

**RESÍDUOS DA INDÚSTRIA CERÂMICA (RIC) DO DISTRITO FEDERAL COMO
MATERIAL POZOLÂNICO: CARACTERIZAÇÃO E CICLO DE VIDA**

FLÁVIA RIBEIRO DE MORAES

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ESTRUTURAS
E CONSTRUÇÃO CIVIL

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

BRASÍLIA / DF: NOVEMBRO – 2020

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**RESÍDUOS DA INDÚSTRIA CERÂMICA (RIC) DO DISTRITO
FEDERAL COMO MATERIAL POZOLÂNICO: CARACTERIZAÇÃO E
CICLO DE VIDA**

FLÁVIA RIBEIRO DE MORAES

ORIENTADOR: JOÃO HENRIQUE DA SILVA RÊGO

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

BRASÍLIA / DF: NOVEMBRO – 2020

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**RESÍDUOS DA INDÚSTRIA CERÂMICA (RIC) DO DISTRITO FEDERAL
COMO MATERIAL POZOLÂNICO: CARACTERIZAÇÃO E CICLO DE
VIDA**

FLÁVIA RIBEIRO DE MORAES

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

Prof. João Henrique da Silva Rêgo, Dr. (UnB)
(Orientador)

Prof^a. Valdirene Maria Silva Capuzzo, Dr^a. (UnB)
(Examinadora interna)

Matheus Ian Castro Sousa (UnB)
(Examinador externo)

BRASÍLIA/DF, 19 DE NOVEMBRO DE 2020

FICHA CATALOGRÁFICA

MORAES, FLÁVIA RIBEIRO DE

Resíduos da Indústria Cerâmica (RIC) do Distrito Federal como Material Pozolânico: Caracterização e Ciclo de Vida [Distrito Federal] 2020.

i, 73p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2020)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|-----------------------------------|------------------------------------|
| 1. Resíduos da Indústria Cerâmica | 2. Material Cimentício Suplementar |
| 3. Pozolanas | 4. Avaliação do Ciclo de Vida |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (Bacharel) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MORAES, F.R. (2020). Resíduos da Indústria Cerâmica (RIC) do Distrito Federal como Material Pozolânico: Caracterização e Ciclo de Vida. Monografia de Projeto Final II em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 73p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTORA: Flávia Ribeiro de Moraes.

TÍTULO: Resíduos da Indústria Cerâmica (RIC) do Distrito Federal como Material Pozolânico: Caracterização e Ciclo de Vida.

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil ANO: 2020

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final II e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final II pode ser reproduzida sem a autorização por escrito da autora.

Flávia Ribeiro de Moraes
Rua 7, Casa 29 - Metropolitana.
CEP: 71.730-170 Núcleo Bandeirantes – DF – Brasil
e-mail: f.ribeirodm@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e ao meu irmão pelo apoio dado durante toda a minha vida e especialmente neste período de conclusão de curso, sempre confiando no meu potencial e me mantendo no melhor caminho possível. Vocês são meu alicerce.

Ao professor orientador João Henrique da Silva Rêgo por acreditar na minha capacidade desde o início, me guiar não apenas no desenvolvimento dos estudos como também academicamente e por me oferecer oportunidades inestimáveis.

Aos alunos orientados pelo Prof. João, Jayme e Matheus, por terem me auxiliado durante a fase experimental e me dado orientações sobre o projeto final.

Aos amigos de longa e curta data, por me apoiarem e incentivarem, mesmo nos momentos mais difíceis. À todos que ficaram felizes com minhas conquistas e me apoiaram nas fases turbulentas, nunca me deixando cair.

Aos colegas da Universidade de Brasília, principalmente aos meus colegas de turma, por todos momentos que compartilhamos juntos desde o primeiro dia de aula. Vocês estarão pra sempre comigo. Tenho orgulho de cada um de vocês e do que nos tornamos.

RESUMO

O impacto econômico e ambiental gerado pela cadeia de produção da indústria do cimento, principalmente no que concerne ao processo de fabricação do clínquer, impulsionou o desenvolvimento de pesquisas acerca de materiais cimentícios suplementares (MCS's) a serem utilizados como substituição parcial do clínquer. A utilização de resíduos industriais cerâmicos (RIC's) como MCS's em cimentos, concretos e argamassas tem sido estudada por vários pesquisadores, que procuram atestar sua qualidade e garantir que o material possa ser utilizado como material pozolânico. Este trabalho teve como objetivo buscar RIC's, especificamente blocos e tijolos cerâmicos, em indústrias na região do Distrito Federal e entorno, caracterizá-las experimentalmente e fazer uma avaliação de ciclo de vida simplificada, buscando inserir esses materiais em uma cadeia industrial de cimento e verificar a variação nas emissões de CO₂. Por meio de moagens experimentais e análises granulométricas preliminares determinou-se um tempo de moagem igual a 5h para o beneficiamento das amostras. A caracterização foi feita por meio de ensaios de espectrometria por fluorescência de raios-X, difração de raios-X e granulometria a laser. A partir desses ensaios foi possível observar que as características analisadas estão em conformidade com a NBR 12653:2014 no que diz respeito aos critérios de classificação de pozolanas. Para a Análise de Ciclo de Vida Simplificada foram utilizados o Método Matrix MET em associação ao Método QE-CO₂, resultando em uma forma de analisar qualitativa e quantitativamente os impactos da inserção dos RIC's na cadeia produtiva do cimento Portland, no que diz respeito às emissões de CO₂. Os resultados estiveram de acordo com a literatura: o uso de MCS, de fato, reduz as emissões de CO₂ em até 20% no processo de fabricação do cimento Portland, principalmente em decorrência da redução na quantidade de clínquer utilizado. Outro resultado observado foi que a utilização de RIC's como substituição da argila calcinada reduziu em cerca de 14% as emissões de CO₂.

Palavras-chave: Materiais Cimentícios Suplementares (MCS), Resíduos da Indústria Cerâmica (RIC), pozolanas, Avaliação de Ciclo de Vida Simplificada (ACV), CO₂.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	1
1.1. MOTIVAÇÃO	3
1.2. JUSTIFICATIVA.....	4
1.3. OBJETIVOS.....	4
1.3.1. Objetivo Geral	4
1.3.2. Objetivos Específicos	4
1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	5
CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1. CIMENTO.....	6
2.2. MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES (MCS)	7
2.3. POZOLANAS	8
2.3.1. Histórico das Pozolanas.....	9
2.3.2. Classificação das Pozolanas	10
2.3.3. Atividade Pozolânica e Efeitos Físicos	13
2.4. RESÍDUO DA INDÚSTRIA CERÂMICA – RIC	16
2.4.1. Tipos de Resíduo da Indústria Cerâmica.....	18
2.4.2. Resíduo da Indústria Cerâmica como Material Pozolânico	19
2.5. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA SIMPLIFICADO (MÉTODO MET e MÉTODO QE-CO ₂).....	22
2.5.1. Termos utilizados	24
2.5.2. Etapas de uma Avaliação de Ciclo de Vida Simplificada (Método MET).....	25
CAPÍTULO 3: PROGRAMA EXPERIMENTAL	26
3.1. ESCOLHA DAS OLARIAS	26
3.2. COLETA DE MATERIAIS	28

3.3. CONTROLE DE QUALIDADE DAS OLARIAS	36
3.4. IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS	38
3.5. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	39
3.6. ETAPA DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	39
3.6.1. – Espectrometria por fluorescência de raios-X	40
3.6.2. – Difração de raio-X.....	40
3.6.3. - Granulometria por raio laser	41
3.7. ETAPA DE ANÁLISE DO CICLO DE VIDA	42
3.7.1. – Definição do escopo	42
3.7.2. – Análise do Inventário de Ciclo de Vida (IVC).....	45
3.7.3. – Construção da matriz MET	46
3.7.4. Interpretação	46
CAPÍTULO 4: RESULTADOS E ANÁLISES.....	48
4.1. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	48
4.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	50
4.2.1. Espectrometria por fluorescência de raios-X	50
4.2.1. Difração de raio-X.....	52
4.2.2. Granulometria por raio laser.....	53
4.3. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA SIMPLIFICADA (MÉTODO MET E MÉTODO QE-CO ₂).....	55
CAPÍTULO 5: CONCLUSÃO	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

LISTA DE TABELAS, GRÁFICOS E QUADROS

Item	Página
Tabela 1 – Classificação, composições e características dos MCS's para concreto	10
Tabela 2 – Exigências químicas para cada classe de pozolanas	12
Tabela 3 – Exigências físicas para cada classe de pozolanas	12
Tabela 4 – Determinação do índice de desempenho de materiais pozolânicos para cada classe de pozolanas	12
Tabela 5 – Matriz MET genérica	23
Tabela 6 – Controle de qualidade das olarias estudadas.....	37
Tabela 7 – Características granulométricas para diferentes tempos de moagem	48
Tabela 8 – Material retido na peneira 45 µm para diferentes tempos de moagem	49
Tabela 9 – Caracterização química por meio de FRX	50
Tabela 10 – Comparação dos teores de óxidos encontrados com a NBR 12653	51
Tabela 11 – Características granulométricas para as amostras de RIC's	54
Tabela 12 – Porcentagem de material retido na peneira 45 µm para cada RIC	55
Tabela 13 – Materiais constituintes para 1 tonelada de cimento (em quilogramas)	56
Gráfico 1 – Distribuição dos produtos cerâmicos por região do Brasil.....	17
Gráfico 2 – Emissões de CO ₂ para cimentos CP V, CP II Z e CP IV.....	60
Gráfico 3 – Emissões de CO ₂ para cimentos CP II Z e CP IV com argila e RIC.....	62
Quadro 1 – Classificação dos Resíduos Cerâmicos.....	19
Quadro 2 – Organização do Programa Experimental.....	26
Quadro 3 – Sistema de produto “do berço ao portão” da fabricação do cimento Portland	43
Quadro 4 – Matriz MET para Cimento CP V.....	58
Quadro 5 – Matriz MET para Cimento CP II Z com argila calcinada	59
Quadro 6 – Matriz MET para Cimento CP IV com argila calcinada	59
Quadro 7 – Matriz MET para Cimento CP II Z com RIC	61
Quadro 8 – Matriz MET para Cimento CP IV com RIC	61

LISTA DE FIGURAS

Figuras	Página
Figura 1 – Localização das indústrias cerâmicas da região de São Sebastião	27
Figura 2 – Localização das olarias de onde foram coletados os RIC's	27
Figura 3 – Distância entre as olarias e o polo industrial cimentício do DF	28
Figura 4 – A) Tijolos maciços descartados à esquerda. B) Bloco cerâmicos descartados à direita (Olaria 3 Irmãos)	29
Figura 5 – Local de extração de argila utilizada na Olaria 3 Irmãos	29
Figura 6 – Máquina utilizada para mistura entre água e argila e moldagem dos produtos cerâmicos (Olaria 3 Irmãos)	30
Figura 7 – A) Tijolo cerâmico maciço com rebaixo. B) Bloco cerâmico de vedação com furos na horizontal	30
Figura 8 – Local de secagem dos produtos cerâmicos (Olaria 3 Irmãos)	31
Figura 9 – Forno para calcinação do material (Olaria 3 Irmãos)	31
Figura 10 – Local de depósito dos RICs descartados (Olaria Vitória)	32
Figura 11 – Local de extração de argila utilizada na Olaria Vitória	32
Figura 12 – Local de depósito das argilas utilizadas (Olaria Vitória)	33
Figura 13 – A) Máquina utilizada para mistura entre água e argila e moldagem dos produtos cerâmicos. B) Esteira pela qual os tijolos passam após serem moldados para serem levados para secagem (Olaria Vitória)	33
Figura 14 – Secagem dos produtos cerâmicos (Olaria Vitória)	33
Figura 15 – Forno para calcinação do material (Olaria Vitória)	34
Figura 16 – Tipos de material cerâmico disponíveis (Olaria Santa Fé)	34
Figura 17 – Local de extração de argila utilizada na Olaria Santa Fé	35
Figura 18 – Máquina utilizada para mistura entre água e argila e moldagem dos produtos cerâmicos (Olaria Santa Fé)	35
Figura 19 – A) Vista externa do forno. B) Vista interna do forno (Olaria Santa Fé)	36
Figura 20 – Distribuição granulométrica RIC 1 após 4h, 5h e 6h de moagem	48
Figura 21 – Resultados de Difractometria de Raios - X	52
Figura 22 – Distribuição granulométrica RIC's	54

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida;
Al_2O_3	Alumina;
C_3A	Aluminato Tricálcio;
C_4AF	Ferroaluminato Tetracálcio;
CaO	Cal;
CO_2	Gás carbônico;
<i>CPIC</i>	Cadeia Produtiva da Indústria da Construção;
C_2S	Silicato Dicálcio;
C_3S	Silicato Tricálcio;
<i>C-S-H</i>	Silicato de Cálcio Hidratado;
Fe_2O_3	Óxido de ferro;
<i>MCS</i>	Material Cimentício Suplementar;
<i>MET</i>	<i>Materials, Energy and Toxicity</i>
MgO	Magnésia;
<i>MPa</i>	Mega Pascal;
<i>RIC</i>	Resíduo da Indústria Cerâmica;
SiO_2	Silica;
SiO_3	Anidrido sulfúrico;

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é uma das principais responsáveis pela movimentação da economia em escala global, gerando de empregos, melhorando infraestrutura e ampliando mercados. Em contrapartida, o número de resíduos gerados por suas atividades e o impacto ambiental causado por sua cadeia produtiva são fatores que causam preocupação.

Segundo Blumenschein (2004, apud ROCHA, 2006):

O impacto causado pela cadeia produtiva da indústria da construção (CPIC) sobre o meio ambiente ocorre ao longo de todos os seus estágios e atividades: na ocupação de terras; na extração de matéria-prima e no seu processamento e na produção de elementos e componentes; no transporte dessa matéria-prima e de seus componentes; no processo construtivo e no produto final per se, ao longo de sua vida útil, durante as fases de uso e manutenção, até sua demolição e descarte. Ao longo de toda esta cadeia, recursos naturais são explorados, muitas vezes de forma criminal, energia é consumida indiscriminadamente e resíduos são gerados de forma excessiva e dispostos irregularmente.

Inserida no contexto da CPIC, a fabricação de clínquer (principal material constituinte dos cimentos) contribuí consideravelmente para o agravamento deste cenário, devido a sua vasta demanda por recursos energéticos e à consequente liberação de gases de efeito estufa (CO₂) para a atmosfera decorrente da descarbonatação da rocha calcária, formadora desse material.

As emissões tóxicas derivadas da produção de cimentos e concretos, analisados de forma isolada, não se apresentam em níveis tão alarmantes quanto nas cadeias produtivas do aço e do vidro. No entanto, como o concreto é o material construtivo mais consumido no mundo, sua produção em massa faz com que essa indústria seja responsável por cerca de 7% da emissão de CO₂ para a atmosfera em nível global, segundo levantamentos do CREA de Santa Catarina em estudos realizados no ano de 2013.

Para reduzir o impacto ambiental desta cadeia produtiva, diversas alternativas podem ser exploradas, sendo uma delas a procura por materiais alternativos que possam substituir parcialmente o volume de clínquer nos cimentos. Essa substituição, no entanto, ainda deve

permitir que o cimento atenda aos requisitos físicos, químicos e mecânicos presentes nas normas NBR 6118 e NBR 16697.

Esses materiais alternativos por vezes se enquadram na classe de materiais cimentícios suplementares (MCS), cuja principal característica é contribuir para o aprimoramento de propriedades de cimentos, concretos e argamassas, por meio de reações químicas que serão melhor exploradas adiante.

Segundo Juenger e Siddique (2015), o aumento do uso de MCS fez com que a porcentagem de clínquer utilizado no cimento Portland em escala mundial reduzisse de 85% em 2003 para 77% em 2010. A perspectiva é que esse marco chegue à 71% no futuro. Além disso, os autores ainda enfatizam que apesar da substituição de clínquer por MCS's em volumes de 5 a 20% seja motivada por razões econômicas ou pela possível melhoria a longo prazo das propriedades mecânicas dos cimentos e de sua durabilidade, essa substituição também se dá em decorrência da pressão externa em reduzir as emissões de CO₂ provenientes da indústria do concreto.

A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) salienta vantagens ambientais relacionadas ao uso de MCS's, tais como economia de combustíveis fósseis devido ao menor consumo de clínquer, preservação de jazidas minerais, aproveitamento de resíduos industriais que seriam descartados e a redução nas emissões específicas, como por exemplo, o CO₂. Essas melhorias serão mais ou menos significativas dependendo do tipo de cimento e do percentual de adição.

Outra alternativa encontrada para a redução do impacto ambiental causado pela CPIC é utilização dos próprios resíduos da construção civil (RCC) como MCS's. Esse processo oferece aos resíduos um destino final adequado, reduzindo o seu depósito clandestino em terrenos baldios, logradouros públicos, vias e áreas de preservação ambiental.

Enquadram-se na classe de Resíduos da Construção Civil os denominados Resíduos da Indústria Cerâmica (RIC). A aplicação de RIC's como MCS merece destaque devido a sua origem. Eles são formados por argilas (brancas ou vermelhas) que passam pelo processo de calcinação, que se baseia na queima do material à altas temperaturas até que se atinja um estado de maior resistência e coesão. Desse modo, os RIC's assemelham-se à argila calcinada (utilizada como material pozolânico em cimentos Portland), apresentando, dentre outras vantagens, a melhora nas características mecânicas dos materiais cimentícios e a redução nas emissões de CO₂ durante sua industrialização.

A Avaliação do Ciclo de Vida Simplificada (ACVS) dos RIC's como MCS's entra nesse cenário como uma forma de realizar uma análise qualitativa e quantitativa dos impactos ambientais ocasionados pela inserção desses materiais na cadeia produtiva do cimento Portland. Através desse método, é possível verificar se, de fato, o uso de resíduos da indústria cerâmica é uma alternativa ambientalmente vantajosa para a produção em larga escala de cimento.

1.1. MOTIVAÇÃO

O desenvolvimento de estudos acerca dos materiais suplementares e suas possíveis influências no cimento são de extrema relevância para a construção civil, tendo como consequência a atenuação dos impactos ambientais, além do refreamento de custos despendidos pela indústria cimentícia em decorrência da redução da incorporação de clínquer nos cimentos e concretos.

Em escala mundial, portanto, autores se dedicam a estudar se os RIC's são adequados para utilização como MCS's em cimentos Portland, do ponto de vista de propriedades mecânicas e durabilidade. Ademais, pesquisas voltadas para sustentabilidade da indústria da construção são amplamente realizadas afim de verificar se há redução na emissão de poluentes na CPIC devido a incorporação desse novo resíduo.

