75%	X

C04	X	X			X	100%	X
C05		X	X	100%			X
C06		X	X	75%	X	25%	X
C07		X	X	50%	X	50%	X
C08		X	X	25%	X	75%	X
C09		X			X	100%	X

Fonte: Autora (2021)

4.5 Avaliação do Ciclo de Vida

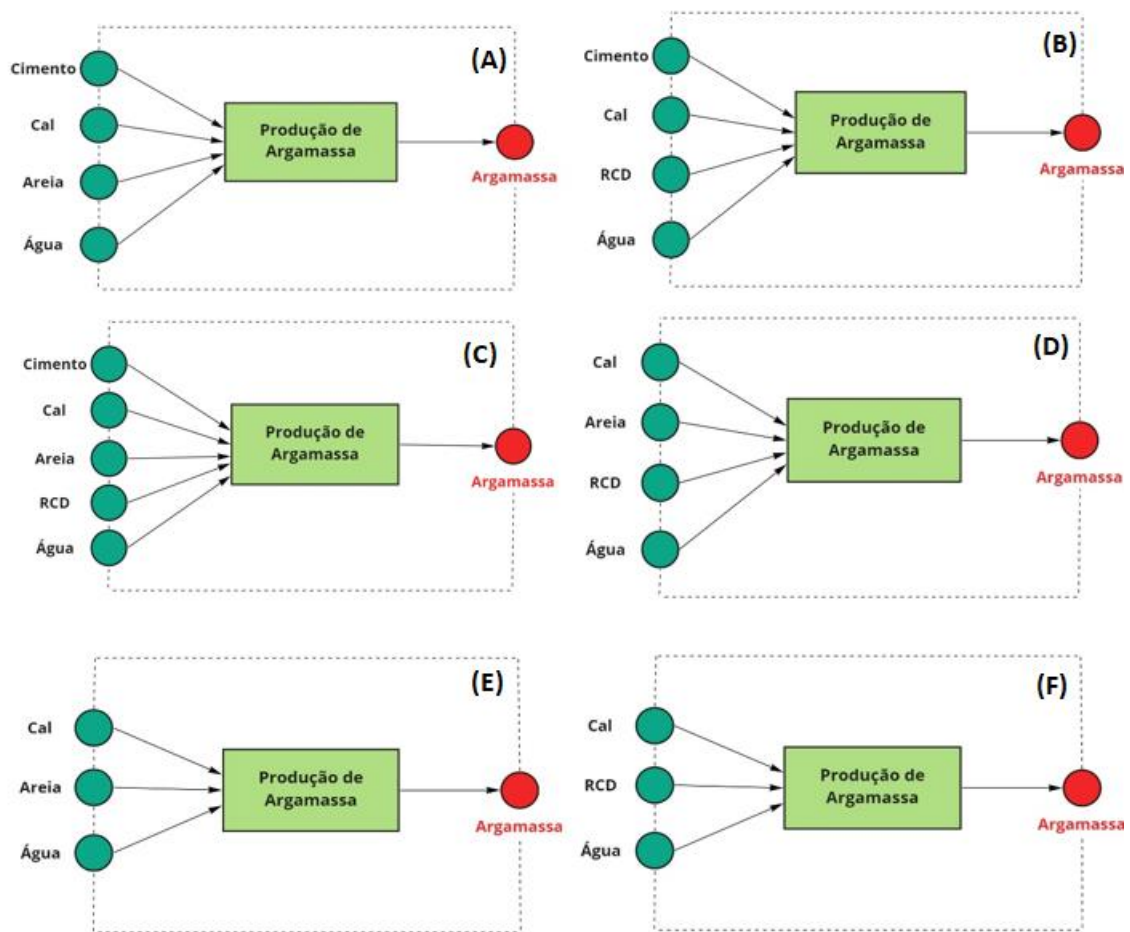
O estudo utilizou as definições e princípios da Avaliação do Ciclo de Vida (normas ISO 14040 e 14044) na modelagem dos cenários, nos inventários, nas análises de fluxos de energia e materiais considerando a perspectiva berço ao portão (*cradle-to-gate*) que significa incluir os impactos desde a produção e geração das matérias primas até o processo de produção do produto.

A escolha por trabalhar com essa perspectiva se deu uma vez que mesmo que o processo seja apenas o de produção da argamassa, os dados inventariados e coletados da base do *EcoInvent* contemplam os impactos gerados desde o início do seu ciclo produtivo.

Este estudo analisa comparativamente o cenário base e mais nove cenários para cada cidade. As entradas do processo são as matérias primas utilizadas para a produção da argamassa, elencadas na Tabela 1. Ainda os valores de cada item e cada cenário do estudo serão explicitados nos resultados deste trabalho.

A Análise do Ciclo de Vida deste estudo atendeu aos critérios de fronteira estabelecidos nos fluxogramas explicitados na Figura 13. Destaca-se que o processo analisado para todos os cenários foi a produção das argamassas na obra e estão apresentados de forma simplificada para melhor entendimento da organização metodológica da pesquisa.

Figura 13 - Fluxogramas simplificados do processo de produção de argamassas históricas



Fonte: Autora (2021)

Os seis fluxogramas apresentam as entradas e saídas dos cenários estudados. O fluxograma (A) corresponde aos cenários C00, C10 e C20; o (B) corresponde aos C04, C14 e C21; o (C) corresponde aos cenários C01 a C03, C11 a C13 e C21 a C23 variando os teores de entrada de areia e RCD; o (D) corresponde aos cenários C06 a C08, C16 a C18 e C26 a C28 variando os teores de entrada de areia e RCD; o (E) corresponde aos cenários C05, C015 e C25 e o (F) corresponde aos cenários C09, C19 e C29.

Todos os dados foram tratados e normalizados para a unidade funcional de 1 quilograma de argamassa produzida.

Os inventários foram elaborados a partir de dados primários obtidos em ensaios laboratoriais e organizados em planilhas eletrônicas, obedecendo aos traços gerados na etapa anterior do estudo e os cálculos realizados considerando o balanço de massa. A modelagem do sistema e os cálculos matemáticos foram realizados através

do *software* proprietário *SimaPro* 8.1 © (Pré Consultants, Holanda). O banco de dados utilizado foi o *Ecoinvent* 3.0. do Laboratório de Energia Renováveis e Conforto Ambiental do Instituto Federal, campus Fortaleza.

Ao analisar os impactos do RCD foram considerados apenas os impactos relacionados ao transporte entre o local de geração ou beneficiamento e local em que a argamassa será produzida. Nesses casos, em se tratando de resíduo, os impactos de sua geração são zerados pois se torna mínimo ao passo que o transporte é o processo de maior demanda. Então, para proceder a análise no *software*, foi criado um inventário específico para esse material nomeado RCD {BR} cuja entrada selecionada na base do Ecolnvent foi *Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 {RoW}| market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 | Cut-off, U*.

As entradas de inventários selecionadas na biblioteca do Ecolnvent estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2 – Inventários base Ecolnvent

Material	Entradas conhecidas da esfera tecnológica
Cimento	Cement, Portland {BR} market for cement, Portland Cut-off, U
Cal	Lime {RoW} market for lime Cut-off, U
Areia	Sand {BR} market for sand Cut-off, U
Água	Tap water {BR} market for tap water Cut-off, U

Fonte: Autora (2021)

A Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV), os resultados da análise de inventário foram correlacionados às categorias de impacto utilizando o método ReCiPe Midpoint (H) (Goedkoop et al., 2013), indicadores com abordagem orientada para o problema (midpoints) sob uma perspectiva hierarquista (H), disponível na biblioteca do *software* *SimaPro* 8.1©. Este método contempla 18 categorias de impacto e para esse estudo foram selecionadas 7 categorias mais relevantes em relação ao sistema de produto analisado e em conformidade com a literatura.

Na Tabela 3, estão descritas as categorias de impacto analisadas com as unidades de medida adotadas pela base de cálculos.

Tabela 3 - Unidades de avaliação das categorias de impacto

Categoria de Impacto	Unidade
Aquecimento Global	kg CO ₂ eq
Depleção da Camada de Ozônio	kg CFC ₁₁ eq
Acidificação Terrestre	kg SO ₂ eq
Eutrofização de Água Doce	kg P eq
Escassez de Recursos Minerais	kg Cu eq
Escassez de Recursos Fósseis	kg oil eq
Consumo de água	m ³

Fonte: Autora, 2021

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O tópico deste trabalho é destinado a apresentação dos resultados encontrados em todas as etapas de execução da pesquisa, incluindo análise química dos resultados, elaboração de traços e resultados do desempenho ambiental das argamassas.

5.1 Reconstituição de argamassas

Os próximos itens serão destinados a descrição dos resultados por cidade sendo detalhadas apenas os resultados finais de cada ensaio após realizar o cálculo de acordo com as etapas metodológicas. Vale ressaltar que todos os ensaios foram executados em triplicada e utilizada a média destes como valores para efetuar os cálculos.

5.1.1 Caracterização Química das Amostras de Icó

A Tabela 4 apresenta dados encontrados após o tratamento de dados para a cidade de Icó. Percebe-se a preponderância de valores de resíduo inorgânico (RI) frente aos demais resultados.

Tabela 4 - Resultados Análise Química Icó

Determinações	Resultados (%)	
	Base original	Base não volátil
Umidade	0,14%	-
Perda ao Fogo	0,62%	-
RI	78,30%	78,80%
SiO ₂ solúvel	0,71%	0,72%
R ₂ O ₃	1,13%	1,13%
CaO	13,10%	13,18%
MgO	4,34%	4,36%
CO ₂	0,62%	-

Fonte: Autora (2021)

Dentre os demais constituintes, os valores de CaO e MgO se destacam apontando para uma predominância de cal entre os aglomerantes. Tal fato encontra-se em paralelo com a literatura explorada e com a data de construção dessa edificação trazida pelos registros de literatura.

Posteriormente, foram calculados os teores dos materiais constituintes segundo a metodologia do IPT que explicita teores dos elementos de argamassas mistas contendo cimento, cal e agregado. A Tabela 5 detalha os valores obtidos.