Outro benefício importante desses estudos é a mudança ideológica acerca do destino dado aos resíduos da construção civil, especificamente os RIC's. Uma vez que a maioria desses materiais não apresentam destinação adequada, uma alternativa é reutilizá-los para outros fins, incorporando-os ao processo de fabricação de cimentos e concretos.

A região do Distrito Federal e entorno apresenta considerável quantidade de indústrias de materiais cerâmicos, sejam eles tijolos maciços, blocos cerâmicos, placas cerâmicas ou telhas. O volume de material que é descartado pelo controle de qualidade das olarias diariamente é significativo.

Torna-se interessante, portanto, o estudo acerca da utilização desses resíduos como materiais cimentícios suplementares nas indústrias cimentícias do Distrito Federal. O enfoque da pesquisa englobou a caracterização desses materiais e a análise das emissões de CO₂ com a inserção dos mesmos dentro da CPIC.

1.2. JUSTIFICATIVA

Para que os resíduos da indústria cerâmica do Distrito Federal alcancem a sua ampla utilização por parte das indústrias de cimento locais, se faz necessário o estudo mais aprofundado destes materiais, principalmente no que concerne à sua caracterização químico-física e ao seu impacto ambiental.

Verifica-se, portanto, a necessidade de identificar as regiões nas quais esse material pode ser coletado e analisar suas características, simulando uma possível aplicação dentro da indústria cimentícia, para que ele possa, eventualmente, ser utilizado como material cimentício suplementar.

Essa pesquisa engloba três linhas de estudo já existentes da área de Materiais de Construção da Universidade de Brasília: aplicação de diferentes MCS's em cimentos (RÊGO, 2004; NEVER, 2005; PINEHIRO, 2016), o uso de materiais reciclados na indústria da construção (SOUSA, 2001; ROCHA, 2006; SANTANA, 2018) e estudos acerca de materiais cerâmicos (VASCONCELOS, 2015; MORAIS, 2007).

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo Geral

O objetivo geral do estudo em questão é caracterizar os Resíduos da Indústria Cerâmica (RIC) da região do Distrito Federal e proximidades, e, em seguida, realizar uma Avaliação do Ciclo de Vida Simplificada (ACVS) desses materiais com enfoque nas emissões de CO₂ para a atmosfera.

1.3.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do estudo são:

- Identificar regiões de onde podem ser coletados os RICs, na região do DF e entorno;
- Caracterizar os RICs coletados por meio de ensaios laboratoriais;
- Comparar, quanto às emissões de CO₂, o cimento CPV (com menor teor de adições) e os cimentos CP II Z e CP IV (com maior teor de adições).
- Comparar, quanto às emissões de CO₂, os cimentos CP II Z e CP IV com uso de argila calcinada e os cimentos CP II Z e CP IV com uso de RIC's.

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está dividido em 5 capítulos.

O Capítulo 1 introduz o leitor aos assuntos abordados no trabalho.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica do estudo que serviu de base e motivação para a pesquisa. Além disso, são apresentadas pesquisas que estudaram materiais semelhantes aos que serão utilizados neste trabalho e os resultados obtidos por eles.

O Capítulo 3 indica os locais de onde as amostras foram coletadas, além de descrever a metodologia utilizada para o beneficiamento, caracterização e construção da Análise de Ciclo de Vida Simplificada (ACVS) destes materiais

O Capítulo 4 contém os resultados dos experimentos definidos no Capítulo 3, com discussões e explicações acerca dos mesmos. A fase de interpretação do ACVS também está inclusa nesse capítulo.

O Capítulo 5 contempla as conclusões acerca da pesquisa realizada e há a sugestão de temas para futuras pesquisas dentro da área de estudo.

CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CIMENTO

O cimento é um material de construção de notória popularidade, sendo usado tanto para a produção de argamassa quanto para a produção de concreto. Segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), cerca de 54 milhões de toneladas deste produto foram produzidas no Brasil no ano de 2018, totalizando o consumo de cerca de 0,25 toneladas de cimento por habitante por ano.

A ampla utilização de materiais cimentícios e seus derivados, em escala mundial, pode ser justificada por três principais motivos (MEHTA e MONTEIRO, 2014):

- *Excelente capacidade de resistir à água:* o cimento é capaz de ser submetido à ação da água sem se deteriorar significativamente, sendo caracterizado, portanto, como um aglomerante hidráulico. Essa característica o torna material ideal para a construção de obras de controle, armazenamento e transporte de água, bem como de elementos estruturais expostos à umidade.
- *Capacidade de modelagem em formas e tamanhos variados:* a argamassa e o concreto em estado fresco apresentam alta plasticidade, comparado a outros materiais de construção, como aço, madeira, entre outros. Esse fator contribui para facilidade de deposição desse material em quaisquer tipos de fôrmas pré-fabricadas ou moldadas in loco.
- *Baixo custo e alta disponibilidade:* a maioria de seus componentes são abundantes na natureza e por serem facilmente encontrados, o custo do concreto acaba sendo reduzido. O fator de transporte do material que é responsável pelo acréscimo de seu valor monetário.

A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) define o cimento como sendo “um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob a ação de água”. É constituído por clínquer, gipsita e materiais cimentícios suplementares (MCS's).

O clínquer é um material granular rígido composto por C_3S (Silicato Tricálcico), C_2S (Silicato Dicálcico), C_3A (Aluminato Tricálcico) e C_4AF (Ferroaluminato Tetracálcico), melhor detalhados em itens posteriores. Durante a hidratação do clínquer, o C_3A reage com água de

forma imediata. Para retardar esta reação, a gipsita deve ser adicionada à mistura e, por isso, o papel desempenhado por ela é fundamental (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Os MCS's associados ao cimento são introduzidos como forma de reduzir as emissões de CO₂ dado que o processo de descarbonatação do calcário necessário para sua fabricação está atrelado à emissão química de CO₂ (FERNANDES, 2018). Alguns desses materiais podem ainda promover melhoria das propriedades do cimento, a fim de adaptá-lo às necessidades construtivas da obra.

2.2. MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES (MCS)

Os materiais cimentícios suplementares são definidos como materiais inorgânicos que contribuem para a melhoria das propriedades de uma mistura cimentícia, por meio de hidratação própria e/ou atividade pozolânica (ALI, XUAN, POON, 2019). Representam uma classe que engloba materiais com características físicas, química e mineralógicas diversas (BERNAL et al, 2016). Eles atuam substituindo parcialmente o cimento, levando, por vezes, ao aumento de seu desempenho mecânico devido ao preenchimento de vazios e redução de sua permeabilidade quando utilizados em proporções adequadas (LOTHENBACH, SCRIVENER, HOOTON, 2011).

Em relação às suas reações físicas e químicas nas pastas de cimento, Dal Molin (2011), classifica os MCS's da forma abaixo:

- *Material cimentante*: é aquele que não necessita de cálcio para gerar produtos como C-S-H, mas que apresenta auto hidratação lenta e a quantidade de produtos cimentantes formados é baixa. Dessa forma, o material não pode ser aplicado com fins estruturais. Quando utilizado como adição para cimento Portland, sua hidratação é acelerada pela presença de hidróxido de cálcio e gipsita.
- *Filer*: representa materiais finamente divididos sem atividade química, cujo principal efeito no cimento é o efeito físico de empacotamento granulométrico com pontos de nucleação para a sua hidratação.
- *Material pozolânico*: é o material rico em silicatos e aluminossilicatos em sua composição química e que não apresentam nenhuma propriedade cimentícia até serem finamente moídos e/ou sofrerem ativação térmica. A sua capacidade de melhorar as

propriedades dos cimentos está diretamente associada com a disponibilidade de hidróxido de cálcio na mistura.

2.3. POZOLANAS

Segundo a NBR 12653:2014, as pozolanas podem ser definidas como “materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si sós, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes.”

Enquadram-se na classe das pozolanas materiais derivados de rochas magmáticas e sedimentares ricas em sílica, argilas calcinadas, escórias de alto forno de siderúrgicas, cinzas silicosas de resíduos vegetais, sílica ativa, cinzas volantes e quaisquer outros subprodutos da indústria ou materiais naturais que apresentem comportamentos semelhantes (ZÁLESKA et al, 2018).

As pozolanas, sendo elas naturais ou artificiais, melhoram significativamente as propriedades dos materiais cimentícios, tais como sua resistência mecânica, permeabilidade e proteção contra o ataque de sulfatos (THOMAS e MATHEWS, 2016 apud HOSSAIN, 1998).

O aprimoramento das características de cimentos, concretos e argamassas não é a única vantagem advinda desses materiais. Benefícios ambientais são de grande relevância, principalmente no tocante à redução de emissão de CO₂ para a atmosfera.

Considerando a porcentagem total de CO₂ emitida durante a produção do cimento Portland, cerca de 60% é oriunda da descarbonatação de rochas calcárias para produção do clínquer. Com a substituição do clínquer por materiais pozolânicos, essa emissão de gases estufa pode ser reduzida em 30 a 40%, sem causar danos significativos às propriedades mecânicas e físicas do material (SKIBSTED e SNELLINGS, 2019).

As pozolanas são materiais amplamente utilizados pela indústria cimentícia. Elas possuem capacidade de melhorar propriedades mecânicas dos cimentos e minimizar os impactos ambientais negativos da indústria da construção civil, além de apresentarem vasta disponibilidade. Esses atributos justificam a ampla busca por novos materiais que se enquadrem nessa classe.

2.3.1. Histórico das Pozolanas

Manuscritos da antiguidade indicam que materiais pozolânicos eram utilizados por povoados do Mediterrâneo Oriental no período compreendido entre 500 e 400 a.C. No entanto, apesar de a civilização grega ser considerada pioneira, foram os romanos que desenvolveram o potencial deste material, associando-o com a cal para utilizá-los na construção de casas, templos e aquedutos (DRIVER et al, 2015).

A principal fonte de pozolanas do império romano era o magma endurecido proveniente da erupção do Monte Vesúvio, em 79 d.C, que ocasionou a destruição de Pompéia e cidades próximas (MALHOTRA e MEHTA, 1996).

O nome “pozolana” foi atribuído ao material em virtude de as rochas vulcânicas originadas desta erupção terem sido encontradas na região de Pozzuoli, no sul da Itália. Segundo Massazza (1993), o termo passou a ser atribuído a materiais naturais de origem vulcânica, com propriedades similares aos de Pozzuoli. Paulatinamente, a nomenclatura expandiu-se para todos os outros materiais, de origem natural ou não, que exibissem comportamento semelhante, ou seja, reagissem com hidróxido de cálcio na presença de água e à temperatura ambiente.

Civilizações antigas como a grega, a germânica, a egípcia e a hindu apresentam indícios de utilização de cimento pozolânico de origem vulcânica em suas estruturas, no mesmo período em que os romanos o utilizavam em larga escala (DRIVER et al, 2015; MALHOTRA e MEHTA, 1996). Em meados do século XIX, o cimento Portland começou a ser desenvolvido e as pozolanas deixaram de ser o principal material aglomerante, sendo utilizadas apenas material cimentício suplementar.

No Brasil, segundo o Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB), o primeiro registro de utilização da pozolana como MCS, foi durante a construção da Barragem de Jupuíá, em 1965 na cidade de Três Lagoas (MS), com a utilização de argila caulínica. O Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), em 1963, constatou que o uso de pozolonas como substituintes de cimentos com baixos teores de álcalis reduzia as chances de ocorrência da reação álcali-agregado. Devido a essa constatação e ao fato de existirem jazidas de argila caulínica (adequadas para a produção de pozolanas artificiais) em regiões próximas, a Companhia Energética de São Paulo (CESP) decidiu utilizar esse material para a construção da barragem.

Segundo Oliveira (2019), na atualidade, os materiais pozolânicos mais tradicionais utilizados como MCS são a escória granulada de alto forno (subproduto da obtenção de ferro gusa), as cinzas volantes (resíduos das termelétricas a carvão mineral) e certos materiais naturais calcinados ou não, entre outros. No entanto, tanto a indústria siderúrgica quanto a indústria termoeletrica no Brasil tem previsões de crescimento e de oferta significativamente menores que o nível de produção de cimentos e concretos. Assim, delimita-se uma barreira para o uso de escórias de alto forno e cinzas volantes.

A limitação na disponibilidade de determinados tipos de materiais pozolânicos faz com que a procura por fontes alternativas destes materiais aumente cada vez mais. Dentre estas fontes alternativas se enquadram cinzas provenientes da queima de materiais vegetais diversos (ex.: cinza de casca de arroz), Resíduos da Construção e Demolição (RCD), entre outros.

2.3.2. Classificação das Pozolanas

Para facilitar a separação e identificação dos materiais que se encaixam na classe das pozolanas, Metha e Monteiro (2014) classificaram os MCS de acordo com suas características pozolânicas, conforme o apresentado na Tabela 1. A tabela também apresenta uma descrição da composição mineralógica e característica da partícula, pois essas propriedades determinam como o MCS se comportará no concreto, não apenas sua origem e composição química.

Tabela 1 – Classificação, composição e características dos MCSs para concreto

CLASSIFICAÇÃO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA	CARACTERÍSTICAS DA PARTÍCULA
<i>Cimentantes e pozolânicas</i>		
Escória granulada de alto-forno (cimentante)	Na maior parte silicato vítreo contendo principalmente cálcio, magnésio, alumínio e sílica. Componentes cristalinos do grupo melita podem estar presentes em pequenas quantidades.	O material não-processado é da dimensão da areia e contém de 10 a 15% de umidade. Antes de ser usado, é seco e triturado em partículas menores de 45 µm (cerca de 500 m ² /kg Blaine). As partículas têm textura áspera.
Cinzas volantes com alto teor de cálcio (cimentantes e pozolânicas)	Na maior parte silicato vítreo contendo principalmente cálcio, magnésio, alumínio e álcalis. A pequena quantidade de matéria cristalina presente geralmente consiste de quartzo e C3A; cal livre e perclásio podem estar presentes; C \bar{S} e C ₄ A ₃ S \bar{S} podem estar presentes no caso de carvões com alto teor de enxofre. O carbono não queimado é menor que 2%.	O pó corresponde a 10-15% de partículas maiores de 45 µm (normalmente 300-400 m ² /kg Blaine). A maioria das partículas são esferas sólidas com diâmetro menor que 20 µm. A superfície da partícula normalmente é lisa, mas não tão limpa quanto as cinzas volantes com baixo teor de cálcio.

CLASSIFICAÇÃO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA	CARACTERÍSTICAS DA PARTÍCULA
<i>Pozolanas altamente reativas</i>		
Sílica ativa	Consiste essencialmente de sílica pura na forma não cristalina.	Pó extremamente fino, consistido em esferas sólidas de 0,1 µm de diâmetro médio (área superficial específica de cerca de 20 m ² /g, por adsorção de nitrogênio).
Cinza de casca de arroz	Consiste essencialmente de sílica pura na forma não cristalina.	As partículas normalmente são menores do que 45 µm, mas são altamente celulares (área superficial específica de 40 a 60 m ² /g, por adsorção de nitrogênio).
<i>Pozolanas comuns</i>		
Cinza volante com baixo teor de cálcio	Na maior parte silicato vítreo contendo alumínio, ferro e álcalis. A pequena quantidade de matéria cristalina presente consiste geralmente de quartzo, mulita, silimanita, hematita e magnetita.	O pó corresponde a 15-30% de partículas maiores de 45 µm (normalmente 200-300 m ² /kg Blaine). A maioria das partículas são esferas sólidas com diâmetro médio de 20 µm. Cenosferas e plerosferas podem estar presentes.
Materiais naturais	Usualmente solos vulcânicos. Além de aluminossilicatos vítreos, as pozolanas naturais contêm quartzo, feldspato, zeólitas e/ou mica.	As partículas são moídas a menos de 45 µm e têm textura áspera.
Metacaulim	Argila caulinítica calcinada em 650-800°C para aumentar a atividade pozolânica.	Pode-se nortar que MCAR (metacaulim de alta reatividade) para uso comercial está disponível nos Estados Unidos, e este material é produzido pela calcinação de uma argila caulinítica altamente pura, com subsequente moagem do produto a um tamanho de partícula muito fino (área de superfície de 12m ² /g, por adsorção de nitrogênio)
<i>Pozolanas pouco reativas</i>		
Escória de alto-forno resfriada lentamente, cinzas de forno, escória de caldeira, casca de arroz queimada em campo	Consiste essencialmente de materiais de silicato cristalino e apenas uma quantidade pequena de matéria não-cristalina.	Os materiais devem ser pulverizados em partículas de dimensões muito finas para desenvolver alguma atividade pozolânica. As partículas moídas são de textura áspera.

Fonte: Mehta e Monteiro (2014)

A NBR 12653 também estabelece outra forma relevante de classificar os materiais pozolânicos quanto a sua origem, dividindo-os em três classes:

- a) Classe N: Pozolanas de origem natural ou artificial, materiais vulcânicos, argilas calcinadas e terras diatomáceas.

b) Classe C: Pozolana gerada através da combustão de carvão mineral oriundo de usinas termoeletricas.

c) Classe E: Pozolanas não enquadradas nas classes anteriores.

As exigências físicas, químicas e de índice de atividade pozolânica, de cada uma das classes citadas anteriormente apresentam-se nas Tabelas 2 a 4 abaixo:

Tabela 2 – Exigências químicas para cada classe de pozolanas

Propriedades	Classes de material pozolânico		
	N	C	E
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ , % mín.	70	70	50
SO ₃ , % máx.	4,0	5,0	5,0
Teor de umidade, % máx.	3,0	3,0	3,0
Perda ao fogo, % máx.	10,0	6,0	6,0
Álcalis disponíveis em Na ₂ O, % máx.	1,5	1,5	1,5

Fonte: NBR-12653 (ABNT, 2014)

Tabela 3 – Exigências físicas para cada classe de pozolanas

Propriedades	Classes de material pozolânico		
	N	C	E
Material retido na peneira 45µm, % máx.	34	34	34

Fonte: NBR-12653 (ABNT, 2014)

Tabela 4 – Determinação do índice de desempenho de materiais pozolânicos para cada classe de pozolanas

Índice de Atividade Pozolânica			
	N	C	E
Com cimento aos 28 dias, em relação ao controle, % mín.	75	75	75
Com cal aos 7 dias, em MPa	6,0	6,0	6,0
Água requerida, % máx.	115	110	110

Fonte: NBR-12653 (ABNT, 2014)

2.3.3. Atividade Pozolânica e Efeitos Físicos

A capacidade das pozolanas de aprimorarem características de cimentos, concretos e argamassas está diretamente atrelada à denominada atividade pozolânica responsável por ocasionar efeitos de caráter químico em materiais cimentícios. Além disso, ainda existem efeitos de caráter físico atrelados ao tamanho diminuto das partículas de materiais pozolânicos.