Tabela 5 - Teores segundo método IPT Icó

<i>Teor de agregado</i>	78,80%
<i>Teor de cimento</i>	
<i>base não volátil</i>	3,28%
<i>originalmente dosado</i>	3,49%
<i>Teor de cal</i>	
<i>1º alternativa</i>	17,92%
<i>originalmente dosado</i>	24,37%

Fonte: Autora (2021)

Quanto ao teor de agregado, pode-se aferir que se trata de uma argamassa fraca, ou seja, a relação aglomerante: agregado é considerada pequena. Quanto menor essa relação, menor tende a ser o desempenho mecânico destas argamassas. Entretanto, entende-se que os valores encontrados estão em paralelo com a expectativa da autora, uma vez que, em se tratando de edificações históricas, o seu método construtivo arcaico corrobora para tal cenário.

Ainda, quanto ao teor de cimento apresentado por esse método é necessário fazer uma ponderação. A metodologia de cálculo prevê esse teor baseado na quantidade de SiO₂ solúvel indicada no compósito, uma vez que a sílica é o componente químico preponderante no cimento e, por ser um método de cálculo para argamassas produzidas em métodos convencionais recentes, a interpretação dos dados obtidos pelo executor é decisiva no processo.

Como já discutido, na época da construção da Igreja do Monte ainda não havia evidências da utilização de cimento em obras brasileiras e, em paralelo, a localização desta, no interior do Ceará, sustenta a hipótese que os materiais encontrados na região eram utilizados no processo construtivo. Logo, o ligante amplamente utilizado era a cal e, segundo as evidências elencadas, é o ligante presente na argamassa em estudo.

5.1.2 Caracterização Química das Amostras de Sobral

Seguindo a mesma metodologia de obtenção e análise de resultados, explicita-se os valores encontrados para a amostra coletada no edifício comercial da cidade de Sobral.

Tabela 6 - Resultados Análise Química Sobral

Determinações	Resultados (%)	
	Base original	Base não volátil
Umidade	0,092%	-
Perda ao Fogo	0,090%	-
RI	93,493%	93,580%
SiO ₂ solúvel	0,119%	0,119%
R ₂ O ₃	0,324%	0,324%
CaO	1,800%	1,802%
MgO	1,641%	1,643%
CO ₂		-

Fonte: Autora (2021)

Dos resultados obtidos, os valores de RI estão extremamente elevados, apresentando um valor percentual de 93,58% o maior entre as três cidades. Tal fato justifica-se baseado na hipótese da variabilidade dos traços executados in loco na data da construção desta edificação. No século XIX as técnicas ainda estavam sendo apuradas bem como não se estudava a importância da proporção adequada para a constituição das argamassas, fazendo com que houvesse uma variabilidade e heterogeneidade dos traços.

Existem técnicas de ensaios laboratoriais que apresentam os constituintes químicos de maneira proporcional na amostra analisada. A fluorescência de raios X (XRF) é constitui uma técnica analítica utilizada para determinar a composição química de amostras incluindo sólidos, líquidos, pastas e pós soltos (Melo, 2007). Entende-se que, em situações em que há resultados que extrapolem o limite da aceitação técnica comparativa, há a necessidade de proceder ensaios complementares como esse para que haja a validação dos resultados.

Entretanto, para este estudo, os valores foram adotados como fidedignos e, também, passíveis de replicação em laboratório para se testar aderência, pega e desempenho mecânico. Ainda, é possível aferir que o objetivo principal nessa

caracterização é garantir a aderência entre argamassa de reparo e substrato por meio da compatibilidade das duas fases envolvidas no processo. Então, quanto mais próximo dos valores encontrados nos métodos adotados para execução destes mais assertiva será a análise e validação dos resultados e do próprio método.

A Tabela 7 explicita os valores encontrados pelo método de cálculo os teores de agregado e aglomerantes da argamassa.

Tabela 7 – Teores segundo método IPT Sobral

<i>Teor de agregado</i>	93,58%
<i>Teor de cimento</i>	
<i>base não volátil</i>	0,55%
<i>originalmente dosado</i>	0,58%
<i>Teor de cal</i>	
<i>1º alternativa</i>	5,87%
<i>originalmente dosado</i>	7,98%

Fonte: Autora (2021)

A ponderação quanto ao teor de cimento é a mesma para todas as cidades estudadas. Nesse caso de Sobral, o teor de sílica foi muito baixo, reafirmando que o cimento não é um constituinte direto da argamassa e esse composto químico, certamente, faz parte da composição química de algum outro material possivelmente utilizado que não foi descrito. Há indícios da utilização de óleos ou adições naturais que, para a época, eram satisfatórias no acréscimo do desempenho no estado fresco e endurecido dessas argamassas.

Os teores de cal e agregado estão em consonância com a literatura e análises prévias e passíveis de serem adotados.

5.1.3 Caracterização Química das Amostras de Fortaleza

Seguindo a mesma metodologia de obtenção e análise de resultados, a Tabela 8 explicita os valores encontrados para a amostra coletada no edifício comercial da cidade de Sobral. Na comparação entre as cidades analisadas, as amostras da Estação Dr. João Felipe apresentam valores medianos de porcentagens dos constituintes. Entretanto, em consonância com as outras duas amostras, os valores de RI, cimento e cal obedecem a uma mesma proporção macro, ou seja, uma quantidade maior de RI, seguido dos constituintes CaO e MgO, que são utilizados e

caracterizam a presença de cal e, por fim os valores de SiO₂, que são os mínimos se comparados aos outros constituintes.

Tabela 8 – Resultados Análise Química Fortaleza

Determinações	Resultados (%)	
	Base original	Base não volátil
Umidade	0,538%	-
Perda ao Fogo	0,226%	-
RI	84,974%	85,191%
SiO ₂ solúvel	0,145%	0,145%
R ₂ O ₃	0,225%	0,226%
CaO	2,800%	2,807%
MgO	0,451%	0,452%
CO ₂		-

Fonte: Autora (2021)

A Tabela 9 explicita os teores de materiais encontrados segundo cálculos e utilizando como base os componentes químicos explicitados acima.

Tabela 9 - Resultados Teores Materiais Fortaleza

<i>Teor de agregado</i>	85,19%
<i>Teor de cimento</i>	
<i>base não volátil</i>	0,67%
<i>originalmente dosado</i>	0,71%
<i>Teor de cal</i>	
<i>1º alternativa</i>	14,14%
<i>originalmente dosado</i>	19,23%

Fonte: Autora (2021)

Em consonância aos demais resultados, trata-se de uma argamassa com alto teor de agregados e baixo teor de aglomerantes, ou seja, pode ser definida como argamassa fraca. Ainda, em paralelo aos demais resultados, o teor de cal apresenta-se em conformidade com a expectativa de uso para esse tipo de construção e, o cimento apresenta valores baixos a ponto de, partindo de uma análise de todos os fatores debatidos pela literatura e encontrados na análise química, afirmar que a sílica

hidratada presente provavelmente é proveniente de algum outro constituinte da argamassa não citado no estudo. Essa realidade é comum para o tipo de execução das construções desse período.

5.2 Elaboração de traços

A etapa posterior a obtenção das quantidades dos componentes químicos e teores de cada constituinte da argamassa embasa o cálculo os traços, explanado nesse subitem.

5.2.1 Traço de argamassa Icó

Segundo método do IPT, foi elaborado traço para os constituintes da argamassa que são cimento, cal e areia. As proporções desse material estão descritas na Tabela 10.

Tabela 10 - Traço segundo método IPT Icó

Traço			Rel
Cimento	Cal	Areia	Aglo/Agre
3,49%	24,37%	78,80%	0,35

Fonte: Autora (2021)

Em conformidade com as demais etapas, apresenta preponderância de areia em relação aos outros constituintes e baixa relação aglomerante/agregado conforme debatido.

Entretanto, fez-se necessário calcular um traço que a argamassa fosse apenas de cal, uma vez que se está trabalhando com argamassas históricas. Para tanto, adotou-se a premissa que, após a obtenção do RI, o que não fosse classificado como agregado seria aglomerante. Dessa forma, a Tabela 11 mostra essa composição de traços.

Tabela 11 - Traço de argamassa com um aglomerante Icó

Traço		Rel
Aglomerante (Cal)	Areia	Aglo/Agre
27,86%	78,80%	0,35

Fonte: Autora (2021)

A importância de proceder a testagem para melhor desempenho físico e mecânico e uma aderência ao substrato justificam a adoção dessa metodologia de

cálculo uma vez que o cimento apresenta na mistura que pode conferir maiores valores de resistência a argamassa preparada.

As quantidades individuais de cada material para os cenários em estudo, estão descritas na Tabela 12. Os valores adotados são utilizados para a produção de 100 Kg de argamassa. Ao final, foi feito o balanço de massa para encontrar a quantidade exata de massa no processo. A relação água/aglomerante adotada foi de 2,2 para esta cidade visto que, como o RCD possui alta taxa de absorção de água, partiu-se dessa relação em traço.

Tabela 12 – Resultados de Teores de Materiais para a cidade de Icó

	ÁGUA	AREIA	CAL	CIMENTO	RCD
	kg	kg	kg	kg	kg
C00	7,678	78,800	24,370	3,490	0,000
C01	7,678	59,100	24,370	3,490	19,700
C02	7,678	39,400	24,370	3,490	39,400
C03	7,678	19,700	24,370	3,490	59,100
C04	7,678	0,000	24,370	3,490	78,800
C05	7,678	78,800	27,860	0,000	0,000
C06	7,678	59,100	27,860	0,000	19,700
C07	7,678	39,400	27,860	0,000	39,400
C08	7,678	19,700	27,860	0,000	59,100
C09	7,678	0,000	27,860	0,000	78,800

Fonte: Autora (2021)

No processo de produção das argamassas in loco ou em laboratório a quantidade de água é adaptada para atingir os critérios de coesão e trabalhabilidade no estado fresco. Entretanto, o executor necessita garantir que não haja um acréscimo demasiado, uma vez que o desempenho mecânico é inversamente proporcional a quantidade de água no compósito. Logo, para este estudo, a quantidade de água calculada no traço das argamassas, faz-se necessário apenas para critérios de cálculo e inserção dos dados no programa.

O RCD e areia são matérias diferentes, com quantidades diferentes de massa unitária e específica. Entretanto, para este estudo, adotou-se que, nas substituições, os valores seriam baseados na quantidade de areia calculada. Essa escolha

metodológica justifica-se na premissa de que ainda não se conhece as propriedades físicas dos materiais aplicados, logo, entende-se que é necessário caracterizar fisicamente os materiais utilizados para obter a exatidão das quantidades utilizadas nessa produção e, como nosso objetivo é analisar o desempenho ambiental destas, se a correta proporção for estabelecida, encontramos resultados satisfatórios.

Vale ressaltar que as quantidades encontradas nesta etapa de estudo constituem o inventário da ACV e foram inseridas no software para proceder a base de cálculo.

5.2.2 Traço de argamassa Sobral

O traço gerado a partir dos dados da etapa anterior estão descritos na Tabela 13. De maneira geral, o comportamento encontra-se incomum se comparado às outras argamassas uma vez que o teor de agregado é de 93,58%. Ainda, o valor de cimento de 0,58% é considerado muito baixo.

Tabela 13 - Resultados Teores Materiais Sobral

Traço			Rel
Cimento	Cal	Areia	Aglo/Agre
0,58%	7,98%	93,58%	0,09

Fonte: Autora (2021)

Para a avaliação do desempenho mais próximo da argamassa original, o traço para a argamassa de cal obtido encontra-se descrito na Tabela 14. Ainda, este encontra-se muito pobre e recomendam-se análises complementares a fim de conformar tais resultados.

Tabela 14 - Traço de argamassa com um aglomerante Sobral

Traço		Rel
Aglomerante (Cal)	Areia	Aglo/Agre
8,56%	93,58%	0,35

Fonte: Autora (2021)

Os teores adotados nos cenários inventariados para ACV encontram-se descritos na Tabela 15. Como nas outras amostras em estudo, os valores de RCD são substituídos de forma numericamente proporcional ao da areia desconsiderando os ensaios de massa específica e unitária para critérios de cálculo.

Tabela 15 - Resultados Teores Materiais Sobral

	ÁGUA	AREIA	CAL	CIMENTO	RCD
	kg	kg	kg	kg	kg
C10	8,330	93,580	7,980	0,580	0,000
C11	8,330	70,185	7,980	0,580	23,395
C12	8,330	46,790	7,980	0,580	46,790
C13	8,330	23,395	7,980	0,580	70,185
C14	8,330	0,000	7,980	0,580	93,580
C15	8,330	93,580	8,560	0,580	0,000
C16	8,330	70,185	8,560	0,580	23,395
C17	8,330	46,790	8,560	0,580	46,790
C18	8,330	23,395	8,560	0,580	70,185
C19	8,330	0,000	8,560	0,580	93,580

Fonte: Autora (2021)

5.2.3 Traço de argamassa Fortaleza

Para as amostras coletadas na Estação Dr João Felipe, o traço misto encontra-se na Tabelas 16, e o que utiliza apenas o aglomerante cal na Tabela 17.

Tabela 16 - Resultados Teores Materiais Fortaleza

Traço			Rel
Cimento	Cal	Areia	Aglo/Agre
0,71%	19,23%	85,19%	0,23

Fonte: Autora (2021)

Em paralelo a bibliografia e o comparativo entre as cidades, trata-se, também, de uma argamassa pobre dada sua relação aglomerante: agregado. Ainda, vale destacar que o cimento calculado encontra-se em um teor mínimo e a cal preponderante.

Tabela 17 - Traço de argamassa com um aglomerante Fortaleza

Traço		Rel
Aglomerante (Cal)	Areia	Aglo/Agre
19,94%	85,19%	0,35

Fonte: Autora (2021)

Quando se utiliza apenas cal na mistura, o valor de 85,19% de agregados ainda se encontra elevado. Também, há uma necessidade de estudar a correta adição de água, visto que a pega e trabalhabilidade no estado fresco podem variar com a quantidade de água bem como a resistência final no estado endurecido.

As informações de quantidades de material consumidos em cada traço para compor o inventário da ACV desses cenários encontra-se na Tabela 18.

Tabela 18 - Resultados Teores Materiais Fortaleza

	ÁGUA	AREIA	CAL	CIMENTO	RCD
	kg	kg	kg	kg	kg
C20	15,950	85,190	19,230	0,710	0,000
C21	15,950	63,893	19,230	0,710	21,298
C22	15,950	42,595	19,230	0,710	42,595
C23	15,950	21,298	19,230	0,710	63,893
C24	15,950	0,000	19,230	0,710	85,190
C55	15,950	85,190	19,940	0,000	0,000
C26	15,950	63,893	19,940	0,000	21,298
C27	15,950	42,595	19,940	0,000	42,595
C28	15,950	21,2975	19,940	0,000	63,8925
C29	15,950	0	19,940	0,000	85,190

Fonte: Autora (2021)

A relação água: aglomerante foi mantida em todas as argamassas e, também, a substituição ocorreu de forma a desconsiderar as características físicas do agregado para esta análise.

5.3 Avaliação do ciclo de vida

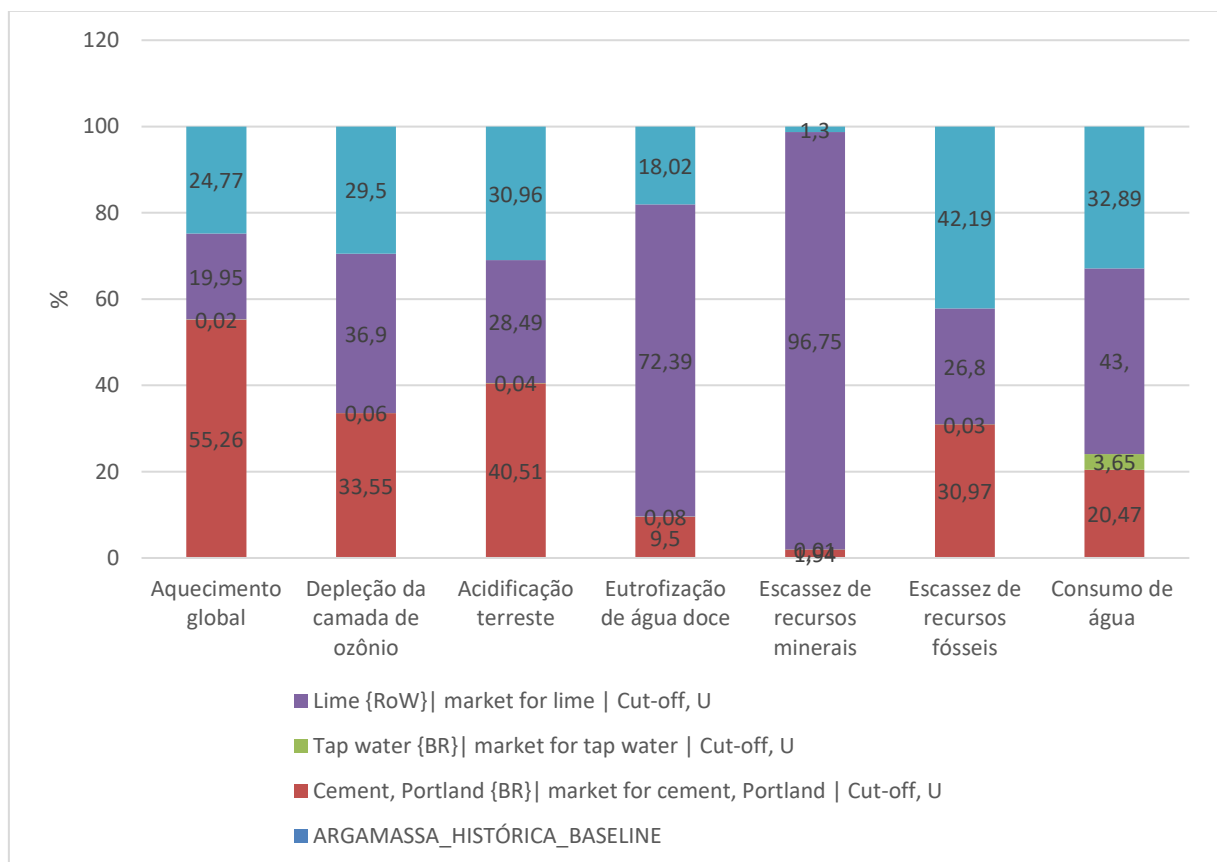
Este tópico dos resultados contempla a interpretação dos dados de saída da ACV realizada neste estudo. Primeiramente, será discutida a análise de contribuição que tem como objetivo identificar quais entradas têm maior influência sob o resultado final. Na análise comparativa, os cenários serão discutidos dividido em cada categoria de impacto. Fez-se necessário realizar uma análise de sensibilidade para identificar como a distância adotada no inventário de RCD impacta no desempenho ambiental destas argamassas.

5.3.1 Análise de contribuição

Para a análise de contribuição contemplar todas as variáveis da pesquisa fez-se necessário estabelecer dois cenários base: C00 e C04. A escolha por apresentar apenas os referentes a cidade de Icó baseou-se na observação dos resultados anteriores, onde as proporções de agregado e aglomerantes são paralelas. Logo, o comportamento desse tipo de análise é análogo às três cidades analisadas.

A Figura 14 apresenta a análise de contribuição do cenário C00, que tem em sua constituição as entradas de cimento, cal, areia e água.

Figura 14 – Análise de contribuição cenário base argamassas com areia.



Fonte: Autora (2021)

Dos resultados obtidos, de maneira geral, o cimento e cal são os que mais impactam no desempenho ambiental dessas argamassas. Os processos produtivos desses aglomerantes envolvem processos de calcinação para formação de clínquer no cimento e, o calcário, matéria prima para a produção da cal, também passa por esse mesmo processo. A água adicionada a argamassa produzida possui impactos quase zerados em todas as categorias exceto no consumo de água, visto que é

distribuída pela rede de abastecimento não apresentando transporte ou processos de grande impacto.

A categoria aquecimento global é medida em quantidade de CO₂ equivalente lançado a natureza. O valor de 55% obtido para o cimento deve-se ao fato que, na sua fabricação, há um processo de queima para a formação do clínquer, que contribui significativamente nesse resultado. Ainda, a cal, com 19,95% também possui um processo de calcinação do calcário em sua produção, levando a essa etapa em seu processo produtivo ser considerada importante nos impactos ambientais gerados. A areia com 24,77% possui esse impacto nessa categoria devido ao transporte envolvido em seu processo de extração da jazida até a utilização em obra.