- **Efeitos químicos**

Os principais óxidos constituintes do cimento Portland são: a cal (CaO), a sílica (SiO₂), a alumina (Al₂O₃), o óxido de ferro (Fe₂O₃), magnésia (MgO) e uma pequena quantidade de anidrido sulfúrico (SO₃), cuja função é retardar o tempo de início de pega da mistura.

Os quatro principais minerais do cimento são:

- C₃S (Silicato Tricálcico), abreviação do composto 3CaO.SiO₂
- C₂S (Silicato Dicálcico), abreviação do composto 2CaO.SiO₂
- C₃A (Aluminato Tricálcico), abreviação do composto 3CaO.Al₂O₃
- C₄AF (Ferroaluminato Tetracálcico), abreviação do composto 4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a reação entre o C₃A e a água ocorre de forma imediata, sendo necessária a adição de SO₃ na mistura (na forma de gipsita) para desacelerar essa hidratação e permitir a aplicação do cimento Portland nas construções. Os produtos gerados pela hidratação do C₃A são estruturalmente similares aos gerados pela hidratação do C₄AF.

O processo de retardo da reação do C₃A e do C₄AF se faz necessário para possibilitar a reação dos silicatos com a água, que ocorre horas após o início da hidratação do cimento. Esse processo apresenta como produtos os dois componentes básicos em maior quantidade no cimento Portland:

- C-S-H (Silicato de Cálcio Hidratado): representa a fase aglomerante do cimento, sendo o principal responsável pela sua resistência mecânica no estado endurecido. Segundo Mehta e Monteiro (2014), este composto ocupa 50 a 60% do volume de sólidos da pasta hidratada de cimento Portland;
- CH (Ca(OH)₂ ou hidróxido de cálcio): não contribui para a resistência do cimento e representa 20 a 25% do volume dos sólidos na pasta (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Segundo Castro (2008), a pozolona tem como sua principal característica sua capacidade de reagir e se combinar com CH, formando compostos estáveis e de poder aglomerante, como aluminatos e silicatos de cálcio hidratados (C-A-H e C-S-H, respectivamente). Dessa forma, com a incorporação de pozolana à mistura do cimento, os 20 a 25% de CH que não contribuem para o aumento de resistência mecânica, podem reagir com o MCS e resultar em uma produção extra de compostos de maior estabilidade.

Assim, a reação pozolânica foi definida por Kihara e Shukuzawa (1982) como uma instabilidade no sistema composto por cal, pozolana e água, que desencadeia uma série de reações resultando no endurecimento do mesmo, que assume alta resistência mecânica.

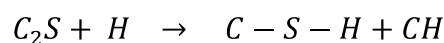
As pozolanas podem ser utilizadas tanto como substituição parcial do cimento ou como adição em proporções variáveis em relação à massa ou volume do cimento (SANTOS, 2006 apud SILVEIRA, 1996). No entanto, as diferentes formas de incorporação não interferem na reação pozolânica e os benefícios gerados são os mesmos (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A diferença principal entre o comportamento do cimento Portland e o cimento Portland pozolânico foi destacada por Mehta e Monteiro (2008) e pode ser visualizada pelas equações abaixo:

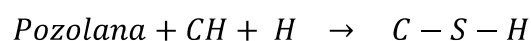
- a) Cimento Portland Comum: as principais reações de hidratação que ocorrem no cimento Portland comum estão explicitadas a seguir.



- b) Cimento Portland Pozolânico: durante a hidratação do cimento pozolânico, acontecem as mesmas reações do item anterior, no entanto, o hidróxido de cálcio gerado como produto ainda reage com o material pozolânico, gerando C-S-H.

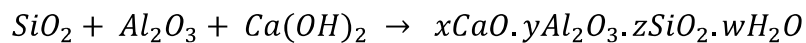
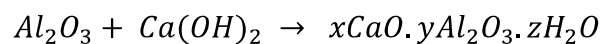
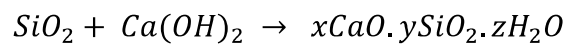


↓



A reação de formação de C-S-H para cimentos Portland comuns se dá de forma rápida enquanto a mesma reação derivada da atividade pozolânica ocorre lentamente. Segundo Dal Molim (2005), como regra prática, o calor de hidratação total produzido pelas reações pozolânicas é a metade do calor de hidratação gerado para o cimento Portland. Esse aquecimento gradativo é responsável por reduzir os índices de fissuração durante o endurecimento do concreto.

Os tipos de reações pozolânicas características, realizadas na presença de água, podem ser verificadas a seguir:



Segundo Lacerda (2010), o tipo de reação que acontecerá no sistema irá depender da composição do material pozolânico. Caso seja um material silicoso, a primeira reação é a que se desenvolve. Já no caso de um material silico-aluminoso, a terceira será a reação vigente.

Considera-se que a atividade pozolânica é maior tal qual for maior o teor de sílica amorfa no material em questão (SANTOS, 1975). No entanto, não existe um limite bem definido no teor de sílica que faça com que um material se caracterize como pozolana, estabelecendo-se apenas uma faixa de teor de SiO_2 e Al_2O_3 que pode ser considerado um indicativo preliminar de pozolanicidade.

- **Efeitos físicos**

Segundo Dal Molin (2005) e Hoffman (2001), pequenas partículas de materiais pozolânicos podem atuar como pontos de nucleação para os produtos de hidratação, resultando em um desenvolvimento inicial da resistência e evitando a formação de cristais grandes de hidróxido de cálcio com orientação preferencial na zona de transição, proporcionando um maior refinamento da estrutura de poros.

A presença de grãos menores na mistura desencadeia o aumento na relação entre volume de sólidos e o volume de água, produzindo uma pasta com maior plasticidade e coesão. O processo

de exsudação, em função da maior quantidade de finos, conseqüentemente é reduzido (LIMA, 2018)

Posicionadas na zona entre agregados, as partículas de pozolana ocupam o espaço que antes seria ocupado por água, eliminando, conseqüentemente, esse acúmulo de água livre. A mesma situação é verificada quando os MCS's se localizam na zona de transição, levando à redução da espessura dessa região, considerada a menos resistente do meio cimentício. A substituição de água livre por material pozolânico também pode ser apontada como uma forma de exsudação, ocorrendo, ademais, o aumento da probabilidade de formação de C-S-H nessas zonas. Esse processo recebe o nome de efeito microfíler (ARRUDA et al, 2018)

Outro benefício físico desses MCS's é o processo de refinamento de poros provocado pelo efeito microfíler. Esse efeito faz com que a resistência na matriz da zona de transição aumente, incitando o aumento na resistência à compressão. Assim, adições pozolânicas mais reativas também contribuem para o aumento da resistência mecânica à compressão do concreto. Os efeitos desse processo nos resultados de resistência à tração não são significativos (DAL MOLIM, 2005).

A redução do número e do tamanho dos poros existentes na matriz cimentícia em virtude da presença de pozolanas desempenha papel fundamental na redução da permeabilidade de argamassas, pastas de cimento e concretos, minimizando a taxa de deterioração em razão de ações químicas destrutivas (MEHTA e MONTEIRO, 2014). A perda de permeabilidade acarreta uma diminuição da absorção de água pela estrutura de concreto e também a redução da probabilidade de ocorrência de manifestações patológicas, visto que transcorrerá uma menor entrada de água e substâncias agressivas em seu interior (ARRUDA et al, 2018).

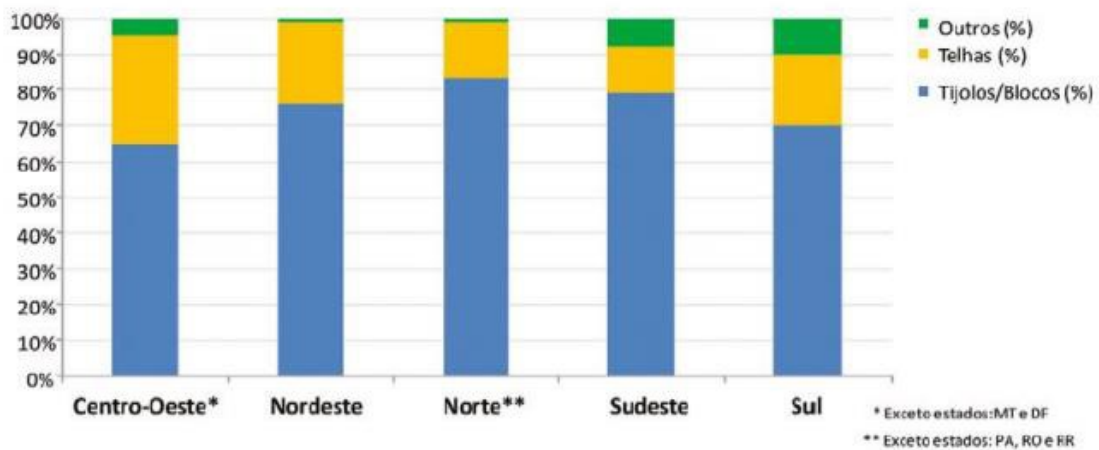
2.4. RESÍDUO DA INDÚSTRIA CERÂMICA – RIC

Segundo relatório anual da Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER) de 2018, o segmento da indústria cerâmica vermelha é o segmento responsável por mais de 90% das alvenarias e coberturas construídas do país, gerando um faturamento anual de R\$ 18 bilhões e responsável por 293 mil empregos diretos e 900 mil empregos indiretos.

Em análise dos segmentos da indústria cerâmica, o Ministério de Minas e Energia (MME) aponta que o setor da cerâmica vermelha representa 4,8% da indústria da construção civil e que esse crescimento se deu no final da década de 60, em decorrência ao início do processo de produção em escala industrial dos produtos cerâmicos para suprirem a demanda dos programas habitacionais de construção de casas populares em massa.

Os três principais produtos desse segmento industrial são os tijolos e blocos cerâmicos, as telhas e os tubos e acessórios para canalização. O Gráfico 1 mostra como o consumo deles foi distribuído entre as regiões do Brasil no ano de 2018.

Gráfico 1 – Distribuição dos produtos cerâmicos por região do Brasil



Fonte: Estudo Técnico Setorial Da Cerâmica Vermelha (ABDI - Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial).

Como todo grande ramo industrial, a indústria cerâmica é fornecedora de componentes essenciais para vários setores produtivos, no entanto, também é geradora de uma grande quantidade de resíduos. Apesar dos esforços e avanços da indústria de cerâmica vermelha nacional, envolvendo a modernização dos processos industriais e maior controle e padronização dos produtos, uma dificuldade que persiste nesse setor refere-se às perdas de material ao longo do processo produtivo, devido à algum defeito que venham a apresentar. Segundo Senthamarai e Manoharan (2005), cerca de 30% da produção total diária de cerâmica no mundo é desperdiçada.

Quando os defeitos acontecem antes da queima e em volume suficiente para impactar a produtividade, os produtos extrudados (secos ou úmidos) podem ser reprocessados. O mesmo não ocorre com as peças defeituosas queimadas, que não têm, até o momento, nenhum aproveitamento em larga escala, sendo esses materiais frequentemente descartados junto aos empreendimentos cerâmicos.

Os principais elementos abrangidos pelo termo “Resíduos da Indústria Cerâmica (RIC)” são aqueles materiais descartados durante o processo produtivo seja por estarem demasiadamente queimados (não se enquadrando nos padrões de qualidade das indústrias), seja por estarem fragmentados ou quebrados (processo que pode acontecer durante o transporte de peças prontas ou por descuido dos próprios trabalhadores).

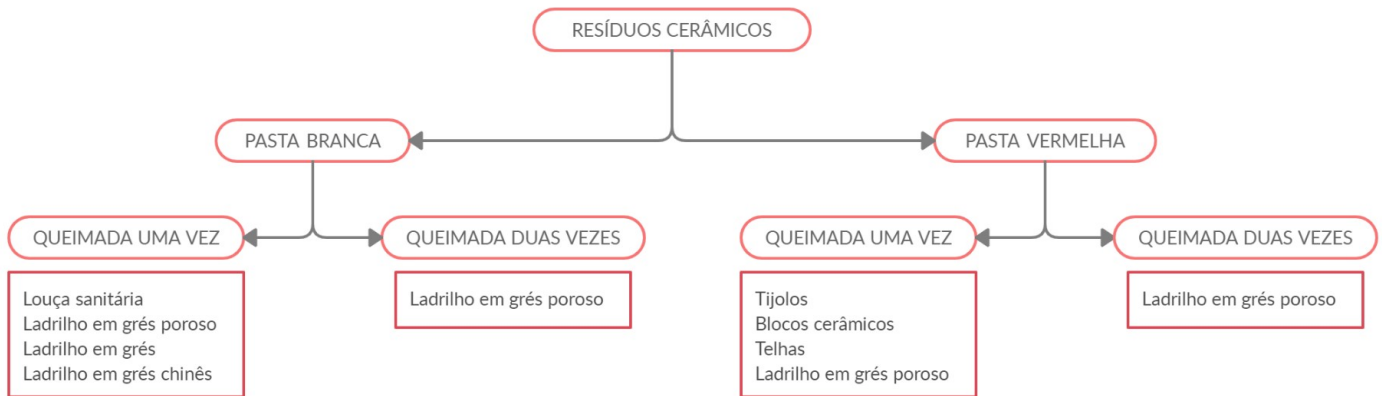
Os Resíduos da Construção e Demolição, que englobam todo o material cerâmico e cimentícios oriundo do processo de demolição de obras existentes ou provenientes de excesso de materiais de canteiros de obras, apresentam, no Distrito Federal, destinação específica. Os materiais são depositados em caçambas e empresas especializadas no recolhimento destes entulhos os levam para Unidade de Recebimento de Entulho (URE), onde esses resíduos são beneficiados e utilizados como material granular de pavimentação

Em contrapartida, maior parte dos RICs (que englobam apenas materiais que não saem das indústrias para utilização) não apresentam destinação planejada, muitas vezes sendo apenas acumulados em terrenos próximos às indústrias ou utilizados, em escala reduzida, por moradores próximos a região para fins domiciliares ou de pequenos negócios. A reutilização regional dos materiais, todavia, não ocorre em volume suficiente para reduzir efetivamente a quantidade desperdiçada de cerâmica.

2.4.1. Tipos de Resíduo da Indústria Cerâmica

Torgal e Jalali (2010), em sua pesquisa, classificaram alguns diferentes tipos de resíduo da indústria cerâmica quanto ao seu tipo e processo de produção. A classificação realizada por eles pode ser verificada no Quadro 1.

Quadro 1 – Classificação dos Resíduos Cerâmicos



Fonte: Torgal e Jalali (2010).

2.4.2. Resíduo da Indústria Cerâmica como Material Pozolânico

Uma alternativa encontrada para dar uma utilização ao material desperdiçado é usá-lo como MCS em cimentos e concretos. A reutilização desses resíduos reduz a quantidade de matérias primas naturais a serem exploradas e também oferece um destino nobre aos materiais que seriam simplesmente descartados (COSTA FILHO e ZEFERINO, 2019 apud LEITE, 2001).

Ao utilizar os RIC's como material de substituição parcial do clínquer, há a economia de energia que acaba barateando o preço final dos cimentos e concretos, pois os custos energéticos representam cerca de 45% do preço total desses materiais (TORGAL e JALALI, 2010). Outro benefício decorrente da utilização deste material é o reaproveitamento de RIC's que não teriam destino adequado, reduzindo custos provenientes do uso de áreas baldias para a armazenagem desses materiais.

A viabilidade da aplicação de Resíduos da Indústria Cerâmica como MCS's depende do material que os compõem. Existem inúmeros tipos de resíduos de cerâmica de argila vermelha que constituem subprodutos da indústria, cada um com diferenças marcadas pela constituição mineralógica, cor e dureza, em grande parte resultante da matéria-prima utilizada, mas também do tratamento térmico a que os produtos foram submetidos.

A cerâmica vermelha é obtida a partir de argilas, geralmente da família das ilitas. Esse material é selecionado de acordo com sua origem e granulometria e, após passar pelo processo de

triagem, é levado a um misturador onde terá sua umidade controlada. Quando a umidade ótima é atingida, a pasta segue para o processo de moldagem no formato requerido para sua utilização e, em seguida, passa por uma secagem ao ar livre de no mínimo 10 dias.

A última etapa de produção é a responsável por possibilitar o uso do RIC nos materiais cimentícios. Essa fase consiste em levar as peças já secas para os fornos, submetendo-as a temperaturas entre 700 e 1100°C, dependendo do destino final que a peça irá tomar (telhas precisam ser queimadas a temperaturas mais altas que tijolos maciços, por exemplo). Observando por outra perspectiva, essa pode ser considerada a etapa de calcinação da argila.

Como citado anteriormente, argilas quando calcinadas podem adquirir certa pozolanicidade e reagir com o hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento, gerando C-S-H. Dessa forma, beneficiar resíduos cerâmicos que seriam desperdiçados para aplica-los em cimentos e concretos poderia entrar como um processo de substituição da pozolana natural por uma alternativa mais sustentável.

Rojas et al (2017) explica melhor esse processo:

Um número considerável de estudos acerca deste material mostra que argila calcinada de diferentes origens apresenta propriedades pozolânicas muito promissoras porque, quando a calcinação ocorre a temperaturas entre 600°C-900°C e a finura das partículas se aproxima a do cimento, a argila mineral inicialmente inerte adquire considerável pozolanicidade. A evaporação de água quimicamente combinada à altas temperaturas e a resultante quebra de redes cristalinas de componentes constituintes da argila induzem a formação de materiais amorfos ou vítreos. Argilas calcinadas devem sua pozolanicidade em grande parte a essa instabilidade termodinâmica.

Torgal e Jalali (2010), em sua pesquisa, substituíram cerca de 20% de clínquer no cimento CEM I-32,5 (equivalente ao cimento CP-I, sendo apenas uma mistura de clínquer, gipsita) por resíduos cerâmicos finamente moídos. Os resíduos eram provenientes de blocos cerâmicos, telhas, ladrilhos (cerâmica vermelha e branca) e ladrilhos de grés (tipos variados). Foram realizados ensaios para verificar a resistência a compressão e o desempenho de durabilidade de um concreto produzido com esse cimento. Os resultados mostraram que a substituição parcial de resíduo cerâmico, apesar de causar uma pequena perda de resistência a compressão, faz com que a durabilidade do material seja aumentada devido as suas propriedades pozolânicas.

Rojas et al (2017) realizaram um estudo comparativo entre quatro amostras: uma amostra contendo cimento referência e as outras três apresentando substituição de 10%, 20% e 30% de clínquer por resíduo da indústria cerâmica (“lodo cerâmico”). A conclusão obtida foi que as substituições fizeram com que a resistência a flexão das amostras crescesse mais rapidamente que a resistência a compressão, gerando um material mais flexível e elástico devido à natureza dos produtos gerados através da reação pozolânica.

Shao et al (2019), em sua pesquisa, adicionaram resíduo de tijolo moído ao cimento, em teores de 10, 20, 30 e 40% de substituição parcial de clínquer, sob uma relação a/c de 0,45. As amostras com 20% de substituição apresentaram resistência à compressão maior que as amostras referência (sem substituição alguma), atingindo 62,2 MPa aos 90 dias. Para os outros valores de substituição, as resistências permaneceram menores com relação aos valores de referência, no entanto foi constatado que essa característica mecânica aumenta com o decorrer do tempo.

Carneiro, Moura e Leite (2009) obtiveram resultados semelhantes ao adicionar RICs (blocos cerâmicos) finamente moídos como substituição parcial ao cimento na produção de argamassas. Foram utilizados teores de 10% e 20% de substituição, sendo que para o primeiro caso, o ganho de resistência à compressão chegou a 19% enquanto no segundo caso, a perda de resistência foi de 5. Após a análise do difratograma de raios X (DRX), foi concluído que as amostras de materiais cerâmicos apresentavam características possivelmente reativas.

Existem também pesquisas que estudaram diretamente a capacidade pozolânica do material em si, além de sua influência nas propriedades do cimento e concreto em estados frescos e endurecidos.

Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos (2012) executaram ensaios de caracterização nas amostras de tijolos e telhas cerâmicas após atingirem a granulometria adequada. O pó fino obtido foi caracterizado em sua densidade, finura Blaine e morfologia das partículas, por microscopia eletrônica de varredura. O índice de atividade pozolânica foi determinado por ensaios em argamassa com diferentes teores de substituição do aglomerante, no intervalo de 0% a 40%. Os autores consideraram que os resultados registrados confirmavam a atividade pozolânica do resíduo, viabilizando sua incorporação em argamassas e concretos.

Garcia et al (2015) estudaram a atividade pozolânica de massas e cacos de cerâmica vermelha dos principais polos produtores do estado de São Paulo. Foram realizados ensaios de análise granulométrica, difração de raio X, análise termogravimétrica, análise química de elementos

maiores e ensaio de Chapelle. Os resultados comprovaram o indício de atividade pozolânica dos materiais e os autores os caracterizaram como adequados para uso como aditivo pozolânico para cimento Portland.

2.5. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA SIMPLIFICADO (MÉTODO MET e MÉTODO QE-CO₂)

Os materiais usados na construção civil apresentam ciclos de vida semelhantes: matérias primas são beneficiadas, transformando-se em produtos amplamente distribuídos, utilizados para fins diversos. No entanto, o tempo de vida desses materiais é finito, fazendo com que eles se tornem resíduos a serem descartados quando perdem sua utilidade (STAFFORD, 2016).

Apesar disso, a tendência atual para a redução no volume de resíduos descartados é o reaproveitamento desses materiais para a integração de uma nova cadeia produtiva (STAFFORD, 2016), princípio motivador dessa pesquisa. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) entra como uma forma de analisar qualitativa e quantitativamente o impacto ambiental gerado pela inserção de novos elementos nessa cadeia produtiva.

Segundo a NBR ISO 14040 (2009), a ACV é uma “compilação e avaliação das entradas, saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo de seu ciclo de vida”. É uma ferramenta de gestão ambiental criada para melhor compreender e lidar com os impactos ambientais derivados da fabricação e consumo de produtos desde a fase de aquisição da matéria prima, produção, uso e reciclagem até a disposição final.

As informações obtidas por uma ACV podem ser utilizadas para melhorar processos, dar suporte a políticas públicas e ambientais e servir como base para tomadas de decisão (FIGUEIREDO, 2018). Para esse estudo, a aplicação do ACV no estudo da indústria de cimento Portland tem como objetivo observar os impactos ambientais que o uso de RIC's como MCS pode gerar, principalmente no que diz respeito às emissões de CO₂.

Sobre a ACV, Ashby (2009) expõe que a análise de um produto pode ser feita de forma mais minuciosa, explorando exaustivamente cada aspecto do ciclo, ou ainda de forma simplificada, configurando uma aproximação útil e confiável da situação em estudo. O autor ainda aponta que na maioria dos casos, a ACV completa é um método oneroso em conhecimento técnico e

tempo. Outras dificuldades apontadas por Bhamra e Lofthouse (2007) de uma ACV completa é a dificuldade de delimitação das fronteiras de sistema e dificuldade de acesso à dados quantitativos precisos.

Para a realização de uma ACV simplificada, duas alternativas são possíveis: análise focada apenas nas entradas mais significativas (negligenciando entradas secundárias) ou análise feita por meio de softwares como SimaPro, GaBi, MIPS, CES Eco '09 etc, que facilitam a condução das tarefas por meio de sua base de dados (ASHBY, 2009).

Uma das alternativas de ACV simplificada proposta por Bhamra e Lofthouse (2007) é o uso do método denominado matriz MET (do inglês *Materials, Energy and Toxicity*). Nessa abordagem o foco se dá nas três principais áreas de um processo produtivo que podem gerar problemas ambientais: a origem e a destinação final dos materiais utilizados, quais os níveis de consumo de energia em cada processo e a existência ou não de emissões tóxicas em cada etapa. Para facilitar a visualização dos processos e coleta de informações, tem-se a Tabela 5, representando uma cadeia genérica de produção:

Tabela 5 – Matriz MET genérica

		Ciclo de Materiais (Entrada / Saída)	Consumo Energético (Entrada / Saída)	Emissões Tóxicas
Produção e fornecimento de materiais e componentes.				
Produção <i>in loco</i>				
Distribuição				
Utilização	Operação			
	Serviço			
Fim da vida do sistema	Recuperação			
	Descarte			

Fonte: adaptado de Bhamra e Lofthouse (2007)

Esse processo inicialmente dá uma visão qualitativa geral dos potenciais problemas ambientais gerados em um processo produtivo. No entanto, para uma análise mais detalhada é possível agregar valor às entradas da tabela, para por exemplo, saber quanto material é desperdiçado, quanto de energia é dispendida em um processo ou quais são os níveis de emissões poluentes de uma atividade (BHAMRA e LOFTHOUSE, 2007).

O cálculo a ser realizado para a obtenção dos dados de entrada pode ser feito com base no Método QE-CO₂, desenvolvido por Costa (2012). Essa metodologia tem o foco em quantificar

as emissões de CO₂ geradas durante a produção de materiais diversos utilizados na construção civil. Os resultados são obtidos por meio da fórmula simplificada abaixo:

$$CO_{2emissões,i} = M_i \times F_{e_i} \quad (I)$$

Em que,

- $CO_{2emissões,i}$ representa as emissões de CO₂ na produção de determinado material, em toneladas;
- M_i representa a massa de material a ser produzido, em toneladas;
- F_{e_i} representa o fator de emissão de CO₂ do material, em toneladas de CO₂ / toneladas de material.

Para cálculos de emissão de CO₂ durante a produção de clínquer, o Manual de Boas Práticas do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), do ano de 2006, recomenda o acréscimo de um fator de correção denominado CKD e igual a 2% das emissões totais calculadas. A necessidade da incorporação do CKD está relacionada com a poeira constantemente acumulada nos fornos de queima de clínquer, que contribuem para o aumento das emissões de CO₂.

Assim, a equação (I) assume a forma a seguir:

$$CO_{2emissões,i} = M_i \times F_{e_i} \times CKD \quad (II)$$

A associação entre o Método QE-CO₂ e o método Matriz MET torna viável, portanto, a construção de uma ACV simplificada que consegue gerar resultados confiáveis e de fácil entendimento.

2.5.1. Termos utilizados

Para a melhor compreensão das etapas da análise se faz necessário explicar alguns termos existentes na NBR ISO 14040 (2009):

- Sistema de produto: explicação detalhada das etapas que compõem o ciclo de vida do produto estudado, desde a extração da matéria prima até o seu processamento, incluindo todos os serviços intermediários.
- Fronteiras de sistema: quais serão os procedimentos e processos dentro de um sistema de produto que serão levados em conta para a realização do ACV. O que delimita as fronteiras de um sistema é o objetivo e a aplicação pretendida do estudo.

- Unidade funcional: quando o desempenho de um sistema de produto é transformado em um número/quantidade para possibilitar a comparação entre ACV's.
- Funções do sistema/produto: características de desempenho de um sistema ou de um produto.

2.5.2. Etapas de uma Avaliação de Ciclo de Vida Simplificada (Método MET)

A ACV simplificada utilizando o método MET pode ser dividida em quatro etapas:

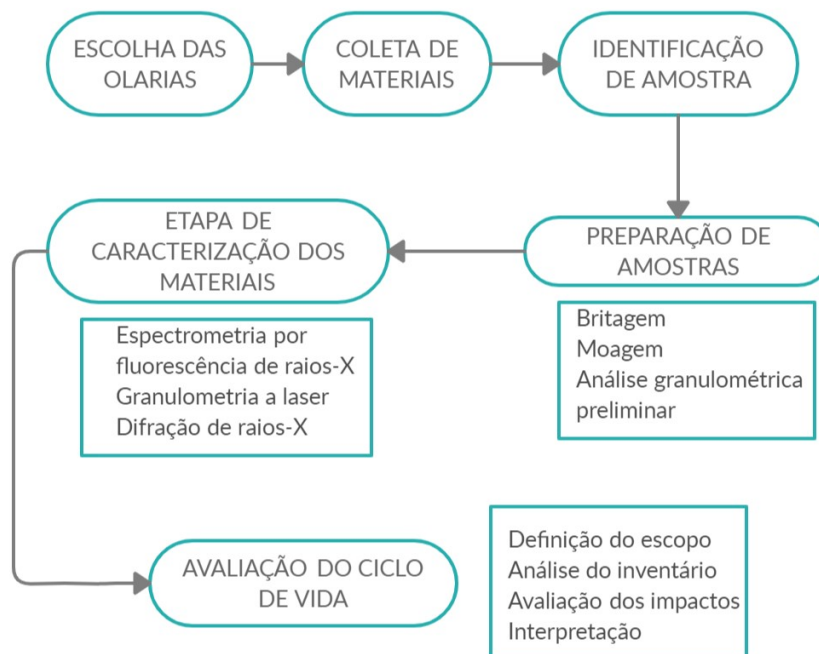
- 1º.) **Definição do objetivo e escopo:** fase inicial da análise, onde se determina o objetivo do estudo, qual o sistema de produto e suas fronteiras e o plano de trabalho adotado.
- 2º.) **Análise de inventário do ciclo de vida (ICV):** representa o período de coleta de dados e procedimentos. Etapa em que se realiza a identificação, descrição e/ou quantificação de matérias-primas, energia, transporte, emissões atmosféricas, efluentes etc.
- 3º.) **Construção da matriz MET:** etapa em que matriz MET é construída (delimitação das atividades que serão consideradas importantes dentro da indústria cimentícia para a realização da análise de ciclo de vida simplificada) e os dados quantitativos são coletados.
- 4º.) **Interpretação:** fim do processo de análise, onde serão resultados serão comparados para a construção de conclusões acerca da matriz MET.

CAPÍTULO 3: PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste trabalho buscou-se caracterizar os Resíduos da Indústria Cerâmica produzidos na região do Distrito Federal visando sua utilização como Material Cimentício Suplementar. Também buscou-se analisar qual seria o impacto no Ciclo de Vida da indústria cimentícia caso esse material fosse usado como Material Cimentício Suplementar, principalmente no que diz respeito às emissões de CO₂ para a atmosfera.

Nesse item serão apresentados os materiais utilizados na pesquisa, a descrição e metodologia de cada ensaio realizado, além dos parâmetros utilizados para analisar as emissões de CO₂ no processo industrial cimentício com uso de RIC. O Quadro 2 apresenta as etapas estipuladas para o programa.

Quadro 2 – Organização do Programa Experimental



Fonte: Autoria própria (2020).

3.1. ESCOLHA DAS OLARIAS

O primeiro passo para o desenvolvimento da pesquisa foi o mapeamento das indústrias de cerâmica na região do Distrito Federal e entorno. As indústrias mais próximas de Brasília e ainda operantes ficam na cidade de São Sebastião – DF. A Figura 1 indica onde elas estão localizadas. Desse centro foram coletadas as amostras utilizadas nessa pesquisa.

Figura 1 – Localização das indústrias cerâmicas da região de São Sebastião



Fonte: Google Earth modificado (2020)

É importante salientar que durante a pesquisa para realização do mapeamento também foram encontradas indústrias cerâmicas em Formosa, Anápolis e Goianésia. Todavia esses locais não foram explorados por estarem mais distantes e porque as indústrias de São Sebastião conseguiram suprir a demanda do estudo.

As olarias nas quais foram coletados os resíduos foram as olarias: 3 Irmãos (coordenadas: 15°57'24.14"S e 47°43'28.27"O), Vitória (coordenadas: 15°57'15.50"S e 47°43'32.71") e a Santa Fé (coordenadas: 15°56'57.71"S e 47°43'44.73"O). Elas podem ser observadas na Figura 2.

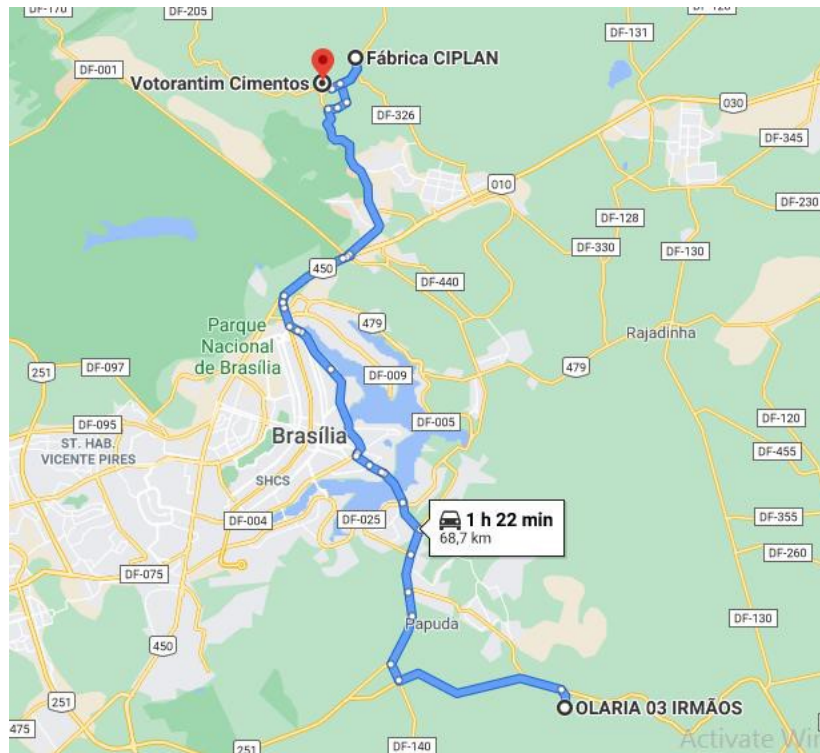
Figura 2 – Localização das olarias de onde foram coletados os RIC's



Fonte: Google Earth modificado (2020)

Por serem próximas, as olarias distam de uma mesma distância de cerca de 69 km dos principais polos industriais de produção de cimento no Distrito Federal: as fábricas da CIPLAN e da Votorantim. O trajeto a ser percorrido está apresentado na Figura 3. Esse fator é relevante pois o uso de RIC como MCS deve ser avaliado não apenas pelas propriedades intrínsecas do material, mas também por fatores externos, como a distância de transporte, o custo gerado por esse deslocamento e seu impacto ambiental.

Figura 3 – Distância entre as olarias e o polo industrial cimentício do DF.



Fonte: Google Maps (2020)

3.2. COLETA DE MATERIAIS

Todos os materiais foram coletados praticamente inteiros, tendo sido descartados apenas por estarem trincados, fora dos padrões de qualidade da indústria e/ou excessivamente queimados. Segue as informações de cada olaria a seguir:

- Olaria 3 Irmãos

A primeira olaria visitada foi a Olaria 3 Irmãos, de onde foram retirados dois tipos diferentes de amostra: uma amostra formada por tijolos maciços e outra amostra formada por blocos

cerâmicos. Os locais de onde foram coletadas as amostras estão dispostos na Figura 4. Foram coletados cerca de 20 kg de cada tipo.

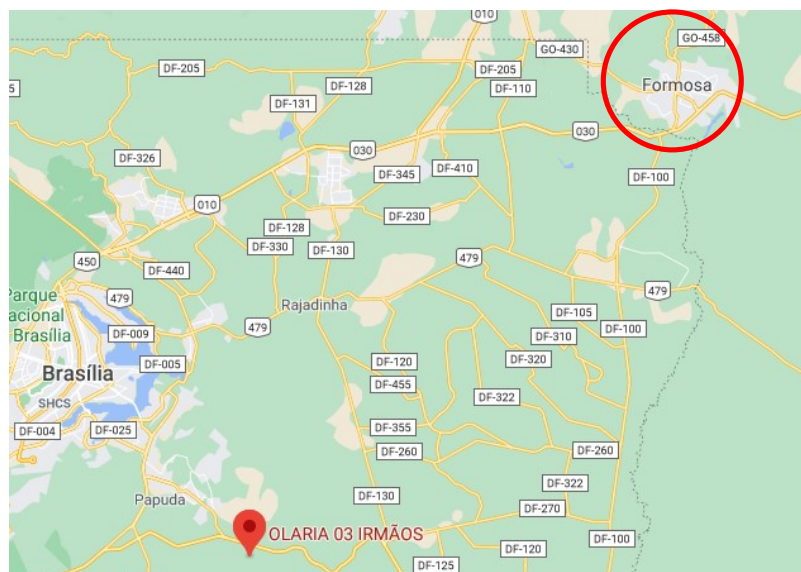
Figura 4 – A) Tijolos maciços descartados à esquerda. B) Blocos cerâmicos descartados à direita (Olaria 3 Irmãos)



Fonte: Acervo pessoal (2020)

Segundo Sr. Marcos Santos, ambos os tipos de produtos cerâmicos eram provenientes de argila vinda de Formosa-GO, região assinalada na Figura 5. A argila com coloração mais clara é utilizada para a fabricação dos tijolos maciços e a argila mais avermelhada, dos blocos cerâmicos.