A depleção da camada de ozônio, cuja unidade de medida aponta para emissão de CFC na atmosfera, conta com 33,55% para o cimento e 36,90% para cal. Esses valores também estão relacionados ao processo produtivo destas que envolve queima de matérias brutas para adquirirem propriedades aglomerantes. A contribuição de 29,5% da areia é atribuída pelo transporte gerado desse material até o local de utilização.

A acidificação terrestre, medida kg equivalente de SO₂, segundo ACV Brasil⁴ pode ser definida como o aumento do conteúdo ácido em ecossistemas terrestres levando a eliminação de bactérias e outros microrganismos. Os contribuintes mais importantes para a acidificação são as atividades antrópicas, como a combustão de combustíveis fósseis em atividades industriais e em veículos. Logo, os resultados de 40,51% para o cimento, 28,49% para cal e 30,96% para areia deve-se as mesmas questões das categorias de aquecimento global e depleção da camada de ozônio. Graficamente, estas apresentam uma mesma tendência na sua contribuição.

E eutrofização de água doce segundo ACV Brasil ⁵, refere-se ao excesso de minerais e nutrientes nos recursos hídricos gerando o crescimento excessivo de algas, sendo algumas delas altamente tóxicas. Os principais elementos responsáveis pela eutrofização são nitrogênio e fósforo, os quais estão presentes nos fertilizantes, efluentes e detergentes, por exemplo. Nessa categoria de impacto a cal é preponderante nos impactos, com 72,39%. Tal fato justifica-se aos efluentes gerados

⁴ <https://acvbrasil.com.br/artigo/desmistificando-eutrofizacao>

⁵ <https://acvbrasil.com.br/artigo/desmistificando-eutrofizacao>

no seu beneficiamento impactarem nessa categoria. A areia, com 18,02% está em segundo lugar devido ao seu processo de extração ser próximo a jazida de rios, impactando diretamente na poluição destes. O cimento, com 9,5% possui um maior controle de efluentes na sua fabricação, estes não são ricos nos componentes químicos que geram a eutrofização de água doce.

A escassez de recursos minerais medida, kg de Cu equivalente, aponta uma preponderância da cal, com 96,75% do impacto equivalente. Tal fato deve-se a extração direta do calcário das jazidas e sua alta taxa de consumo impactando diretamente nessa categoria. Areia, com 1,93% e cimento com 1,94% também apresentam impacto visto que há extração de matéria prima de jazidas.

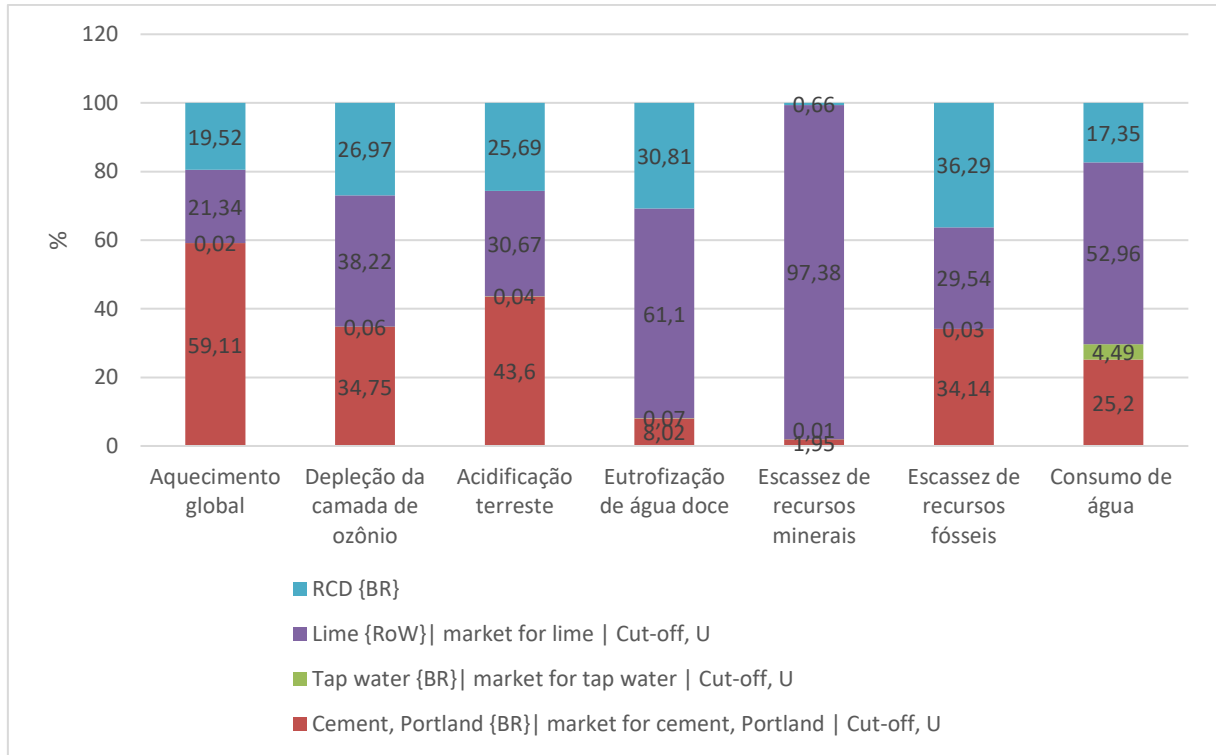
A escassez de recursos fósseis, medida em kg de oil equivalente, há uma distribuição homogênea dos impactos. A areia, com 42,19% é preponderante visto que a etapa de transporte impacta diretamente nessa categoria. O cimento com 30,97% impacta com o combustível utilizado para combustão no processo de fabricação do cimento e, também, o transporte envolvido. A cal, com 26,8%, impacta de maneira significativa pela combustão necessária e transporte envolvido no processo de fabricação.

Por fim, a categoria consumo de água expressa em m³ apresenta como única em que a água adicionada a mistura apresenta mais de 1% de influência relativa na produção da argamassa. Os 3,65% ainda apontam que os impactos são mínimos se comparados aos 32,89% da areia, 20,47% do cimento e 43% da cal.

Após análise geral dos resultados faz-se necessário destacar que, nos cenários base definidos para a análise de contribuição em estudo, a porcentagem de cimento adicionada no processo de fabricação é de 3,49%, cal é de 24,37% e areia 78,80%. Entretanto, nos resultados relativos, cal e cimento são preponderantes em quase todas as análises, sendo o cimento em duas categorias gera o maior impacto relativo em detrimento a porcentagem mínima na composição da argamassa.

No cenário base C04 a Figura 15 aponta para uma tendência semelhante ao cenário anterior. O impacto relativo da areia e RCD seguem um mesmo padrão de comportamento. Tal fato deve-se que, tanto no RCD quanto na areia, o transporte é a etapa do processo que mais gera impactos nas categorias analisadas nesse trabalho.

Figura 15 - Análise de contribuição cenário base argamassas com RCD



Fonte: Autora (2021)

Comparando o desempenho do RCD com o da areia no cenário anterior, exceto na categoria de impacto eutrofização de água doce, os valores relativos do desempenho do RCD foram menores que o da areia. Ainda, os valores de cimento foram significativos, sendo preponderante em três das sete e possuindo menos de 4% do valor da massa total do compósito.

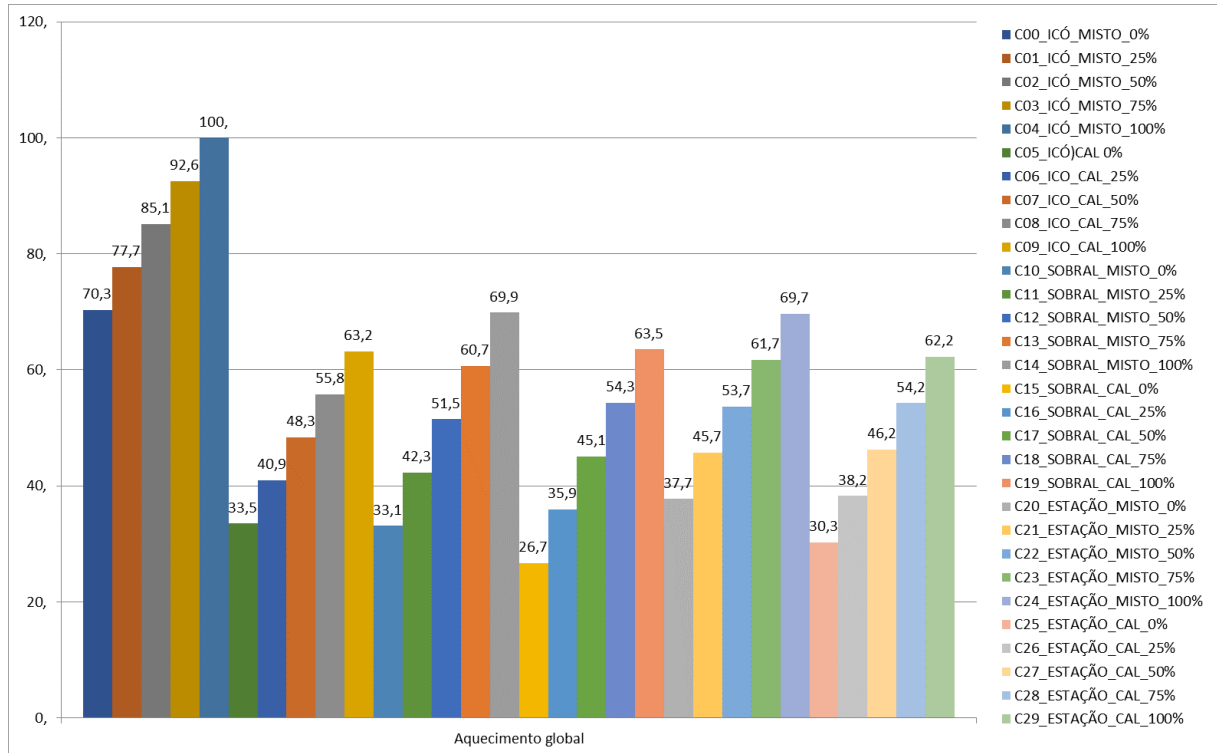
Na eutrofização de água doce o impacto gerado pelo RCD foi maior que o da areia, visto que o transporte relacionado ao RCD, impactando de maneira maior nessa categoria de impacto.