Figura 5 – Local de extração da argila utilizada na Olaria 3 Irmãos



Fonte: Google Maps (2020)

O processo de produção é padronizado, no qual a argila é misturada com água até que chegue a uma umidade ótima, umidade essa determinada apenas pela experiência dos próprios trabalhadores. Em seguida, essa pasta é levada a uma máquina onde ela é moldada e cortada de acordo com as dimensões padrão, apresentada na Figura 6.

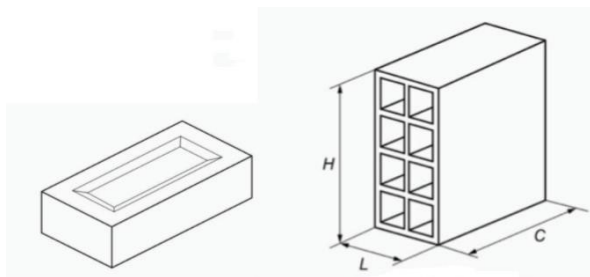
Figura 6 – Máquina utilizada para mistura entre água e argila e moldagem dos produtos cerâmicos (Olaria 3 Irmãos)



Fonte: Acervo pessoal (2020)

É importante ressaltar que além do tipo de argila utilizada e da temperatura de queima ao forno, uma das principais diferenças entre a fabricação de tijolos maciços e blocos cerâmicos é a forma em que são moldados, seguindo o exposto pela Figura 7 a seguir. As dimensões de ambos podem ser variáveis.

Figura 7 – A) Tijolo cerâmico maciço com rebaixo. B) Bloco cerâmico de vedação com furos na horizontal



Fonte: NBR 15270-1:2017

Após a moldagem os produtos cerâmicos são deixados ao ar livre para secarem por um período de 5 a 7 dias. São posicionados em fileira e um em cima do outros para otimização do espaço de secagem. O local é coberto e nenhum dos blocos recebe diretamente incidência da luz solar. O local de secagem pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 – Local de secagem dos produtos cerâmicos (Olaria 3 Irmãos)



Fonte: Acervo pessoal (2020)

Após a secagem os blocos e tijolos são levados aos fornos (Figura 9). Cada um dos produtos é destinado a fornos diferentes, cuja fonte de calor é a queima da madeira. A lenha utilizada provém da vegetação existente próxima à olaria. A temperatura do forno varia de 700 a 1000°C, podendo chegar até 1100°C nas regiões mais quentes. Os blocos cerâmicos são submetidos a queima em maiores temperaturas que os tijolos maciços.

Figura 9 – Forno para calcinação do material (Olaria 3 Irmãos)



Fonte: Acervo pessoal (2020)

Os materiais permanecem no forno por 8 dias e depois são separados para resfriarem e enfim serem transportados e vendidos. Os produtos que após a queima estiverem danificados de alguma forma (quebrados ou queimados excessivamente) são descartadas em pilhas, conforme indicado pela Figura 4.

- Olaria Vitória

Da olaria Vitória, foi coletado apenas um conjunto de resíduos de tijolos maciços de coloração mais clara, totalizando 20 kg. Os tijolos foram selecionados de diferentes locais da pilha de descarte existente (Figura 10), para melhorar a representatividade da amostra.

Figura 10 – Local de depósito dos RIC's descartados (Olaria Vitória)



Fonte: Acervo pessoal (2020)

Segundo o responsável Sr. Reinaldo Oliveira, a argila para a produção dos tijolos vem de um local próximo, cerca de 5 km de distância da olaria, próximo ao Rio Preto (Figura 11).

Figura 11 – Local de extração da argila utilizada na Olaria Vitória



Fonte: Google Maps (2020)

O processo produtivo é muito semelhante ao da Olaria 3 Irmãos, com algumas exceções: os tijolos ficam por apenas 5 dias no forno e a temperatura a qual são submetidos é de 750 a 1100°C. O maquinário utilizado pode ser observado na Figura 13, o local de secagem, na Figura 14 e o forno, na Figura 15.

Figura 13 – A) Máquina utilizada para mistura entre água e argila e moldagem dos produtos cerâmicos. B) Esteira pela qual os tijolos passam após serem moldados para serem levados para secagem (Olaria Vitória)



Fonte: Acervo pessoal (2020)

Figura 14 – Secagem dos produtos cerâmicos (Olaria Vitória)



Fonte: Acervo pessoal (2020)

Figura 15 – Forno para calcinação do material (Olaria Vitória)



Fonte: Acervo pessoal (2020)

- Olaria Santa Fé

A Olaria Santa Fé, diferente das outras duas olarias, não apresenta um local específico destinado ao descarte dos RIC's. Os materiais ficam em pequenos montes distribuídos ao longo da olaria, ou então dispersos no próprio chão, o que tornou a coleta mais difícil. No entanto, foi possível recolher 2 tipos de amostras em quantidades suficientes para o estudo. Uma delas foi de tijolos maciços produzidos com argila mais clara e a outra, tijolos maciços de coloração avermelhada, como apresentado na Figura 16.

Figura 16 – Tipos de material cerâmico disponíveis (Olaria Santa Fé)



Fonte: Acervo pessoal (2020)

Segundo o responsável Sr. Marcos Freitas, as argilas utilizadas tem origem no mesmo local que a argila beneficiada na Olaria Vitória, próximo ao Rio Preto em um raio de cerca de 5 km (Figura 17).

Figura 17 – Local de extração da argila utilizada na Olaria Santa Fé



Fonte: Google Maps (2020)

O processo produtivo da Olaria Santa Fé é idêntico ao processo produtivo da Olaria Vitória, até mesmo a temperatura do forno e o tempo de permanência no mesmo para a calcinação dos materiais (5 dias). A Figura 18 ilustra a máquina utilizada para a mistura entre água e argila e moldagem dos produtos finais, enquanto a Figura 19 mostra o forno utilizado pela olaria.

Figura 18 – Máquina utilizada para mistura entre água e argila e moldagem dos produtos cerâmicos (Olaria Santa Fé)



Fonte: Acervo pessoal (2020)

Figura 19 – A) Vista externa do forno. B) Vista interna do forno (Olaria Santa Fé)



Fonte: Acervo pessoal (2020)

3.3. CONTROLE DE QUALIDADE DAS OLARIAS

O controle dos processos de fabricação de materiais cerâmicos é uma forma de garantir a homogeneidade dos produtos e de sua qualidade, minimizando o desperdício de material e descarte de peças inadequadas. Segundo Sposto, Morais e Pereira (2007), a indústria cerâmica brasileira carece em controle tecnológico no seu processo de produção, o que resulta em problemas frequentes durante suas fases e produtos com defeitos, tais como deformações, trincas e heterogeneidade em sua constituição.

Problemas comumente encontrados em indústrias com controle de qualidade precário são: baixa resistência devido ao sazonalidade inadequado, deformações e trincas devido ao alto teor de umidade da massa cerâmica, deformações devido ao manuseio e transporte, trincas devido à retração na secagem e na queima, dentre outros (SPOSTO, MORAIS e PEREIRA, 2007).

As principais etapas que exigem controle tecnológico dentro do processo de fabricação de produtos cerâmicos são: controle de qualidade e caracterização da argila extraída, sazonalidade, dosagem de água e controle de umidade, secagem, queima e controle de qualidade final.

Para as olarias estudadas, portanto, optou-se por realizar um panorama geral das atividades executadas durante o processo produtivo, salientando em quais delas o controle tecnológico é verificado. Deste modo será possível apontar, de forma preliminar, a qualidade dos produtos finais das indústrias, bem como das amostras coletadas.

Tabela 6 – Controle de qualidade das olarias estudadas

ATIVIDADES	OLARIAS		
	Olaria 3 Irmãos	Olaria Vitória	Olaria Santa Fé
Extração da argila	Feita por terceiros e transportada até a olaria.		
Caracterização da argila extraída e controle de qualidade	Não realizada.		
Sazonamento	Não realizado.		
Preparação da matéria prima (destorroamento, moagem, mistura e laminação)	Feito de forma precária, momentos antes de colocar o material na máquina extrusora.		
Dosagem de água	Baseada na experiência do trabalhador responsável pelo processo.		
Controle de umidade	Não realizado		
Extrusão	Etapa realizada, no entanto, não há inspeção das peças ao final do processo.	Etapa realizada, no entanto, não há inspeção das peças ao final do processo.	Etapa realizada e as peças desconformes são eliminadas.
Transporte até local de secagem	Feito manualmente.		
Secagem	Natural, por meio de empilhamento diretamente no piso. Sem controle de temperatura e umidade relativa do ar. Secagem por 5 a 7 dias.	Natural, por meio de empilhamento sobre mureta. Sem controle de temperatura e umidade relativa do ar. Período de secagem não informado.	Natural, por meio de empilhamento sobre mureta. Sem controle de temperatura e umidade relativa do ar. Secagem por 7 dias.

ATIVIDADES	OLARIAS		
	Olaria 3 Irmãos	Olaria Vitória	Olaria Santa Fé
Queima	Por meio de forno à lenha, sem controle de temperatura. Estima-se que a temperatura de queima varie de 700 a 1000°C. Período de permanência no forno é de 8 dias	Por meio de forno à lenha, sem controle de temperatura. Estima-se que a temperatura de queima varie de 750 a 1100°C. Período de permanência no forno é de 5 dias	Por meio de forno à lenha, sem controle de temperatura. Estima-se que a temperatura de queima varie de 750 a 1100°C. Período de permanência no forno é de 5 dias
Resfriamento	Peças permanecem no forno, porém com as portas abertas e sem a alimentação do mesmo		
Controle de qualidade	Ao retirar as peças do forno, é feita uma inspeção visual, descartando-se e peças quebradas e queimadas excessivamente	Ao retirar as peças do forno, é feita uma inspeção visual, descartando-se e peças quebradas e queimadas excessivamente	Ao retirar as peças do forno, é feita uma inspeção visual, descartando-se e peças quebradas e queimadas excessivamente

Fonte: Autoria própria (2020)

3.4. IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS

De cada uma das olarias foram coletadas amostras de Resíduos da Indústria Cerâmica de cerca de 20 kg. A distinção entre esses materiais será feita por meio da nomenclatura a seguir:

- RIC 1 – Tijolo Maciço derivado da Olaria 3 Irmãos;
- RIC 2 – Bloco Cerâmico derivado da Olaria 3 Irmãos;
- RIC 3 – Tijolo Maciço derivado da Olaria Vitória;
- RIC 4– Tijolo Maciço derivado da Olaria Santa fé, de coloração branca;
- RIC 5 – Tijolo Maciço derivado da Olaria Santa fé, de coloração vermelha.

3.5. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Por se encontrarem praticamente inteiras, as amostras foram inicialmente britadas com auxílio de britador mecânico de mandíbula no Laboratório de Geocronologia da Universidade de Brasília (UnB). O material foi britado por meio de uma única passagem no equipamento para estabelecer um padrão entre as amostras, de forma que seu tamanho estivesse adequado para a etapa de moagem.

As amostras então, em uma dimensão mais adequada, foram moídas no equipamento de Abrasão Los Angeles presente no Laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília.

Para estabelecer o tempo de moagem ao qual as amostras seriam submetidas, foi realizado um teste com 4 kg de amostra do RIC1 britado. Foram realizadas coletas de material após 4h, 5h e 6h de moagem e essas amostras tiveram sua granulometria analisada pela técnica de granulometria a laser, utilizado o equipamento Microtrac S3500 do Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília.

A análise granulométrica das amostras foi feita afim de identificar qual o tempo de moagem necessário para garantir para o cumprimento dos critérios de granulometria mínima expressos na NBR 12653 para pozolanas. Esse tempo de moagem devem ser tal que a porcentagem máxima de material passante na peneira 45 μm seja igual 34%. Os resultados dessa análise granulométrica podem ser observados no Capítulo 4 desta pesquisa

3.6. ETAPA DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Esta etapa tem como objetivo a caracterização dos materiais utilizados na pesquisa, verificando se eles se enquadram em alguns dos critérios da NBR 12653. Os ensaios de caracterização utilizados foram apresentados abaixo:

- Espectrometria por fluorescência de raios-X;
- Granulometria por raio laser;
- Difração de raios-X.

3.6.1. – Espectrometria por fluorescência de raios-X

Para a realização deste ensaio primeiro se faz necessário a realização do ensaio para a determinação de perda ao fogo. Ele consiste, basicamente, na pesagem de amostras de material antes e depois de aquecido a uma temperatura entre 900 e 1000 °C, indicando assim a perda de massa após o processo.

Esse procedimento visa retirar toda a água estrutural presente na amostra, assim como materiais orgânicos contaminantes e é regido pela norma ABNT NM 18:2012.

A espectroscopia por fluorescência de raios-X (FRX) fornece a composição química de uma amostra, sendo fundamental para a caracterização dos materiais. Foi realizada nas amostras recolhidas de resíduos da indústria cerâmica.

A técnica baseia-se no princípio de que quando o material absorve o raio-X ele fica com seus átomos ionizados, gerando uma radiação fluorescente. Os raios emitidos no ensaio têm comprimentos de onda conhecidos, sendo possível comparar os materiais ensaiados com amostras padrão e assim estabelecer quantitativamente o teor dos elementos presentes.

O ensaio foi realizado no Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (Crti), localizado na Universidade Federal de Goiás (UFG). O equipamento utilizado foi o espectrômetro WDS Brunker S8 Tiger.

3.6.2. – Difração de raio-X

O ensaio de difração de raios-X (DRX) permite identificar as fases cristalinas de uma amostra e avaliar o amorfismo da mesma. O ensaio será utilizado na fase de caracterização para complementar as informações sobre a composição das amostras de RIC.

Esse método consiste em emitir feixes de raios-x utilizando a rede cristalina do material em estudo para difratá-los. Cada estrutura cristalina tem o seu padrão característico, e para interpretar os resultados obtidos, utiliza-se um banco de dados conhecido de difratogramas (gráficos obtidos com os padrões de difração). Desta forma, a análise do comportamento de difração desses feixes determina o tipo de estrutura cristalina do material, qual composto químico é encontrado em maior quantidade, entre outras informações.

O ensaio foi realizado no Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG/UnB), em um difratômetro BRUKER D8 Advance. Os parâmetros do ensaio são voltagem de 40 kV e amperagem de 40 mA, em sistema $\theta/2\theta$, com velocidade de varredura de 1,2°/minuto, de 5° a 60° em 2θ . A fonte de energia é um filamento de tungstênio (cátodo) e o tubo de raios-X foi de cobre (ânodo), cujos comprimentos de onda são $K\alpha$ 1,5406 Å e $K\beta$ 1,3922 Å.

3.6.3. - Granulometria por raio laser

O ensaio de granulometria por raio laser tem como resultado a distribuição granulométrica de amostras pulverizadas que será utilizada para caracterizar as amostras de RIC recolhidas. Tal informação é necessária para facilitar a comparação de resultados, visto que o tamanho de partícula influencia na reatividade do material.

A granulometria a laser é realizada por meio de refração de luz, onde as partículas de pó em fluxo contínuo são detectadas por uma luz incidente e correlacionadas com o tamanho da partícula (PAPINI, 2003). A interpretação dos sinais captados é realizada por equipamentos que utilizam algoritmos matemáticos. O equipamento conta também com um ultrassom que juntamente com o defloculante atua dispersando as partículas e evitando a formação de aglomerados de grãos.

Para este ensaio é necessária uma amostra de aproximadamente 10 g, essa quantidade pode variar de acordo com o tipo de amostra a ser ensaiada. O equipamento conta com um software que detecta quando a quantidade de amostra inserida no aparelho é suficiente para a realização da granulometria à laser.

Esse ensaio foi realizado no Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília (UnB), no equipamento Microtrac S3500, capaz de fornecer a distribuição granulométrica de partículas entre 0,02 μm e 2.800 μm de dimensão. O meio dispersante foi água destilada.

3.7. ETAPA DE ANÁLISE DO CICLO DE VIDA

A Análise do Ciclo de Vida foi feita de forma simplificada com enfoque nas emissões de CO₂ durante o processo de fabricação do cimento Portland, realizando-se apenas algumas das etapas descritas nas NBR ISO 14040:2014 – “Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura” e NBR ISO 14044:2014 – “Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações”.

Dessa forma, nesta pesquisa apresentou-se uma interpretação qualitativa do Inventário de Ciclo de Vida (IVC), adicionando-se análises quantitativas sobre as emissões de gás carbônico dos processos envolvidos. Para método de análise, utilizou-se a Matriz MET, assim como proposto por Brezet e Van Hemel (1997).

A ACV Simplificada foi dividida em duas partes:

- Primeira parte: comparação entre as ACV's do ciclo de produção de um cimento com baixo teor de adições (CP V), um cimento com alto teor de adições (CP IV) e um cimento com teor de adições intermediário (CP II Z), de forma a verificar a relação entre o uso de MCS's e as emissões de CO₂.
- Segunda parte: comparação entre as cadeias produtivas dos cimentos CP II Z e CP IV com a incorporação da argila calcinada e com a incorporação de RIC's, para identificar qual das duas situações é ambientalmente mais vantajosa.

3.7.1. – Definição do escopo

O objetivo dessa avaliação baseia-se na comparação entre os processos produtivos do cimento com e sem a utilização de RIC's como MCS. O enfoque dessa análise está no impacto ambiental relacionado à emissão de CO₂, visto que o uso de MCS é bem visto no cenário mundial justamente por, dentre outros benefícios, reduzir significativamente essas emissões atmosféricas.