5.3.2 Análise comparativa

A análise comparativa deste estudo procedeu em comparar os cenários gerados pelas três cidades Icó Fortaleza e Sobral nas sete categorias de impacto escolhidas para o estudo: aquecimento global, depleção da camada de ozônio, acidificação terrestre, eutrofização de água doce, escassez de recursos minerais, escassez de recursos fósseis e consumo de água.

A Figura 16 mostra a primeira categoria de impacto analisada, o aquecimento global. Como comentado no item anterior, o consumo de combustíveis fósseis para queima da matéria prima e transporte impactam decisivamente neste item.

Figura 16 - Categoria de impacto aquecimento global



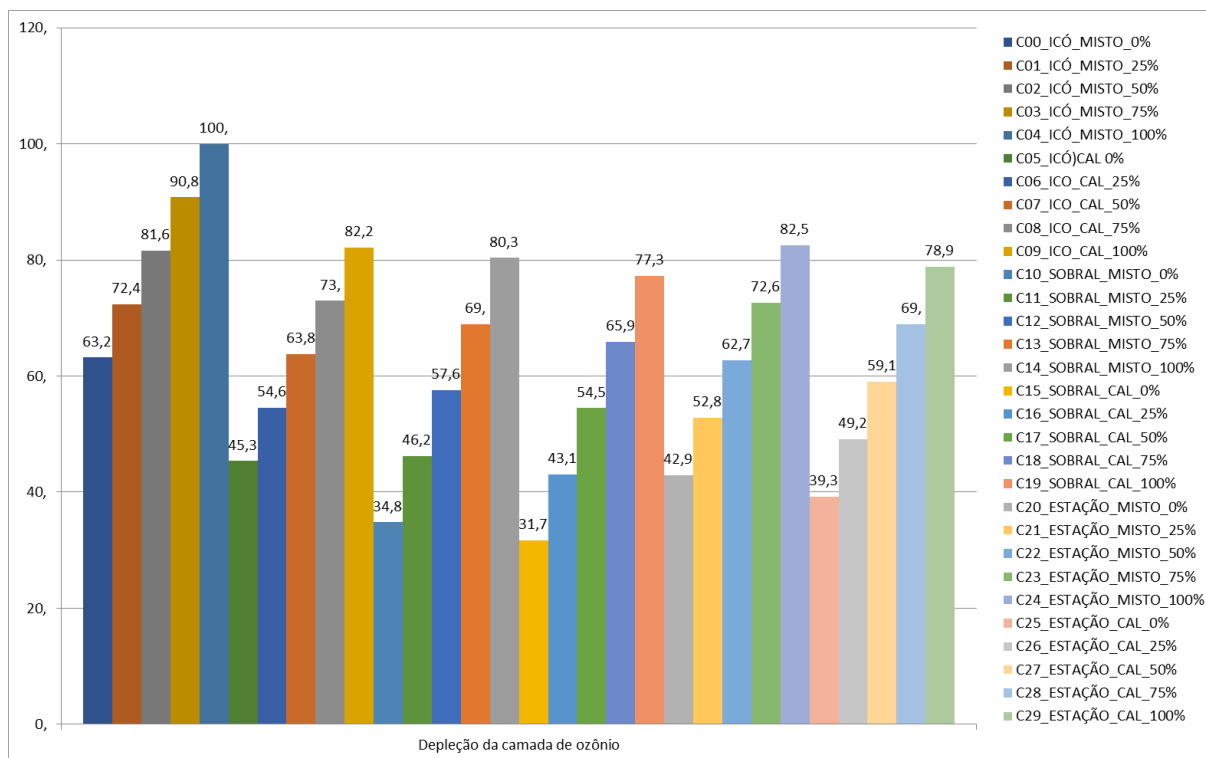
Fonte: Autora (2021)

Da análise da figura o maior impacto é atribuído ao cenário C04. Logo entende-se que o transporte do RCD impacta negativamente. Também, o menor impacto atribui-se ao C15, argamassa que não possui cimento, o teor de agregado é superior a 93% e o teor de cal é o menor dentre os cenários analisados.

Comparando o desempenho das cidades, os valores de Icó apresentam um maior impacto visto que a quantidade de aglomerantes é maior. Ainda, Sobral e estação possuem desempenho relativo parecido uma vez que os teores dos materiais possuem valores absolutos com pouca variação entre eles. Logo, a comparação segue a linha de tendência da análise de contribuição.

A Figura 17 apresenta a categoria depleção da camada de ozônio comparando todos os cenários em estudo. A tendência dos resultados se mostra em paralelo com a categoria de impacto anteriormente analisada.

Figura 17 - Categoria de impacto depleção da camada de ozônio



Fonte: Autora (2021)

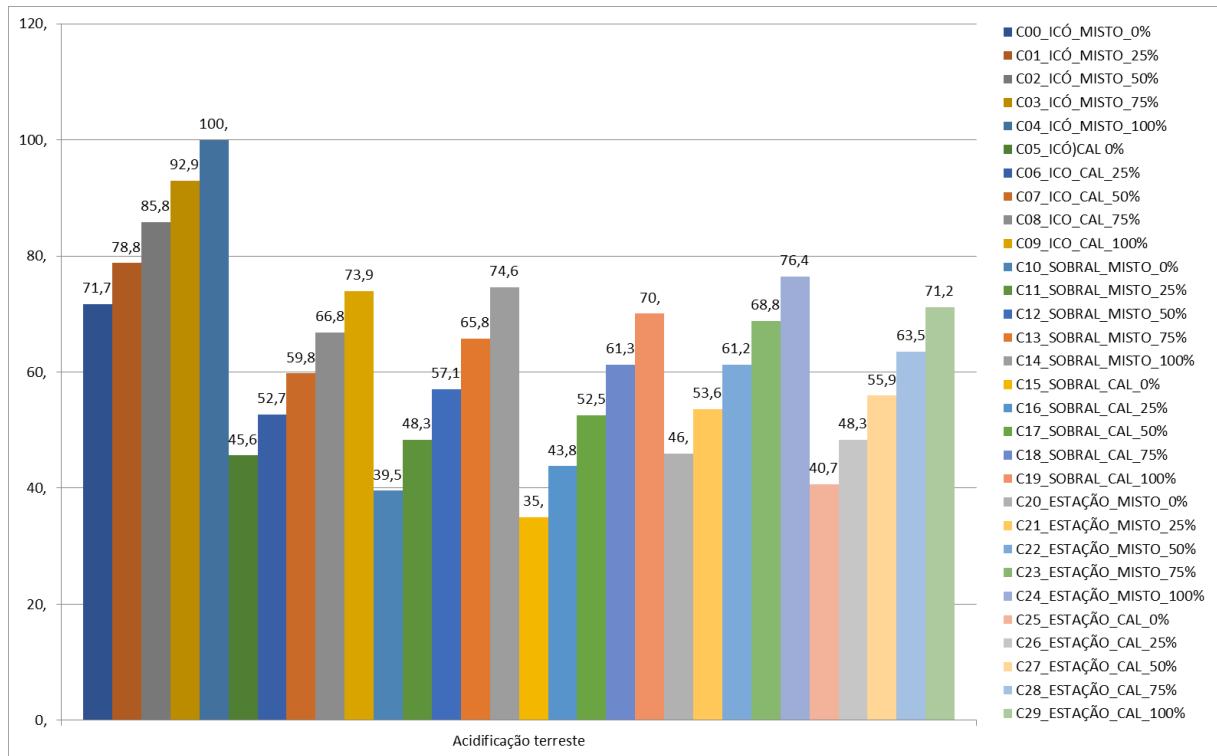
Da comparação entre as cidades, Icó apresenta os maiores valores relativos, uma vez que se observa que a proporção do impacto ambiental causado é diretamente proporcional ao teor de aglomerantes na mistura. Ainda, por possuir a maior quantidade de cimento como aglomerante entre os cenários propostos nas três cidades, os resultados superiores para essa edificação são justificados.

As edificações das cidades de Sobral e Fortaleza obedecem a um mesmo padrão de impactos. As argamassas com presença de RCD possuem um maior valor relativo devido aos impactos de transporte. As argamassas de cal possuem um menor valor relativo devido à influência do cimento nos impactos finais.

O maior impacto é o causado pelo cenário C04 que possui cimento e 100% do agregado RCD na cidade de Icó e, o menor valor relativo, 31,7% é a argamassa de cal sem adição de RCD. Estes dados apontam para a tendência de resultados já discutida.

A Figura 18 apresenta os resultados da acidificação terrestre. Em paralelo ao observado nas categorias anteriores, Icó possui maior valor relativo analisando todos os cenários como um conjunto. As cidades de Sobral e Fortaleza possuem comportamento paralelo.

Figura 18 - Categoria de impacto acidificação terrestre

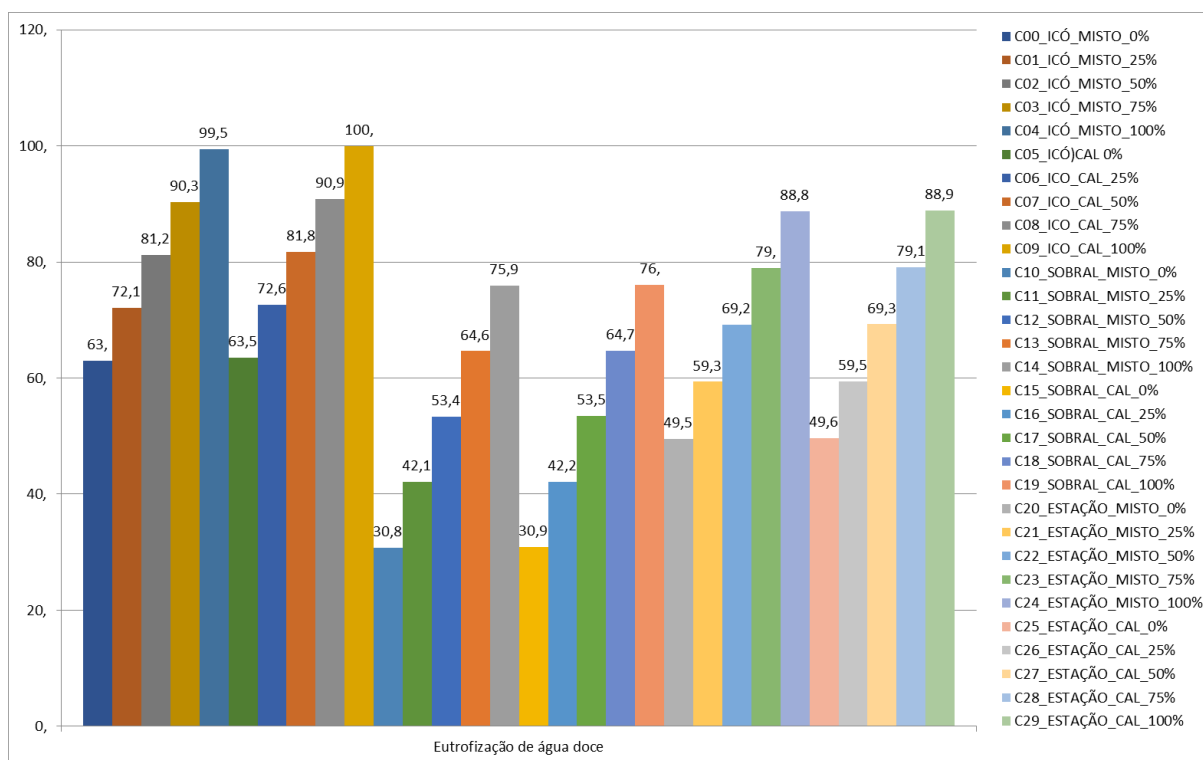


Fonte: Autora (2021)