O público-alvo dessa pesquisa é a comunidade acadêmica e indústria do Distrito Federal, pois por ser de caráter introdutório, o tema pode ser melhor explorado e desenvolvido para que o

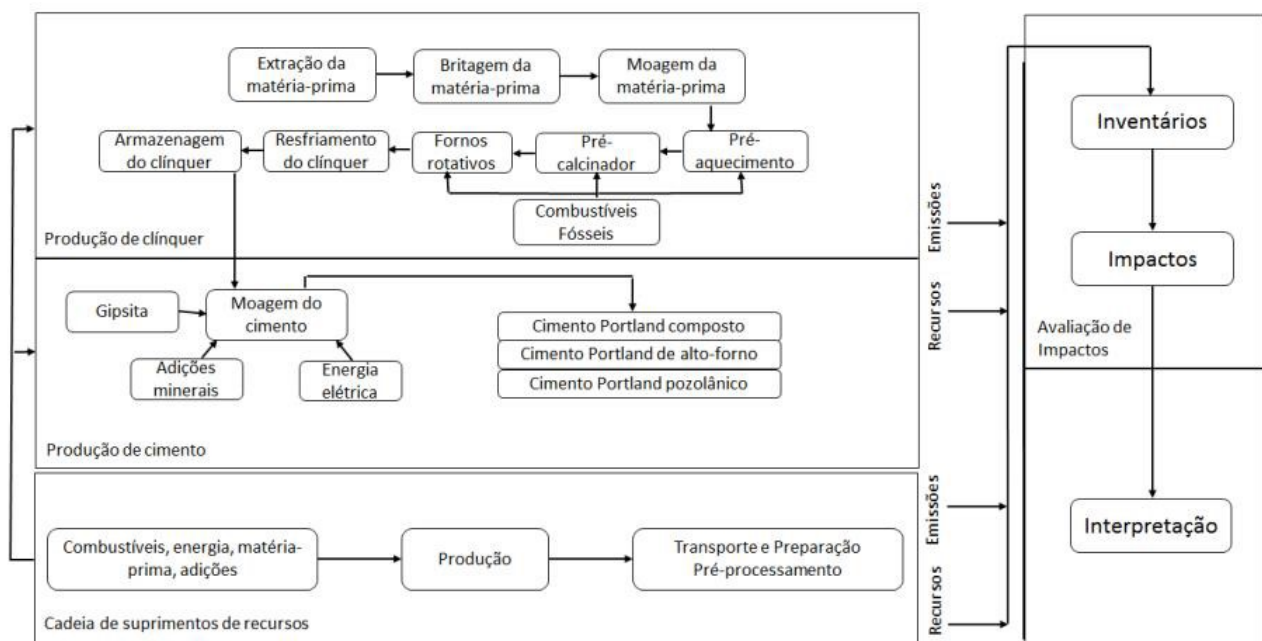
uso de resíduos da indústria cerâmica como substituição parcial do clínquer possa ser amplamente difundido na produção em larga escala de cimentos Portland.

3.7.1.1. – Sistema de Produto

Como o objetivo desse estudo é analisar o impacto gerado pelo uso de RIC's no processo de fabricação do cimento, o sistema de produto considerado baseia-se nos principais processos que compreendem uma planta industrial. Dessa forma, o sistema abrange desde a extração de matérias primas até obtenção do cimento Portland pronto para ser utilizado.

Guerreiro (2014) formulou um fluxograma do sistema de produto de uma planta industrial, dando destaque aos processos que mais consomem recursos energéticos e que apresentam a maior produção de poluentes. Este fluxograma servirá como guia para delimitação do sistema de produto desta pesquisa (Quadro 3).

Quadro 3 – Sistema de produto “do berço ao portão” da fabricação do cimento Portland



(Fonte: GUERREIRO, 2014)

3.7.1.2. – Unidade funcional

A unidade funcional mais utilizada em ACVs de indústrias de cimento é de 1 tonelada. Este estudo usará a mesma unidade, de forma que os dados encontrados possam ser utilizados como base de comparação em pesquisas futuras.

3.7.1.3. – Escolha dos cimentos

Para a realização da análise serão utilizados os cimentos CP V (composto por 90% cimento e 10% filer calcário), CP II-Z (composto por 76% cimento, 14% de argila calcinada e 10% de filer calcário) e o CP IV (composto por 62% cimento, 23% de argila calcinada e 10% filer calcário). Também serão avaliados os cimentos CP II Z e CP IV com o uso de RIC como substituinte da argila calcinada.

3.7.1.4. – Fronteiras do sistema

Seguindo a metodologia *cradle-to-gate* (“do berço ao portão”), o sistema de produto será restringido, considerando apenas os processos realizados em fábrica, além da extração e transporte de matérias primas. Etapas como a aplicação e uso do cimento, sua vida útil, deposição final de materiais e potencial de reciclagem serão desconsideradas.

Dessa forma, definiram-se os processos principais da cadeia produtiva de cada cimento, considerando as etapas com maiores emissões de CO₂ de acordo com a literatura (LOUZEIRO, 2018; QUEIROZ, 2018; FERNANDES, 2018; ROCHA, 2006).

- Cimento CP V:
 - Extração, transporte e beneficiamento da argila e do calcário para a produção da farinha do clínquer;
 - Calcinação da farinha para a produção do clínquer e moagem do material;
 - Preparação e adição do filer calcário.

- Cimentos CP II Z e CP IV com o uso de argila calcinada:
 - Extração, transporte e beneficiamento da argila e do calcário para a produção da farinha do clínquer;
 - Extração e transporte da argila para calcinação;
 - Calcinação da farinha para a produção do clínquer e moagem do material;
 - Calcinação da argila;
 - Preparação e adição do filer calcário.

- Cimentos CP II Z e CP IV com o uso de RIC's:
 - Extração, transporte e beneficiamento da argila e do calcário para a produção da farinha do clínquer;
 - Transporte dos RIC's;
 - Calcinação da farinha para a produção do clínquer e moagem do material;
 - Moagem dos RIC's e adição ao cimento;
 - Preparação e adição do filer calcário.

3.7.1.5. – Fonte de dados

Os dados de entrada utilizados nesse estudo foram retirados de pesquisas feitas previamente por outros autores como Lana e Pereira (2020), Danieli et al (2020), Martins Filho e Martins (2016), Oliveira et al (2014) e Costa (2012). Para a produção dos dados de saída foram utilizadas equações desenvolvidas por Costa (2012), processo denominado Método QE-CO₂.

3.7.2. – Análise do Inventário de Ciclo de Vida (IVC)

3.7.2.1. – Consumo de Materiais

Os principais materiais considerados na produção dos cimentos são a argila, o calcário, o gesso e os RIC's. Segundo Queiroz (2018) a argila natural utilizada pela CIPLAN é extraída de uma jazida em Formosa (GO), há 53 km da fábrica, enquanto a jazida de calcário se localiza a apenas 2 km da fábrica e o gesso, por sua vez, é transportado do estado de Pernambuco. Já os RIC's são provenientes de olarias localizada em São Sebastião, há 69 km das principais fábricas de cimento do Distrito Federal.

A composição da farinha crua para a produção de 1 unidade funcional, ou seja, 1 tonelada de clínquer é: 95% de calcário, 4% de argila e 1% de minério de ferro, sendo o fator de clínquer utilizado de 1,55.

3.7.2.2. – Transporte

O transporte das matérias-primas é feito por transporte rodoviário, por meio de caminhões com capacidade para 30 a 60 toneladas. Serão percorridas distâncias de 53 km da jazida de argila até as fábricas e de 69 km das olarias até o mesmo ponto. A distância de transporte de calcário

foi considerada muito pequena para entrar na análise e a distância de transporte de gesso não foi considerada pertinente, uma vez que o enfoque maior será dado às argilas e aos resíduos.

3.7.2.3. – Emissões

As emissões dentro da cadeia produtiva do cimento possuem duas principais fontes: a descarbonatação dos materiais carbonáticos no processo de calcinação (tanto do clínquer quanto da argila) e a queima de combustíveis para alimentação do forno rotativo. Durante a análise e para a definição dos fatores de emissão, essas duas situações foram consideradas como um conjunto, seguindo a metodologia adotada pelos autores Lana e Pereira (2020), Oliveira et al (2014) e Tavares (2006).

Outros valores de emissões pertinentes estão relacionados com o transporte de matérias-primas até a indústria.

3.7.3. – Construção da matriz MET

A definição dos processos contidos na matriz MET levou em conta as atividades delimitadas pelas fronteiras de sistema. Cada tipo de cimento terá sua própria matriz com as atividades correspondentes a sua cadeia produtiva.

Os valores referentes a emissões de CO₂ de cada atividade serão considerados e calculados apenas para as etapas que ocasionem diferença significativa na interpretação final da Matriz. Sendo assim, atividades comuns para todos os cimentos não terão suas emissões de CO₂ computadas, pois serão iguais em todos os cenários estudados.

As etapas em que não serão considerados os teores de CO₂ são a extração, transporte e beneficiamento de areia e calcário para a produção da farinha do clínquer e a preparação e adição de filer calcário ao cimento.

3.7.4. Interpretação

Durante a fase de interpretação, as matrizes MET serão analisadas, assim como os resultados de emissões totais para cada tipo de cimento. Assim, verifica-se se o objetivo e o escopo

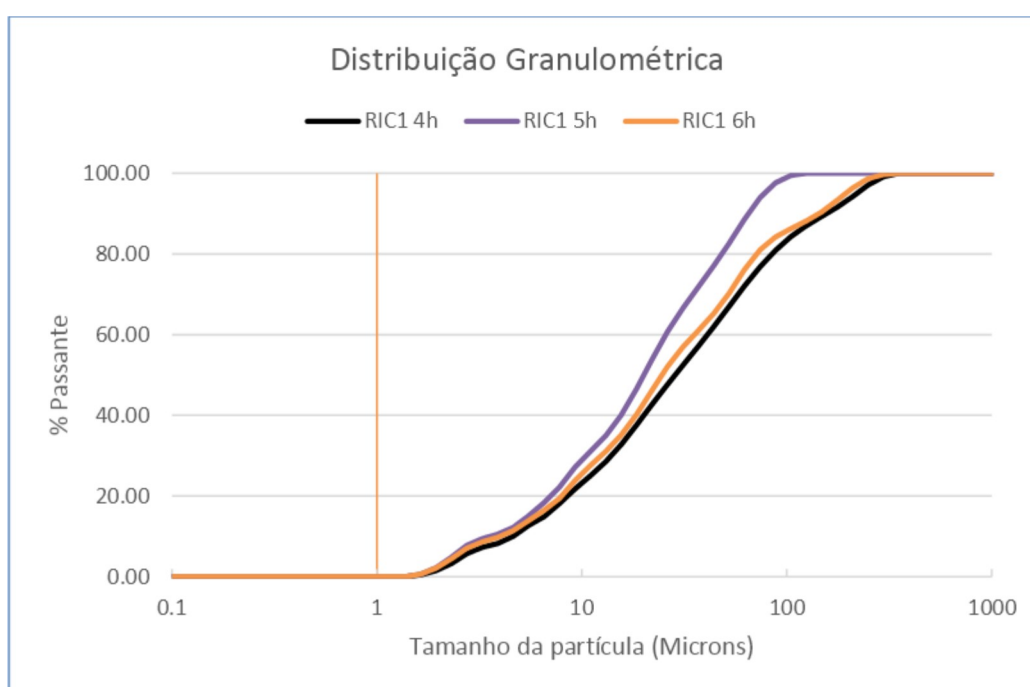
definidos foram atendidos e se os resultados encontrados estão de acordo com o esperado e o sugerido pela bibliografia. São levantadas hipóteses lógicas que justifiquem os resultados obtidos e os resultados são comparados entre si.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS E ANÁLISES

4.1. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Na Figura 20 e na Tabela 7 estão apresentados os resultados provenientes do ensaio da granulometria a laser feito na amostra RIC 1. Por meio desses dados, o objetivo foi determinar qual o tempo de moagem ideal a ser utilizado nas demais amostras para a posterior realização dos ensaios de caracterização dos materiais.

Figura 20 – Distribuição granulométrica RIC 1 após 4h, 5h e 6h de moagem



Fonte: Autoria própria (2020)

Tabela 7 – Características granulométricas para diferentes tempos de moagem

	d₉₀ (µm)	d₅₀ (µm)	d₁₀ (µm)
4 horas	156,60	28,47	4,61
5 horas	90,74	20,46	3,27
6 horas	68,36	19,30	3,23

Para determinar qual o tempo de moagem que seria adotado para as demais amostras, analisou-se qual deles atende ao determinado pela NBR 12653:2014 a respeito das características físicas

exigidas para que um material se caracterize como pozolana. Como explicitado anteriormente na Tabela 2, a porcentagem máxima de material retido na peneira 45 µm deve ser, no máximo, igual a 34% para pozolanas. Na Tabela 8 estão apresentadas as porcentagens referentes a cada tempo de moagem.

Tabela 8 – Material retido na peneira 45 µm para diferentes tempos de moagem

	% material retido na peneira 45 µm
4 horas	37,44
5 horas	25,98
6 horas	22,07

Assim, verifica-se que para 4 horas de moagem a granulometria não atende aos requisitos da NBR 12653, mas para 5 e 6 horas de moagem, esse parâmetro é atendido. Optou-se por adotar o tempo de 5 horas de moagem para as demais amostras, pois esse período se mostrou suficiente para que a granulometria desejada fosse atingida.

Caso fossem adotados maiores períodos de moagem, futuros resultados a respeito da pozolanicidade dos materiais poderiam estar mascarados, uma vez que quanto mais o fino o material, melhor o seu comportamento pozolânico, pois a granulometria pode se sobressair às características intrínsecas dos próprios materiais.

Outro motivo levado em consideração foi o enfoque sustentável da utilização dos RIC's. Se os resíduos fossem moídos por períodos extensos, o uso da argila calcinada extraída em natura se tornaria uma opção mais viável, tendo em vista que ela pode ser incorporada a materiais cimentícios de forma mais rápida e prática quando comparada aos RIC's. Ademais, quanto maior o beneficiamento aplicado a um material, maior o seu custo, o que reduz sua competitividade no mercado.

Portanto, amostras de 4kg de cada um dos materiais foram moídas pelo período de 5h no equipamento de Abrasão Los Angeles para que seu comportamento pudesse ser mapeado através de ensaios de caracterização e, em seguida, com as informações obtidas, o ciclo de vida desse material aplicado na indústria cimentícia pudesse ser analisado.

4.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A seguir serão apresentados e analisados os resultados obtidos a partir dos ensaios de caracterização dos materiais.

4.2.1. Espectrometria por fluorescência de raios-X

A Tabela 9 a seguir apresenta a caracterização química das 5 amostras de RIC's estudadas.

Tabela 9 – Caracterização química por meio de FRX

Óxidos Analisados (%)	Amostras Analisadas				
	RIC 1	RIC 2	RIC 3	RIC 4	RIC 5
SiO ₂	60,57	64,33	60,76	59,88	63,20
Al ₂ O ₃	30,91	23,81	32,60	32,84	22,92
Fe ₂ O ₃	2,64	5,31	1,65	1,51	7,06
TiO ₂	2,14	1,49	2,40	2,25	1,45
MnO	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
MgO	0,22	0,66	0,23	0,17	0,47
CaO	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Na ₂ O	<LQ	0,10	<LQ	<LQ	<LQ
K ₂ O	1,17	2,50	0,67	0,91	2,20
P ₂ O ₅	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
SO ₃	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
LOI (%)	1,46	1,34	0,79	1,37	2,04
Soma (%)	99,11	99,53	99,10	98,92	99,34

*(<LQ) = Abaixo do limite quantificável

Através da análise quantitativa do ensaio de FRX, foi possível constatar que os elementos majoritários são SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃. Dentre os RIC's, o RIC 2 apresentou o maior teor de SiO₂, igual a 64,33%, enquanto o RIC 4 apresentou esse óxido em menor quantidade (59,88%). Com relação ao teor de Al₂O₃, o RIC 4 apresentou o maior índice (32,84%) e o RIC 5, o menor (22,91%). O RIC 5 apresentou maior teor de Fe₂O₃, com 7,06% e o RIC 4, menor teor, com 1,51%.

É interessante destacar também que as amostras de RIC 2 e RIC 5, derivadas respectivamente de blocos cerâmicos avermelhados e tijolos maciços avermelhados, apresentaram maiores índices de Fe₂O₃, sendo igual a 5,31% para o RIC 2 e 7,06% para o RIC 5. Para as outras amostras, derivadas de tijolos de coloração esbranquiçada, o máximo teor de Fe₂O₃ encontrado

foi de 2,64% para o RIC 1. Portanto, constata-se a relação direta entre a presença em maior quantidade de Fe₂O₃ e a cor avermelhada dos resíduos.

Os valores encontrados estão de acordo com estudos realizados por autores como Brekailo et al (2019) e Sergio Filho et al (2020). Ao realizar o ensaio de fluorescência de raios-X em resíduos de blocos de cerâmica vermelha moídos, Brekailo et al (2019) encontram teores de 55,32% de SiO₂, 35,50% Al₂O₃ e 5,27% de Fe₂O₃. Já Sergio Filho et al (2020) encontraram, para resíduos de tijolo cerâmico moído, teores de 68,902% de SiO₂, 12,42% Al₂O₃ e 8,405% de Fe₂O₃. Em conclusão, apesar de destoantes, os valores encontrados no estudo são válidos.

A NBR 12653 determina que o somatório dos óxidos de SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ seja igual ou superior a 70% (Tabela 2). Dessa maneira, observou-se que todas as amostras atenderam à exigência da norma. Ainda segundo a NBR 12653, o teor de SO₃ não deve ultrapassar 4%, item também atendido para todos os resíduos estudados. A norma também controla o teor de álcalis disponíveis em Na₂O, não podendo este valor ultrapassar 1,5%. O valor mais alto encontrado foi de 0,10% para o RIC 2, sendo atendida, portanto, a exigência normativa. Por fim, todas as amostras atenderam à porcentagem máxima de perda ao fogo permitida de 10%. Esses resultados estão expressos na Tabela 10.

Tabela 10 – Comparação dos teores de óxidos encontrados com a NBR 12653

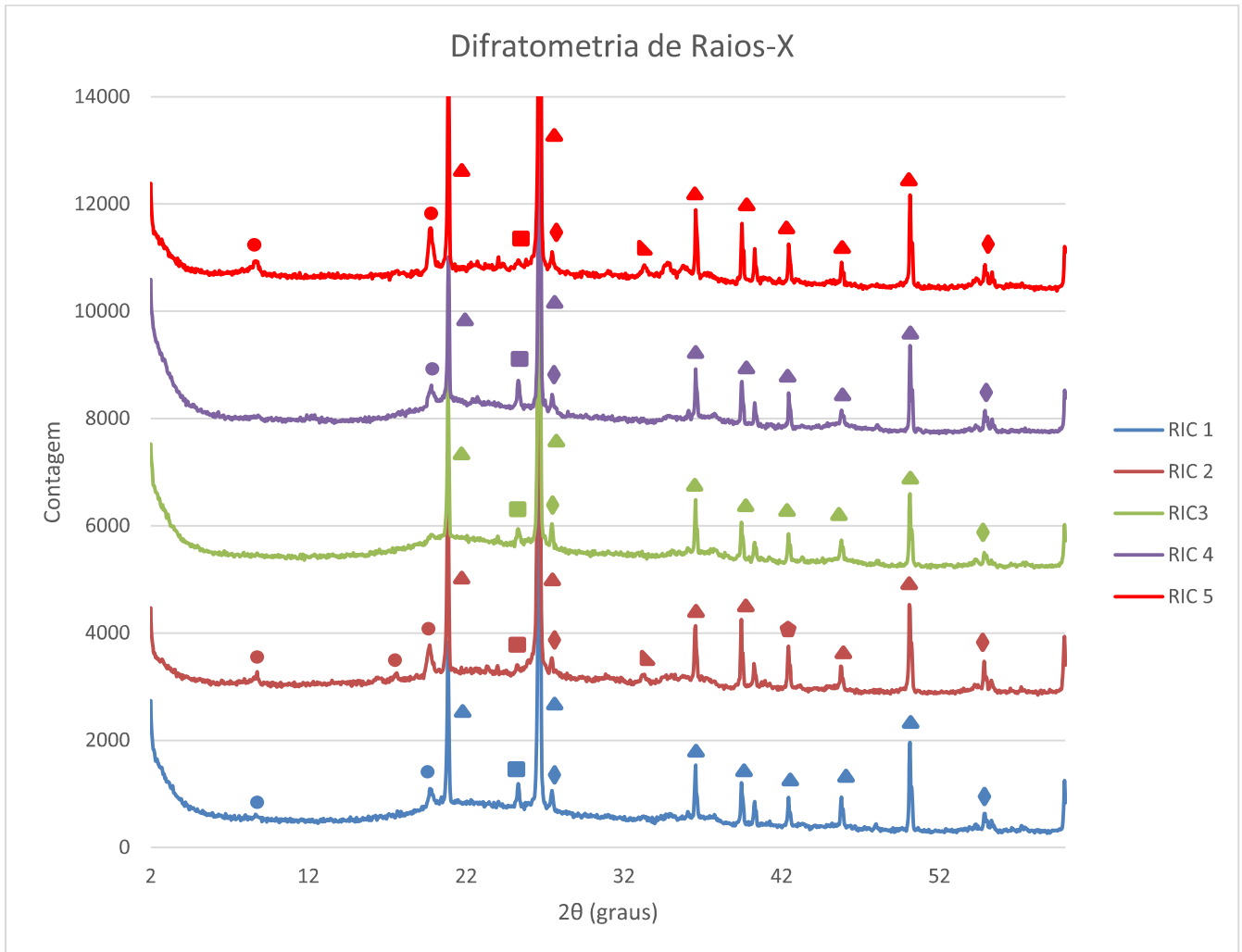
Óxidos Analisados	NBR 12653	Amostras Analisadas				
		RIC 1	RIC 2	RIC 3	RIC 4	RIC 5
SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃	> 70%	94,12%	93,45%	95,01%	94,23%	93,18%
SO₃	< 4%	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Na₂O	< 1,5%	<LQ	0,10%	<LQ	<LQ	<LQ
Perda ao fogo	< 10%	1,46	1,34	0,79	1,37	2,04

*(<LQ) = Abaixo do limite quantificável

4.2.1. Difração de raio-X

Os resultados qualitativos dos ensaios de difração de raio-X amostras de RIC coletadas podem ser visualizados na Figura 21.

Figura 21 – Resultados de Difractometria de Raios - X



LEGENDA

- Illita 2M1 – $(K,H_3O)Al_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$
- ▲ Quartzo – SiO_2
- ◆ Rutilo – TiO_2
- Anastásio – SiO_2
- ▼ Hematita – Fe_2O_2
- ◆ Mulita – $Al_6Si_2O_{13}$

Observa-se que o quartzo (SiO_2) é o mineral que ocorre em todas as amostras e sempre em maior intensidade, indo de acordo com os resultados encontrados pelo ensaio de FRX. Também são observados argilominerais do grupo da micáceas (ilita) e rutilo/anastásio. Esse mesmo comportamento foi observado pelos autores Garcia et al (2014) e Moura et al (2018) em suas pesquisas acerca da pozolanicidade de resíduos da indústria cerâmica.

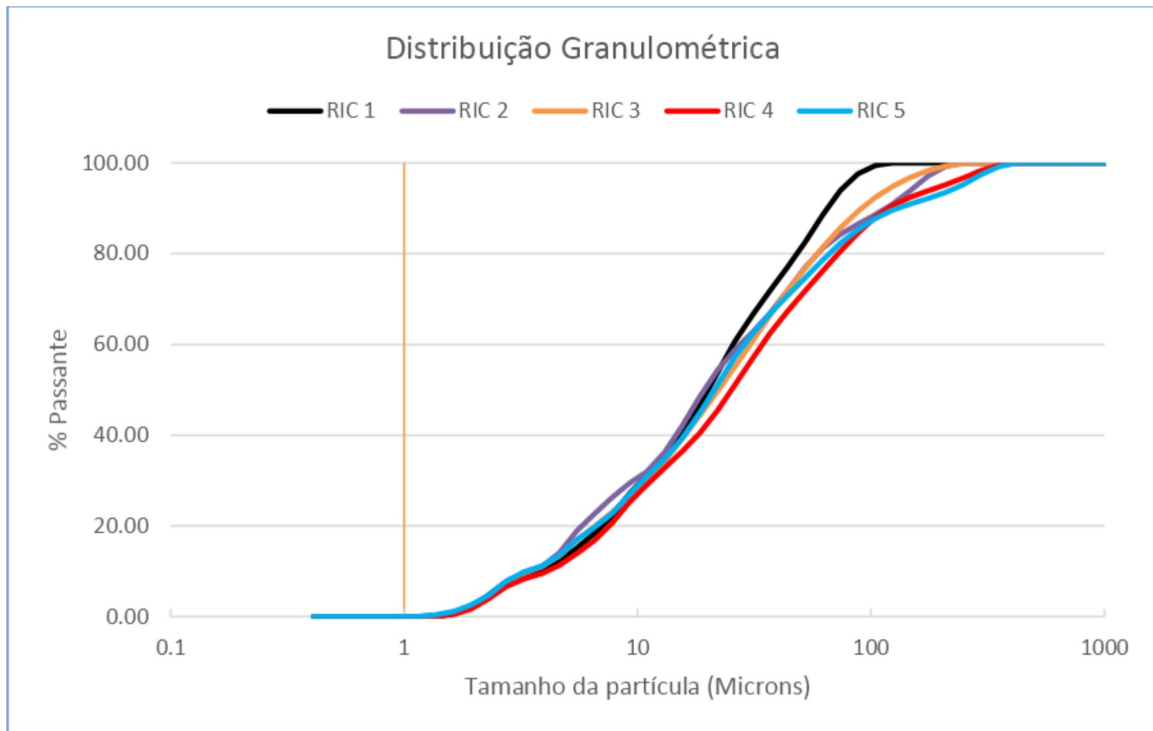
Por meio da Figura 21 também é possível constatar a presença de picos de Fe_2O_3 nas amostras RIC 2 e RIC 5, o que vai ao encontro dos resultados encontrados pelo ensaio de espectrometria por fluorescência de raios-X, em que essas mesmas amostras apresentaram maiores porcentagens de Fe_2O_3 em suas composições. Reforça-se, portanto, a relação entre a cor avermelhada dos resíduos e a presença em maior grau de hematita.

Nos difratogramas das amostras de RIC 1 e RIC 4 é possível observar, entre os intervalos de 2θ iguais a 20 e 30, a presença de um halo amorfo mais acentuado. Esse fenômeno é um indicativo de maior reatividade das amostras. É interessante ressaltar que, apesar de as amostras RIC 2 e RIC 5 serem provenientes das mesmas olarias que o RIC 1 e o RIC 4, respectivamente, eles não possuem halo amorfo tão acentuado. No entanto, todas as amostras apresentam certo grau de amorfismo em seus difratogramas.

4.2.2. Granulometria por raio laser

Os resultados provenientes dos ensaios de granulometria por raio laser estão apresentados na Figura 22 e na Tabela 11. Os ensaios foram realizados em todas as amostras de RIC, após serem moídas por 5h.

Figura 22 – Distribuição granulométrica RIC's



Fonte: Autoria própria (2020)

Tabela 11 – Características granulométricas para as amostras de RIC's

	d₉₀ (µm)	d₅₀ (µm)	d₁₀ (µm)
RIC 1	90,74	20,46	3,27
RIC 2	116,13	19,39	3,44
RIC 3	91,38	22,26	3,40
RIC 4	119,24	25,32	4,17
RIC 5	131,12	21,38	3,34

A partir dos gráficos apresentados e da Tabela 11 é possível observar que, de forma geral, os resíduos apresentaram comportamentos semelhantes em suas curvas granulométricas. Os valores de d_{10} diferiram-se em no máximo 22%, valores de d_{50} , em 24%, e valores de d_{90} , em 30%.

De forma geral, o resíduo RIC 1 apresenta partículas com dimensões menores que as outras amostras, tendo 10% de suas partículas com diâmetro inferior a 3,27 μm e 90% de suas partículas com diâmetro inferior a 90,74 μm . Já o RIC 4 apresenta o comportamento oposto, podendo ser visto como a amostra com partículas de maiores dimensões, com 10% de suas

partículas com diâmetro inferior a 4,17 μm e 50% de suas partículas com diâmetro inferior a 25,32 μm .

Segundo a NBR 12653:2014, a porcentagem máxima de material retido na peneira 45 μm deve ser, no máximo, igual a 34% para pozolanas. Assim, a Tabela 12 apresenta os dados referentes a porcentagem de material retido na peneira 45 μm para as amostras estudadas.

Tabela 12 – Porcentagem de material retido na peneira 45 μm para cada RIC

	% material retido na peneira 45 μm
RIC 1	25,98
RIC 2	27,46
RIC 3	27,57
RIC 4	32,11
RIC 5	28,77

Todas as amostras se mostraram dentro do critério da NBR 12653:2014 para a classificação quanto pozolana. Por sua vez, o procedimento de moagem durante 5h no equipamento de abrasão Los Angeles, foi eficiente em gerar, no máximo, 32% de resíduos retidos na peneira 45 μm , referentes ao RIC 4. Essa amostra já tinha sido apontada como detentora de partículas maiores, portanto o fato de ela ter retido maior porcentagem na peneira 45 μm está condizente.

O método adotado, portanto, mostrou-se eficiente em adequar as amostras ao determinado pela norma. Essa eficiência na obtenção dos resultados desejados é um indicativo da facilidade de moagem dos RIC's, o que pode favorecer o seu uso como material pozolânico, tendo em vista que o beneficiamento do material é geralmente uma etapa onerosa do processo de incorporação dos MCS.

4.3. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA SIMPLIFICADA (MÉTODO MET E MÉTODO QE-CO₂)

Os primeiros fatores a serem calculados pelo Método QE-CO₂ devem ser as massas utilizadas em cada processo produtivo. Em posse da unidade funcional de 1 tonelada e das respectivas porcentagens de cada material constituinte dos cimentos (MEHTA e MONTEIRO, 2014), tem-se a Tabela 13:

Tabela 13 – Materiais constituintes para 1 tonelada de cimento (em quilogramas)

Tipo de Cimento	Materiais				
	<i>Clínquer</i>	<i>Gesso</i>	<i>Filer Calcário</i>	<i>Argila Calcificada</i>	<i>RIC</i>
CP V	864	36	100	-	-
CP II Z	730	30	100	140	-
CP IV	595	25	100	230	-
CP II Z com RIC	730	36	100	-	140
CP IV com RIC.	595	25	100	-	230

A determinação dos fatores de emissão de CO₂ deve ser precedida da avaliação das etapas determinadas pelas fronteiras de sistema, de forma a verificar quais processos terão suas emissões computadas:

- Extração, transporte e beneficiamento da argila e do calcário para a produção da farinha do clínquer: por ser a mesma etapa em todas as cadeias produtivas e por assumir que todo o cimento será fabricado no mesmo local (CIPLAN ou Votorantim, pois são as indústrias mais próximas das olarias estudadas), não serão consideradas as emissões derivadas dessa etapa.
- Extração e transporte de argila para calcinação: serão consideradas as emissões provenientes do transporte de argila da jazida localizada em Formosa (GO) até a fábrica da CIPLAN. Esse transporte é feito por caminhões e eles percorrem uma distância de 106 km no trajeto de ida e volta. O processo de extração em si não gera poluição atmosférica significativa.
- Transporte dos RIC's das olarias até às indústrias: serão computadas as emissões provenientes do transporte de tijolos e blocos cerâmicos até às indústrias, realizado por meio de caminhões. A quilometragem total considerada será de 138 km referente aos trajetos de ida e volta à indústria.
- Calcinação da farinha para a produção do clínquer, mistura com gesso e moagem do material: dentro da cadeia produtiva do cimento é o processo que mais libera CO₂ para a atmosfera, portanto ele será considerado. Salienta-se que a moagem não emite gases estufa, apenas a calcinação.
- Calcinação da argila para ser utilizada como MCS: o processo emite volumes consideráveis de CO₂, logo ele será estudado.

- Moagem dos RIC para serem utilizados como MCS: a moagem não é responsável pela geração de nenhum tóxico, no entanto, é um processo que tem custo energético e esse custo está atrelado à emissão de CO₂ de forma indireta. Como o escopo da pesquisa foca apenas em emissões diretas de CO₂ durante o processo produtivo, essa atividade não será considerada como pertinente para a ACV.
- Preparação e adição do fíler calcário ao cimento: por ser a mesma etapa em todas as cadeias produtivas, suas emissões serão desconsideradas.

Tomando por base as definições estabelecidas, será necessário definir apenas os fatores de emissão relacionados ao transporte de RIC's realizado por caminhões, à produção de clínquer e à calcinação da argila.

Lana e Pereira (2020) e Tavares (2006) utilizaram em suas pesquisas emissões equivalentes iguais a 0,000076 ton de CO₂/ton de material por quilômetro percorrido em casos de transporte de materiais por caminhão. O transporte de RIC's das olarias até a indústria seria realizado por caminhões, então esse fator de emissão pode ser considerado adequado para ACV Simplificada.

Oliveira et al (2014), em seus estudos acerca das emissões tóxicas durante o processo produtivo de concretos, calculou que a emissão de CO₂ média durante os processos de beneficiamento do clínquer no Brasil é igual a 0,856 ton CO₂/ton de clínquer. Os autores se basearam em dados do Ministério da Ciência e Tecnologia (2011). Outras bibliografias analisadas (LOQUES, 2013; QUEIROZ, 2018) consideraram valores próximos ao adotado por Oliveira et al (2014), portanto os cálculos serão realizados com base nesse fator de emissão.

Danieli et al (2020) estudaram as emissões liberadas durante o processo de preparação de argila natural e sua calcinação para aplicação como adição ao concreto. O valor encontrado foi igual a 0,374 ton CO₂/ton de argila. Devido a pesquisa ter sido feita em território nacional e em um período recente, esse fator de emissão será adotado.

Após a determinação dos fatores de emissão, as equações (I) e (II) foram adaptadas e estão apresentadas abaixo, estando em função apenas da massa dos materiais e a distância percorrida:

- Transporte de argila e RICs:

$$CO_{2emissões,transporte} = M_{transportada} \times F_{e_{transporte}} \times quilometragem$$

$$CO_{2emissões,transporte} = M_{transportada} \times 0,076 \times quilometragem$$

- Calcinação da farinha para produção do clínquer:

$$CO_{2emissões,clínquer} = M_{clínquer} \times F_{e_{clínquer}} \times CKD$$

$$CO_{2emissões,clínquer} = M_{clínquer} \times 0,856 \times 1,02$$

- Calcinação da argila:

$$CO_{2emissões,argila} = M_{argila} \times F_{e_{argila}}$$

$$CO_{2emissões,argila} = M_{argila} \times 0,374$$

Em posse das atividades a serem consideradas e suas respectivas emissões, foi possível construir as primeiras matrizes MET para os cimentos CP V, CPII Z com argila calcinada e CP IV com argila calcinada.

Quadro 4 – Matriz MET para Cimento CP V

CP V			
	Materiais (Entrada e Saída)	Energia (Entrada)	Emissões de CO ₂
Produção e fornecimento de materiais e componentes	- Extração, transporte e beneficiamento da argila, do calcário (produção da farinha do clínquer).	- Diesel - Eletricidade - Carvão	- Desconsiderados
Fabricação: produção interna	- Calcinação para produção do clínquer e moagem; - Preparação e adição do fíler calcário.	- Eletricidade - Coque de petróleo	- Calcinação e moagem do clínquer = 0,7544 ton CO ₂
Total de CO₂ emitido = 0,7544 toneladas			

Quadro 5 – Matriz MET para Cimento CP II Z com argila calcinada

CP II Z com argila calcinada			
	Materiais (Entrada e Saída)	Energia (Entrada)	Emissões de CO₂
Produção e fornecimento de materiais e componentes	- Extração, transporte e beneficiamento da argila, do calcário (produção da farinha do clínquer); - Extração e transporte da argila a ser calcinada.	- Diesel - Eletricidade - Carvão	- Transporte da argila calcinada = 0,0011 ton CO ₂
Fabricação: produção interna	- Calcinação para produção do clínquer e moagem; - Calcinação da argila; - Preparação e adição do filer calcário.	- Eletricidade - Coque de petróleo	- Calcinação e moagem do clínquer = 0,6370 ton CO ₂ - Calcinação da argila = 0,0524 ton CO ₂
Total de CO₂ emitido = 0,6905 toneladas			

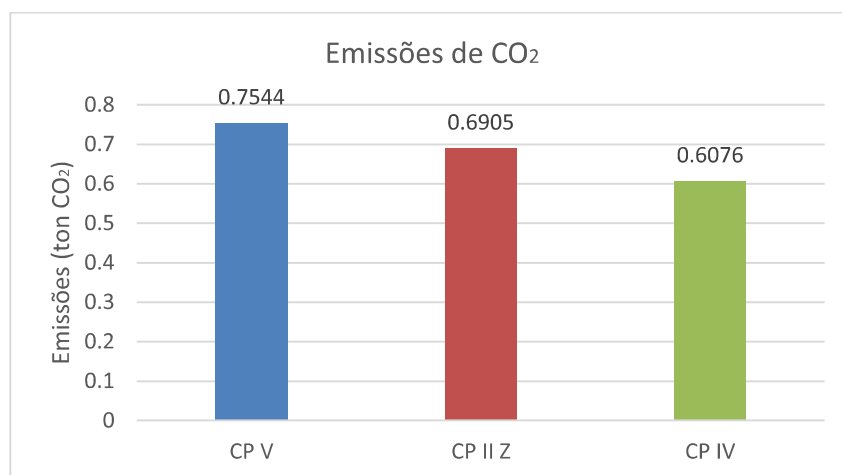
Quadro 6 – Matriz MET para Cimento CP IV com argila calcinada

CP IV com argila calcinada			
	Materiais (Entrada e Saída)	Energia (Entrada)	Emissões de CO₂
Produção e fornecimento de materiais e componentes	- Extração, transporte e beneficiamento da argila, do calcário (produção da farinha do clínquer); - Extração e transporte da argila a ser calcinada.	- Diesel - Eletricidade - Carvão	- Transporte da argila calcinada = 0,0019 ton CO ₂
Fabricação: produção interna	- Calcinação para produção do clínquer e moagem; - Calcinação da argila; - Preparação e adição do filer calcário.	- Eletricidade - Coque de petróleo	- Calcinação e moagem do clínquer = 0,5197 ton CO ₂ - Calcinação da argila = 0,0860 ton CO ₂
Total de CO₂ emitido = 0,6076 toneladas			

Por meio das matrizes MET é possível verificar que o cimento CP V (com menor teor de substituição) teve maior índice de emissão de CO₂, enquanto o cimento CP IV (com maior teor de substituição) apresentou o menor índice. Esse comportamento já era esperado, uma vez que a calcinação do clínquer é o processo que mais gera gases tóxicos. Uma vez que a porcentagem de clínquer é reduzida, conseqüentemente a quantidade total de CO₂ gerada no processo industrial diminui.