O maior valor relativo ainda se atribui ao cenário C04 e o menor valor relativo ao cenário C15. Essa categoria de impacto possui as mesmas características relacionadas as anteriores. De maneira geral, nas três cidades, as argamassas com maior presença de RCD (100% de substituição) impactam mais, devido a combustão gerada pelo transporte. Ainda a queima da matéria prima que forma o clínquer para a fabricação do cimento e calcinação da cal apresenta impactos no desempenho ambiental das mesmas.

A Figura 19 contempla a categoria de impacto eutrofização de água doce. Esta categoria mantém a tendência dos resultados das anteriormente analisadas, entretanto, segundo a análise de contribuição a cal é a principal entrada que impacta no desempenho ambiental dessas argamassas.

Figura 19 - Categoria de impacto eutrofização de água doce



Fonte: Autora (2021)

A preponderância da cal é evidenciada no cenário que mais impacta. O C09, que é argamassa de cal de Icó com 100% do agregado miúdo RCD. A calcinação é o processo determinante neste valor de impacto e, o transporte também tem um grande impacto relativo no processo. Ainda, o valor da C04, 99,5%, é explicado uma vez que o cimento possui a segunda maior contribuição e este estar utilizado em conjunto com a cal.

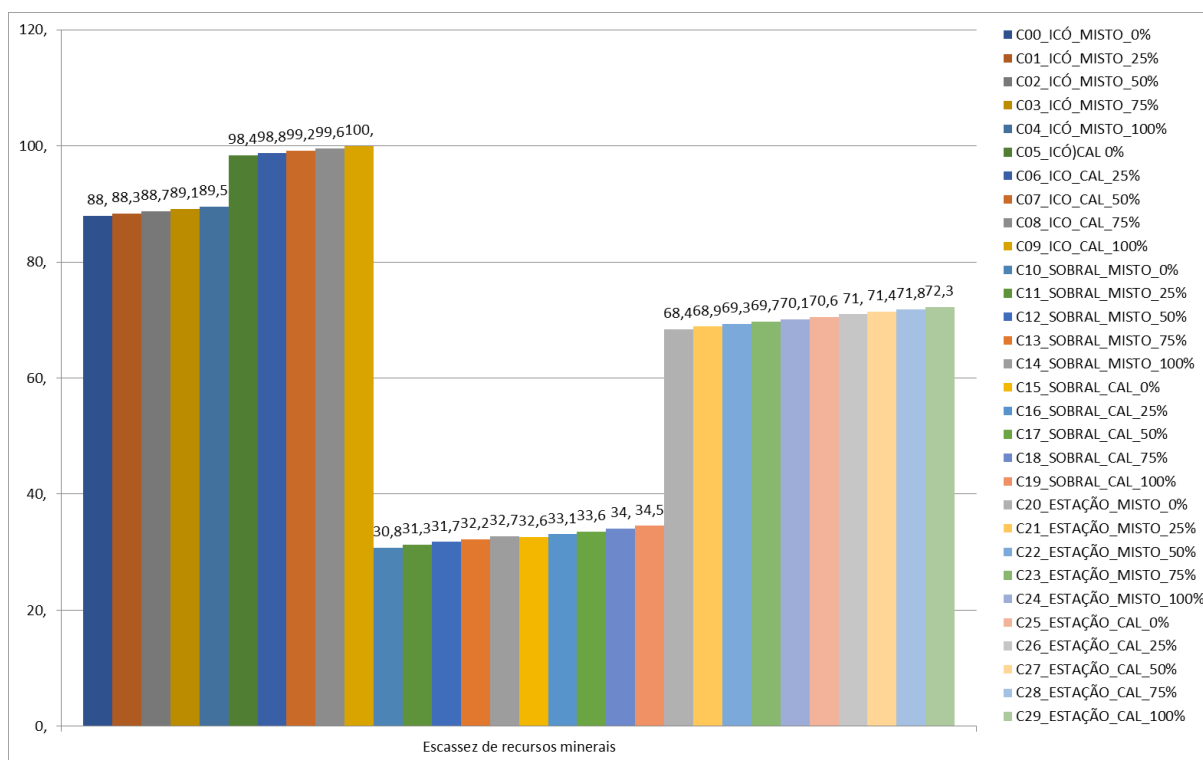
O menor valor relativo é o do C10 que é da cidade de Sobral com argamassa mista sem adição de RCD. A cidade de Sobral apresenta a particularidade de possuir mais de 93% de todos os cenários de agregado, logo, o consumo de cal é o menor dentre as três cidades convergindo para um menor impacto nessa categoria.

Sobral apresenta, de maneira geral, os menores valores relativos visto que o teor de aglomerantes da mistura é menor que 8%, e sua constituição majoritária ser de agregados.

Os resultados da edificação da Estação João Felipe, em Fortaleza apresentam-se intermediários nos valores relativos. Isso mostra conformidade com a análise descrita anteriormente onde o teor de aglomerantes é decisiva na quantidade de impactos gerados.

A Figura 20 apresenta a categoria de impacto escassez de recursos minerais. A tendência dos resultados encontrados é totalmente diferente das demais categorias analisadas.

Figura 20 - Categoria de impacto escassez dos recursos minerais



Fonte: Autora (2021)

A cidade de Icó claramente possui maiores valores relativos de impacto, seguida por Fortaleza e, por fim, Sobral. O consumo de recursos minerais, segundo a análise de contribuição, é influenciado pela cal, cimento e por fim agregados. Tal análise corresponde fidedignamente aos resultados encontrados.

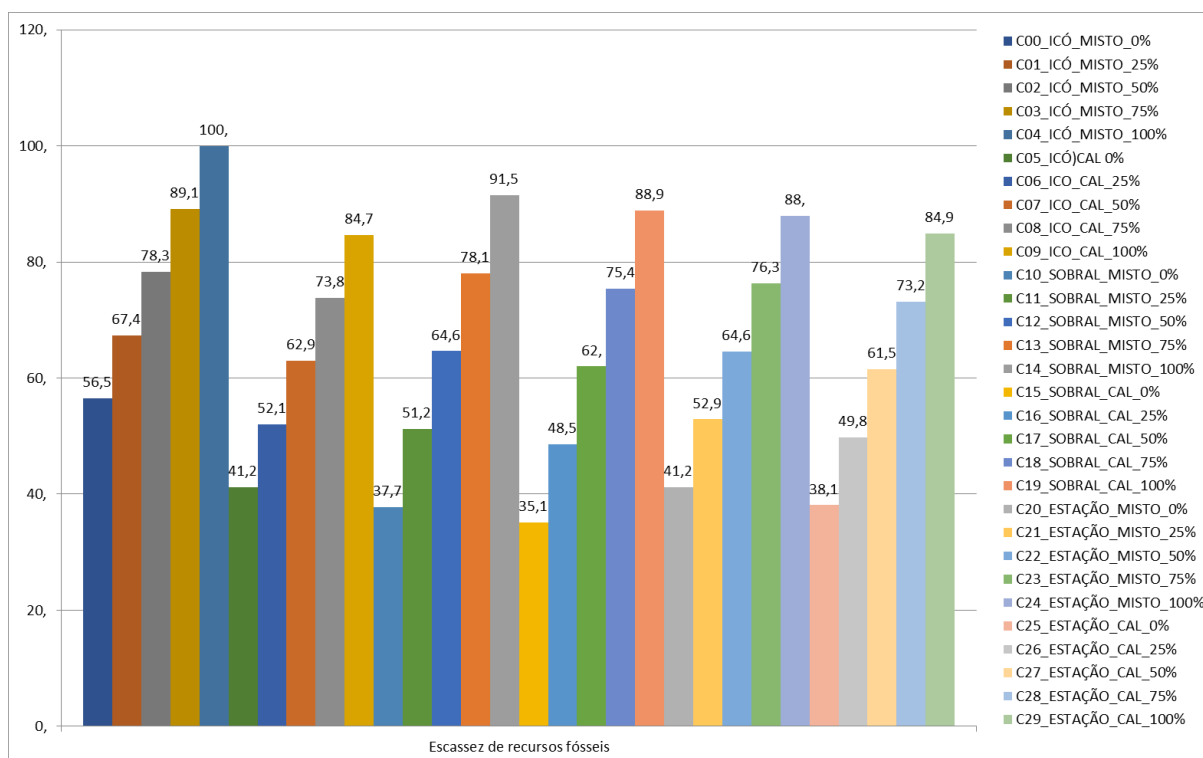
A preponderância de Icó explica-se com o maior uso de aglomerantes e menor uso de agregados relativamente. Ainda, o C09 apresenta o maior valor relativo sendo argamassa de cal com 100% de RCD. O RCD contribui uma vez que o transporte também influencia nessa categoria.

O valor mediano de Estação, explica-se por apresentar valores de aglomerantes intermediários entre as três argamassas estudadas. E, a tendência de crescimento é diretamente proporcional ao maior uso de agregado reciclado e uso de cal.

Sobral nessa categoria de impacto possui baixos valores relativos devido ao baixo teor de aglomerantes em sua constituição.

A Figura 21 apresenta a categoria de impacto de escassez dos recursos fósseis diretamente influenciada pela combustão dos combustíveis fósseis nos processos de obtenção das matérias primas.

Figura 21 - Categoria de impacto escassez dos recursos fósseis



Fonte: Autora (2021)

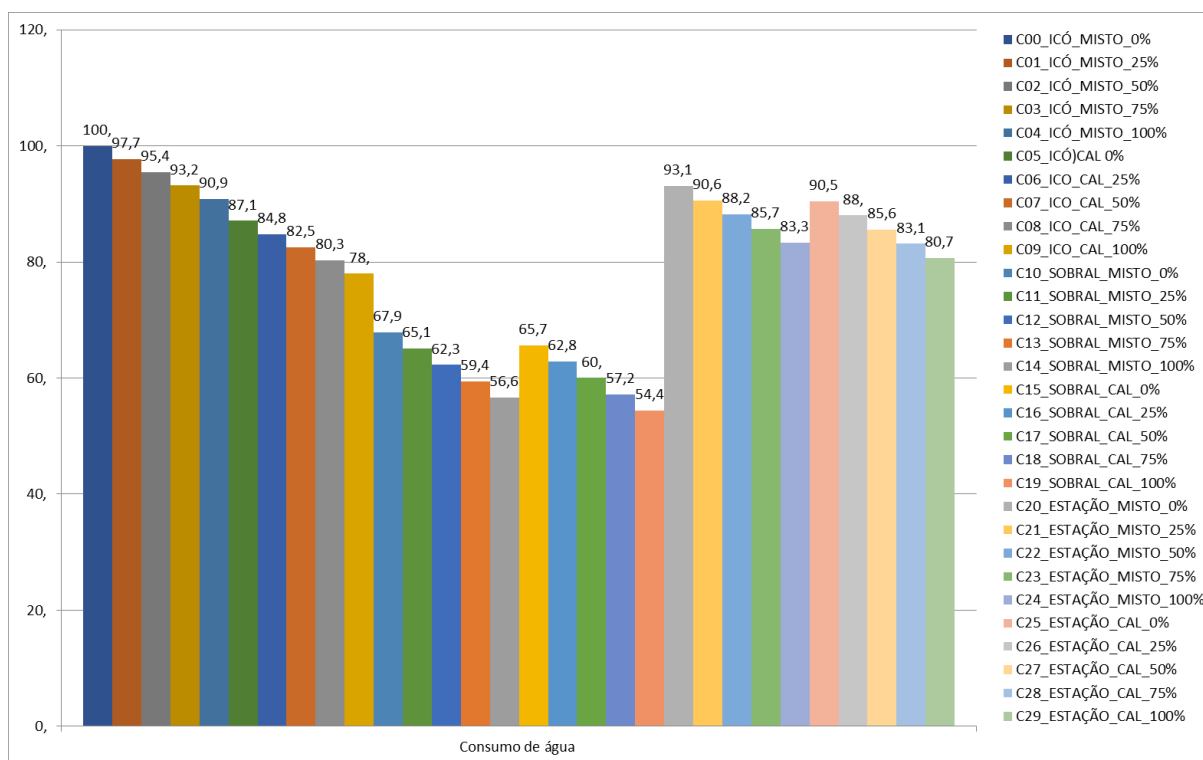
Novamente, C04 apresenta os maiores valores relativos e C15 os menores. Vale ressaltar que a queima da matéria prima do cimento para a formação do clínquer consome muito combustível, os cenários que o possuem em sua constituição impactam mais para essa categoria. A calcinação do calcário também impacta, logo as argamassas com maiores teores de aglomerantes também tem um maior impacto.

Ainda, os cenários que o RCD está presente há um acréscimo gradativo nos impactos relativos diretamente proporcional ao seu teor de substituição. Ou seja, os cenários que possuem 100% de substituição evidenciam maiores impactos visto que o processo de queima de combustível no transporte do material, que é a única entrada do inventário desse constituinte, também impacta significativamente nessa categoria.

Comparando as cidades, o desempenho ambiental pode-se considerar paralelo nas três cidades em estudo. Icó, de maneira geral apresenta maiores valores relativos, e Sobral e Fortaleza valores quase equiparados.

A categoria consumo de água está expresso na Figura 22. Há uma tendência de resultados onde argamassas com menor teor de RCD impactam mais, ou sejam, a areia é o fator determinante nesse cenário.

Figura 22 - Categoria de impacto consumo de água



Fonte: Autora (2021)

Nos resultados relativos, a cidade de Icó apresenta gráfico com padrão diferente das demais cidades. Tal fato explica-se que, por se tratar de valores relativos, essa tendência ao comparar com os demais cenários sofra alteração.

As cidades de Sobral, segue a tendência padrão e apresenta menor impacto visto que a quantidade de aglomerante é menor. Na análise de contribuição, os aglomerantes apresentam mais de 50% da contribuição. Todos seus valores estão na casa dos 60% de influência relativa.

Os valores da edificação da Estação obedecem ao padrão de decréscimo de influência ao passo que se aumenta o uso do RCD. Ainda, como possui valores intermediários de aglomerante entre as três cidades, seus valores relativos também se encontram nesse patamar.

6 CONCLUSÃO

Com os dados da pesquisa apresentados e debatidos conclui-se os objetivos desse estudo foram atendidos.

Da etapa de reconstituição das argamassas conclui-se que o método do IPT selecionado para o estudo é válido, uma vez que os resultados estão em paralelo com os dados da bibliografia. Ainda, entende-se que para uma análise mais assertiva dos resultados e validação do método para argamassas históricas, ensaios complementares, como fluorescência de raios X, são necessários em fase de pesquisa para verificar e comparar à análise química.

As argamassas em estudo são argamassas de cal e o teor de SiO_2 presente nos ensaios provém, provavelmente, de algum outro componente com propriedades pozolânicas que, devido à época de construção destas não possuir registros, não é possível identificar com exatidão.

Também, para a elaboração do traço da argamassa de reparo a ser utilizada em obra, a caracterização física dos agregados é necessária. Ensaio de granulometria, massa específica e massa unitária necessitam ser feitos. A areia e RCD também devem ser submetidos aos outros ensaios de caracterização física dos agregados, principalmente absorção de água, para um melhor entendimento do desempenho desses materiais no compósito e correto delineamento dos traços produzidos.

Da avaliação do desempenho ambiental por meio da ACV da produção de argamassas de cal, mistas e com adição de RCD, conclui-se que, ambientalmente, o uso do RCD é favorável diminuindo os impactos ambientais.

A areia impacta diretamente no desempenho ambiental dessas argamassas. A etapa de transporte é preponderante e, também, a etapa de extração. Logo, a substituição desta por RCD apresenta uma boa saída para atenuar os impactos ambientais gerados desde que o desempenho mecânico não seja afetado.

O uso do cimento impacta em todas as categorias de impactos de maneira significativa, apesar de seu teor de adição nesse estudo não ser superior a 4% em nenhum dos cenários. Logo, recomenda-se a não utilização deste material para a produção dessas argamassas, uma vez que, por se tratar de um substrato com argamassa de cal, a presença de cimento na mistura não favorece a compatibilização das fases. Ainda, recomenda-se uma nova busca na literatura a fim de que, se necessário, adicionar algum componente com propriedades pozolânicas.

A água de amassamento da produção das argamassas possui impacto mínimo nas análises. Logo, a relação aglomerante/agregado deve partir dos critérios de trabalhabilidade e desempenho mecânico dos compósitos. Logo, para uma futura reprodução desse estudo, entende-se a necessidade de calcular uma quantidade de água a favorecer o desempenho do compósito levando em conta as características físicas dos agregados a serem utilizados, pois o RCD tende a absorver mais água por possuir uma estrutura mais porosa e a areia não necessita dessa absorção.

Da análise comparativa entre as cidades de Icó, Sobral e Fortaleza, conclui-se que as três apresentam convergência nos resultados, visto que, os teores variam, mas seguem uma mesma linha de proporção. Logo, as construções seguem uma mesma linha nos traços utilizados em suas argamassas de revestimento. Ainda, sobre o desempenho ambiental destas, os resultados para todas as categorias de impacto conversam entre si, obedecendo a mesma linha de pensamento.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, D; ROSSELOT, K. **Pollution prevention for chemical processes**. New York: John Wiley & Sons, 1997.
- ALVES, Pedro. LIMA, Nicole. **Estação João Felipe e Praça da Estação: conheça a história do berço da ferrovia em Fortaleza**. Metrofor. Disponível em: < <https://www.metrofor.ce.gov.br/2018/04/24/%E2%80%8Bestacao-joao-felipe-e-praca-da-estacao-conheca-a-historia-do-berco-da-ferrovia-em-fortaleza/>>. Acesso em: 01 set 2021.
- ÂNGULO, Sérgio Cirelli. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição de reciclados e a influência de sus características no comportamento mecânico de concretos**. / S.C. Ângulo. – São Paulo, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040** Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida: Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009. 21 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14041**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Definição de objetivo e escopo e análise de inventário. 2004a. 25 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14042**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Avaliação do impacto do ciclo de vida. 2004b. 17 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14043**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Interpretação do ciclo de vida. 2005. 19 p.
- BAUER, E. (Ed.) **Revestimento de argamassa: características e peculiaridades**. Brasília: LEM- UnB; SINDUSCON, 2005.
- BRANDI, Cesare. **Teoria da restauração**. Ateliê editorial, 2004.
- CAJADO, F. R. C. **Importância do uso de argamassa de cal na restauração de fachadas revestidas por azulejos fabricados no final do século XIX e início do século XX**. UFRGS. Porto Alegre, RS. 2016
- CARASEK, Helena; CASCUDO, Oswaldo. **Descolamento de Revestimentos de Argamassa Aplicados sobre Estruturas de Concreto–Estudos de casos brasileiros**. In: Lisboa: 2º Congresso Nacional de Argamassa de Construção. 2007.
- CHAVELIER, J.L.; LE TENO, J.F. **Requirements for na LCA-based model for the evaluatin of the environmental quality of building products**. *Building and Environment*, vol. 31(5), pp. 487-91, 1996.
- CORINALDESI, V. **Mechanical behavior of masonry assemblages manufactured with recycled-aggregate mortars**. *Cement & Concrete Composites*, v. 31, p. 505-510, 2009.

DE SOUZA, M. A.; RIBEIRO, D. V.; SANTIAGO, C. C. **PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DAS ARGAMASSAS DE CAL ADITIVADAS COM GRUDE DE GURIJUBA.**

DESMISTIFICANDO AS CATEGORIAS DE IMPACTO: ACIDIFICAÇÃO.
<<https://acvbrasil.com.br/artigo/desmistificando-acidificacao>> Acesso em: 20 SET 2021.

DESMISTIFICANDO AS CATEGORIAS DE IMPACTO: EUTROFIZAÇÃO.
<<https://acvbrasil.com.br/artigo/desmistificando-eutrofizacao>> Acesso em: 20 SET 2021.

EUROPEAN COMISSION. **Directorate General XII for Science, Research andDevelopment. Environmental impact of buildings: application of the life cycleanalysis to buildings.** Paris: Center for Energ y Studies, 1997. 145 p. Disponível em:<http://www.cenerg.ensmp.fr/francais/themes/cycle/html/11.html>.

FELIPE, JOÃO. **ESTAÇÃO JOÃO FELIPE É DESATIVADA PARA EMBARQUES E DESEMBARQUES.** OPOVO ONLINE. Disponível em: <<https://www20.opovo.com.br/app/opovo/cotidiano/2014/01/11/noticiasjornalcotidiano,3189492/estacao-joao-felipe-e-desativada-para-embarques-e-desembarques.shtml>> Acesso em: 11 MAR 2018.

FERREIRA, M. A. A. M. **O Desenvolvimento Regional do Mato Grosso do Sul: O Caso do Cimento.** 1999. 206f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 1999

Fortaleza – **Estação Ferroviária** Dr. João Felipe. Ipatrimônio. Disponível em: <<http://www.ipatrimonio.org/fortaleza-estacao-ferroviaria-dr-joao-felipe/#/map=38329&loc=-23.502764797315724,-406.72923088073725,1>> Acesso em: 01 set 2021.

FRANCESCONI, L. **O Estado e o papel estratégico da indústria do cimento no Brasil.** 1996. 153f. Tese (Doutorado em Geografia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

GARCIA, Fátima. **O Excelsior é o primeiro edifício de Fortaleza.** Fortaleza em Fotos. Disponível em:< <http://www.fortalezaemfotos.com.br/>> Acesso em: 12 mar 2018.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. (organizadores). **Métodos de Pesquisa. Coordenado pela Universidade Aberta do Brasil – UAB/UFRGS e SEAD/UFRGS.** Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

História - Icó (CE). **Iphan.** Disponível em:< <http://portal.iphan.gov.br/pagina/detalhes/1416/>>. Acesso em: 01 set 2021

História. **Prefeitura de Sobral.** Disponível em: < <https://www.sobral.ce.gov.br/a-cidade/historia> > Acesso em: 01 set 2021.

IBRAHIM, Gabriela Delgado; PEIXOTO, José Antonio Assunção; XAVIER, Leydervan de Souza; SOUZA, Dejair pontes de. **Análise de Ciclo de Vida de sacos plásticos produzidos por reciclagem: estudo de caso em Seropédica, RJ. Anais... XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção.** ENEGEP 2007. Foz do Iguaçu, 09 a 11 de outubro de 2007.

Icó (CE). **Iphan**. Disponível em: < <http://portal.iphan.gov.br/pagina/detalhes/240> >. Acesso em: 02 set 2021.

Igreja de Nossa Senhora da Conceição do Monte. **Prefeitura de Icô**. Disponível em:< <https://www.ico.ce.gov.br/pontosturisticos.php?id=2> > Acesso em: 01 set 2021

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/TR 14047**: Environmental management – Life cycle impact assessment – Examples of application of ISO 14042 (Technical Report). Geneva: ISO copyright office, 2003. 94 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/TS 14048**: 2002: Environmental management—Life cycle assessment—Data documentation format. 2002.

JAPIASSÚ, Pammila et al. **Estudo do mecanismo de aderência de azulejos e argamassas de cal em revestimentos históricos.** 2011.

JENSEN, G. R.; JOHNSON, R. R.; MERCER, J. M. **New evidence on size and price-to-book effects in stock returns.** Financial Analysts Journal, v. 53, n. 6, p. 34-42, 1997. <<http://dx.doi.org/10.2469/faj.v53.n6.2128>

Jochem, Lidiane Fernanda. **Estudo das argamassas de revestimento com RCD: Características físicas e propriedades da microestrutura** – Florianópolis, SC, 2012. 221 p. ; 21cm

KANAN, M. I. C. **Manual de Conservação e Intervenção em Argamassas e Revestimentos à Base de Cal. Cadernos técnicos.** 8. IPHAN/Programa Monumenta, Brasília, 2008

KLÖPPFER, Walter. ISO/TR 14049. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 7, n. 1, p. 53, 2002.

KÜHL, Beatriz Mugayar. **Notas sobre a Carta de Veneza. Anais do Museu Paulista: História e Cultura Material**, v. 18, p. 287-320, 2010.

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com resíduos de concreto e alvenaria.** Tese (Doutorado). Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, 2002.

LIMA, J. A. R. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos.** Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. Departamento de Arquitetura e Urbanismo. São Carlos - SP, 1999.

MARQUES, Ana Isabel et al. **MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO DE ARGAMASSAS. CONSTRUINDO**, v. 11, n. 03, p. 63-78, 2019.

MARQUES DE JESUS, C. R. **Análise de Custos para Reabilitação de edifícios para Habitação**. 2008. São Paulo. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MARQUES, S. M. F. **Estudo de Argamassas de Reabilitação de Edifícios Antigos**. 2005. 148f. Dissertação Mestrado – Universidade de Aveiro, Portugal.

METHA, Kumar P.; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto - Estrutura, propriedades e materiais**, Ed. Pini, São Paulo, 1994.

MOROPOULOU, A; Bakolas, A.; Anagnostopoulou, S. **Composite Materials in Ancient Structures. 2004. Cement e Concrete Composites**. ISSN 0958-9465. 2005, vol. 27, nº 2, pp. 295-300.

MOTOYAMA, S. **Tecnologia e industrialização no Brasil: uma perspectiva histórica**. São Paulo: Unesp/ Ceeteps, 1994.

NAKIC, D. **Environmental evaluation of concrete with sewage sludge ash based on LCA. Sustainable Production and Consumption**. Amsterdam, v. 16, 193-201, 2018. DOI:10.1016/j.spc.2018.08.003

NASCIMENTO, Claudia Bastos do et al. **Método de caracterização de argamassas históricas: proposição e estudos de caso. Jornada de Técnicas de Restauración y Conservación del Patrimonio**, v. 1, 2009.

PEDROZO, R. F. E. **Influência da substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado fino em propriedades de argamassas e concretos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis – SC, 2008.

POON, C. S.; CHAN, D. **The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong. Resources Conservation and Recycling**, v. 50, n. 3, p. 293- 305, 2007.

PUCCIONI, S. **Restauração estrutural, uma metodologia de diagnóstico**. Rio de Janeiro. Dissertação (Mestrado) - FAU-UFRJ. 1997

QUARCIONI, Valdecir Angelo; CINCOTTO, Maria Alba. **Reconstituição de traço de argamassas: atualização do método IPT**. 1998. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

RECENA, Fernando Antonio Piazza. **Conhecendo argamassa**. Edipucrs, 2007.

RODRIGUES, P. N. **Caracterização das argamassas históricas da ruína de São Miguel Arcanjo/RS**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

ROSA, Paulo Jorge Pereira da. **Caracterização de Argamassas Históricas do Convento de Cristo – Tomar**. 2016. 216 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Química, Universidade de Lisboa, Campo Grande, 2016.

SANTIAGO, Cybele Celestino. **O estudo dos materiais de construção em textos antigos para apoiar a conservação/restauração**. ANAIS DO XI CONGRESSO DA ABRACOR – RIO DE JANEIRO – RJ 2002.

SILVA, A. Santos et al. **Mineralogical and chemical characterization of historical mortars from military fortifications in Lisbon harbour (Portugal)**. Environmental Earth Sciences, v. 63, n. 7, p. 1641-1650, 2011.

SENRA, Fernanda Oliveira; CASTRO, Nuria Fernandez; RIBEIRO, Roberto Carlos da Conceição. **Caracterização das argamassas do Jardim das Princesas do Museu Nacional da Quinta da Boa Vista**, RJ. 2017.

SNIC. **Sindicato Nacional da Indústria de Cimento**. Rio de Janeiro, 2009. v.1. Disponível em: <http://www.snic.org.br/pdf/relat2009-10web.pdf> . Acesso em: 10 ago. 2018.

SOARES, S. R.; SOUZA, D. M.; PEREIRA, S. W. **Avaliação do ciclo de vida no contexto da construção civil**. In: SATTler, M. A.; PEREIRA, F. O. R. (Eds). **Construção e meio ambiente**. Porto Alegre, 2006. p. 97-127. (Coletânea Habitare; 7). Disponível em: < http://www.habitare.org.br/arquivosconteudo/ct_7_cap4.pdf> Acesso em: 30 ago 2021.

Sobral (CE). **Iphan**. Disponível em:<<http://portal.iphan.gov.br/pagina/detalhes/242>>. Acesso em: 01 set 2021.

SUZIGAN, W. **A indústria Brasileira: origens e desenvolvimento**. São Paulo: Brasiliense, 1986.

TORRACA, Giorgio. **Lectures on Material Science for Architectural Conservation**. Los Angeles: The Getty Conservation Institute, 2009.

VEIGA, M. R.; AGUIAR, J. A; CARVALHO, F. **Methodologies for characterisation and repair of mortars of ancient buildings. Proceedings of the 3 International Seminar on Historical Constructions**, Guimarães, 2001.

VEIGA, M. R. **Argamassas para revestimento de paredes de edifícios antigos. Características e campo de aplicação de algumas formulações correntes**. Atlas do 3º ENCORE, Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios. Lisboa, LNEC, Maio de 2003.