A escolha do cimento CP IV se mostra, portanto, ambientalmente mais vantajosa no que diz respeito a emissões tóxicas de gás carbônico, emitindo um total de 0,6076 toneladas de CO₂ durante a produção de 1 tonelada de cimento. Esse valor é 19,46% menor que a emissão total do cimento CP V de 0,7544 toneladas. No Gráfico 2 os resultados podem ser melhor observados.

Gráfico 2 – Emissões de CO₂ para cimentos CP V, CP II Z e CP IV



Fonte: Autoria própria (2020)

Martirena e Scrivener (2015) afirmam que os cimentos convencionais com substituição de clínquer de até 30% permitem a redução de aproximadamente 15-20% das emissões de CO₂. Os resultados encontrados confirmam a bibliografia, pois para um cimento com substituição igual a 23% obteve uma redução de quase 20% em suas emissões durante a sua industrialização.

Garantido o resultado de que quanto maior o teor de substituição, menores as emissões, se faz válida a comparação de matrizes MET entre os cimentos CP II Z e CP IV com o uso de argila calcinada e com o uso de RIC. Com esse processo, será possível observar se o uso de resíduos da indústria cerâmica representa uma alternativa mais ou menos vantajosa que o uso de argila natural beneficiada, dentro do escopo estudado nessa pesquisa.

Quadro 7 – Matriz MET para Cimento CP II Z com RIC

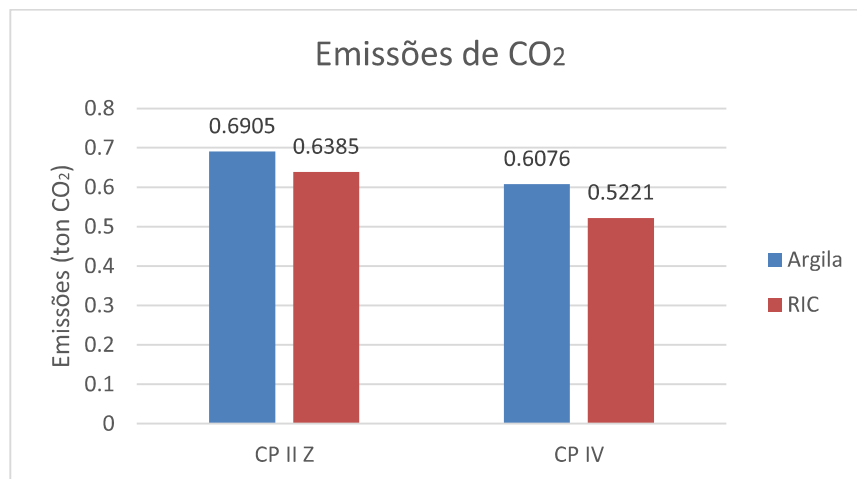
CP II Z com RIC			
	Materiais (Entrada e Saída)	Energia (Entrada)	Emissões de CO₂
Produção e fornecimento de materiais e componentes	- Extração, transporte e beneficiamento da argila, do calcário (produção da farinha do clínquer); - Transporte dos RIC's.	- Diesel - Eletricidade - Carvão	- Transporte dos RIC's = 0,0015 ton CO ₂
Fabricação: produção interna	- Calcinação para produção do clínquer e moagem; - Moagem dos RIC's; - Preparação e adição do filer calcário.	- Eletricidade - Coque de petróleo	- Calcinação e moagem do clínquer = 0,6370 ton CO ₂
Total de CO₂ emitido = 0,6385 toneladas			

Quadro 8 – Matriz MET para Cimento CP IV com RIC

CP IV com RIC			
	Materiais (Entrada e Saída)	Energia (Entrada)	Emissões de CO₂
Produção e fornecimento de materiais e componentes	- Extração, transporte e beneficiamento da argila, do calcário (produção da farinha do clínquer); - Transporte dos RIC's.	- Diesel - Eletricidade - Carvão	- Transporte dos RIC's = 0,0024 ton CO ₂
Fabricação: produção interna	- Calcinação para produção do clínquer e moagem; - Moagem dos RIC's; - Preparação e adição do filer calcário.	- Eletricidade - Coque de petróleo	- Calcinação e moagem do clínquer = 0,5197 ton CO ₂
Total de CO₂ emitido = 0,5221 toneladas			

Os cimentos utilizando adições de RIC obtiveram, como esperado, resultados menores que o cimento referência CP V. Comparando as situações entre os Quadros 5 e 7 e entre os Quadros 6 e 8, a mesma situação pode ser verificada: para os cimentos que utilizam os RIC's como adição, as emissões de CO₂ são menores em até 14%. O Gráfico 3 apresenta os resultados encontrados.

Gráfico 3 – Emissões de CO₂ para cimentos CP II Z e CP IV com argila e RIC



Fonte: Autoria própria (2020)

Os resultados encontrados na comparação entre cimentos CP II Z e CP IV com diferentes adições podem ser explicados pelo fato de que o fator de emissão da calcinação da argila (0,374 ton CO₂/ton de argila) em associação com o fator de emissão de transporte de argila natural por caminhão por uma distância total de 106 km (0,0078 ton CO₂/ton de RIC) é consideravelmente maior que o fator de emissão para transporte dos RIC's por uma distância total de 138 km (0,0105 ton CO₂/ton de RIC).

Além dos fatores de emissão, o fato de os RIC's já terem passado pelo processo de calcinação no momento em que estavam sendo transformados em tijolos maciços e blocos cerâmicos faz com que esse processo não precise ser realizado novamente. A argila em sua composição já foi calcinada e, assim, já se encontra com as propriedades físico-químicas necessárias que garantem a interação com os componentes do cimento Portland durante o processo de hidratação e mistura.

O único processo de adaptação necessário para a aplicação dos RIC's como MCS é a moagem dos materiais até que se atinja uma granulometria adequada. Esse processo não resulta em nenhum tipo de emissões tóxicas ou prejuízos ambientais de forma direta. Entretanto, o

processo de moagem ocasiona um maior gasto energético que contribui indiretamente com a liberação de CO₂.

Para efeitos de emissões diretas de CO₂, a utilização de RIC's no lugar de argilas calcinadas em cimentos CP II Z e cimentos CP IV aparenta ser mais vantajosa. No entanto, uma Avaliação de Ciclo de Vida mais detalhada e precisa poderá apresentar resultados mais concretos, inclusive levando em conta os gastos energéticos de cada atividade e suas possíveis emissões de CO₂ de forma indireta.

CAPÍTULO 5: CONCLUSÃO

Essa pesquisa foi desenvolvida para caracterizar os Resíduos da Indústria Cerâmica (RIC) da região do Distrito Federal e avaliar seu ciclo de vida dentro de uma cadeia produtiva de cimento Portland, com foco nas emissões de CO₂. Para tanto, foram coletadas 5 amostras de resíduos cerâmicos de 3 olarias distintas no DF. Essas amostras foram britadas e moídas para a realização dos ensaios de caracterização que incluíram espectrometria por fluorescência de raios-X, difração de raios-X e granulometria a laser. Por fim, uma Análise de Ciclo de Vida Simplificada foi feita por meio do Método Matrix MET em associação com o Método QE-CO₂, onde o foco foi analisar e comparar os diferentes teores de emissão de CO₂ em diferentes cimentos, com e sem o uso de RIC's como MCS.

A partir dos resultados encontrados na pesquisa, as seguintes conclusões podem ser feitas:

- O levantamento de olarias do Distrito Federal foi realizado e identificou-se que a maior concentração dessas indústrias ocorre na cidade satélite de São Sebastião, onde foram coletados os RIC's para esse estudo. Existem 3 principais olarias na região sendo elas a Olaria 3 Irmãos, a Olaria Vitória e a Olaria Santa Fé. A distância entre elas e o principal polo produtor de cimento e concreto no DF é de 69 km.
- De forma geral, por meio dos ensaios de caracterização realizados, os RIC's apresentaram comportamento semelhante ao normatizado para pozolanas na NBR 12653:2014. Esses resultados são um indicativo de que esses materiais talvez possam se enquadrar na classe pozolana e, assim, serem utilizados como MCS.
- A Avaliação de Ciclo de Vida Simplificada mostrou que o processo de fabricação do cimento CPV emite mais CO₂ do que o mesmo processo para os cimentos CP II Z e CP IV. Esse fator está relacionado com o teor de adições incorporadas a cada cimento: por ter menor teor de adições o cimento CPV apresentou a maior emissão de CO₂, enquanto o cimento CP IV, que apresenta maior teor de adições entre os cimentos estudados, teve como resultado a menor emissão de CO₂.
- Comparando cimentos CP II Z e CP IV com o uso de argila calcinada e esses mesmos cimentos com a substituição de argila calcinada pelos RIC's coletados, observou-se pela Avaliação de Ciclo de Vida Simplificada que o uso dos resíduos cerâmicos reduz as emissões de CO₂ em até 14%.

Conclui-se, portanto, que de forma geral os Resíduos da Indústria Cerâmica coletados nas olarias de São Sebastião apresentam grande potencial para serem utilizados como material cimentício suplementar, uma vez atestada sua pozolanicidade. Além disso, por meio da ACV Simplificada observou-se que o uso desses resíduos reduz a quantidade de CO₂ emitida durante o processo de fabricação do cimento Portland.

Não se pode ignorar, no entanto, que o processo de moagem dos RIC's para o seu beneficiamento e uso como MCS resulta em um gasto energético que, além de emitir CO₂ indiretamente, ainda aumenta os custos de produção.

Outro fator a ser considerado é que a redução nas emissões de CO₂ só pode ser considerada pertinente caso os cimentos com adições de RIC's apresentem propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade compatíveis com os demais cimentos.

Portanto, para o melhor aprofundamento do tema e análises mais aprofundadas, os seguintes temas são recomendados:

- Investigar de forma aprofundada de onde vem a argila utilizada nas Olarias do DF e entorno, mapear essas informações e fazer a caracterização desse material;
- Verificar a pozolanicidade dos RIC's do DF e entorno por meio de ensaios de avaliação da atividade pozolânica;
- Realizar a Avaliação de Ciclo de Vida dos RIC's de forma não simplificada por meio de softwares;
- Fazer uma análise de Avaliação de Ciclo de Vida dos RIC's com foco nos gastos energéticos envolvidos na cadeia produtiva;
- Fazer estudos de durabilidade em cimentos e concretos com a incorporação de RIC's.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALI, H.A.; XUAN, D.; POON, C.S. Assessment of long-term reactivity of initially lowly-reactive solid wastes as supplementary cementitious materials (SCMs). **Construction and Building Materials**, v. 232, Hong Kong, China, 2020, p. 117-192.

ARRUDA, F.F. et al. Absorção por Capilaridade em Concreto Produzido com Adição de Sílica Ativa, **Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia**, Maceió, Brasil, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Cimento – Básico sobre Cimento. Disponível em: < <https://abcp.org.br/cimento/> >. Acesso em: 11 de outubro de 2019.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 11768: Aditivos para concreto de cimento Portland**. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12653: Materiais pozolânicos**. Rio de Janeiro, 2014.

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

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14040: Gestão ambiental – Avaliação de ciclo de vida – Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14044: Gestão ambiental – Avaliação de ciclo de vida – Requisitos e orientações**. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15895: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado**. Rio de Janeiro, 2010.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade do ar (método de Blaine)**. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5751: Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias.** Rio de Janeiro, 2014.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5752: Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.** Rio de Janeiro, 2014.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2019.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NM 18: Cimento Portland – Análise química - Determinação de perda ao fogo.** Rio de Janeiro, 2012.

ASHBY, M.F.; **Materials and the Environment: Eco Informed Material Choice.** Burlington: Elsevier, 2009.

BERNAL, S.A. et al, Characterization of supplementary cementitious materials by thermal analysis, **Materials and Structures**, v. 50, Sheffield, Reino Unido, 2016.

BHAMRA, T. e LOFTHOUSE, V. **Design for Sustainability: A Practical Approach.** Gower House, Burlington, EUA 2007.

BRAKAILO, F. et al, Avaliação do potencial reativo de adições de resíduos de blocos de cerâmica vermelha e de concreto cominuído de RCD em matriz cimentícia, **Cerâmica**, v. 65, Ponta Grossa (PR), Brasil, 2019.

CAMPOS, T.W. e SANTOS, H.S. Estudos de amostras de diatomitos de uso industrial (norte-americana e francesa) por microscopia eletrônica de transmissão e varredura. **Cerâmica**, v.30, São Paulo, Brasil, 1984, p. 347-356.

CARNEIRO, V. L.; MOURA, W. A.; LEITE, M. B. Influência do Uso de Resíduo de Cerâmica Vermelha e Finos de RCD como Substituição Parcial de Cimento, para Produção de Argamassas. **Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção**, Feira de Santana, 2009. Anais... Feira de Santana: UEFS, 2009.

CASTRO, W. A. M. **Incorporação de resíduos de caulim em argamassas para uso na construção civil**. 2008. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. 2006. 445 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE), Rio de Janeiro, 2006.

COSTA FILHO, A.C., ZEFERINO, J.R. **Investigação do Uso de Resíduo Cerâmico como Material Cimentício Suplementar para Produção de Cimento CP IV para Concreto**. 2019. 56 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, SC, 2019.

COSTA, B.L.C., **Quantificação das Emissões de CO₂ Geradas na Produção de Materiais Utilizados na Construção Civil no Brasil**. 2012. 190 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2012.

CONSELHO REGIONAL DE ENGENHARIA E AGRONOMIA DE SANTA CATARINA. Concreto com sustentabilidade. Disponível em: < <http://www.crea-sc.org.br/portal/index.php?cmd=artigos-detalle&id=2660#.X7umWGVKjIU> >. Acesso em: 23 de novembro de 2020.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Mineraias para Concreto Estrutural. In: ISAIA, G. C.(Ed.). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realização**. São Paulo: IBRACON, São Paulo, Brasil, 2005.

DANIELI, S. et al. Avaliação do Ciclo de Vida em Argilas Calcinadas Passíveis de Uso em LC³, **6º Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção Civil**, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2020.

DRIVES, M. et al. The use of finely ground pumice pozzolan in GFRC composites, **GRC**, Dubai, 2015.

FERNANDES, A.J.M.M. **Influência do Teor de Sílica e Alumina no Comportamento Mecânico de Materiais Cimentícios Complementares**. 2018, 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo. Rio Grande do Sul. 2018

FIGUEIREDO, K. V. **Simulação de modelos informatizados de edificações utilizando avaliação do ciclo de vida e análise de eficiência energética: Estudo de caso e aplicações.** 2018, 73 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2018.

GARCIA, E; et al. Avaliação da atividade pozolânica dos resíduos de cerâmica vermelha produzidos nos principais polos ceramistas do Estado de São Paulo. **Cerâmica**, v. 61, São Paulo, Brasil, 2015, p. 251-258.

GARCIA, E; et al. Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV): Uma Alternativa como Material Pozolânico. **Cerâmica Industrial**, v. 19, São Paulo, Brasil, 2014.

GUERREIRO, A. Q. **Avaliação do ciclo de vida dos cimentos de produção mais significativa no Brasil.** 2014, 89 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul. 2014.

HOFFMAN, A.T. **Influência da Adição de Sílica Ativa, Relação Água/Aglomerante, Temperatura e Tempo de Cura no Coeficiente de Difusão de Cloretos em Concretos.** 2001, 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Rio Grande do Sul. 2001.

JUENGER, M.C.G; SIDDIQUE, R. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concreto **Cement and Concrete Composites**, v. 78, Austin, Estados Unidos, 2015, p. 71-80.

KIHARA, Y; SHUKUZAWA, J.K. Contribuição ao Estudo de Pozolanas no Brasil, **Cerâmica**, v. 28, São Paulo, Brasil, 1982, p. 15-24.

LACERDA, M. L. **Avaliação Geológica e Tecnológica de Argilas Pozolânicas do Distrito Federal: Argilas Pozolânicas.** 2010. 308 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

LANA, T.A.C.; PEREIRA, A.F.P. ACV Simplificada e Análise de Emissões de CO² em Sistemas de Vedação Arquitetônica, **Mix Sustentável**, v. 6, Florianópolis, SC, 2020, p. 145-162.

LIMA, C.J.F. **Sustentabilidade de Concretos com Mistura Binárias de Pozolanas e Resíduos de Demolição de Concreto com ênfase na Avaliação e Custo do Ciclo de Vida.** 2018. 219 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

LOQUES, R. **Avaliação do Ciclo de Vida Simplificada do Cimento Portland.** 2013. 49 f. Projeto de Graduação (Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro). Rio de Janeiro, RJ. 2013.

LOTHENBACH, B., SCRIVENER, K., HOOTON, R. D., Supplementary cementitious materials, **Cement and Concrete Research**, v. 41, Suíça, 2011, p. 1244-1256.

LOUZEIRO, G.R.M. **Avaliação do Ciclo de Vida do Cimento: Análise do Gasto Energético do Cimento LC³ em Comparação aos Portland CP I e CP IV.** 2018. 59 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2018.

MARTINS FILHO, S.T.; MARTINS, C.H.. Quantificação da Emissão de CO₂ para Pavers com Substituição Parcial de Areia por Cinza do Bagaço de Cana-de-açúcar, **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 9, Maringá, PR, 2016, p. 431-448.

MARTIRENA, J.F.; SCRIVENER K.L., Development and introduction of a low clinker, low carbon, ternary blend cement in Cuba. **Advances in cement research**, 2015, p.323-329.

MASSAZZA, F. Pozzolanic Cements. **Cement and Concrete Composites**, v. 15, Bergamo, Itália, 1993, p. 185-214.

MALHOTRA, V.M.; MEHTA, P.K. **Pozzolanic and Cementitious Materials**, Vol. 1, Ed. Taylor & Francis Group, Ontario, Canadá, 1996.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, J. P. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais.** 4 Edição. São Paulo: IBRACON, São Paulo, Brasil, 2014.

MONTANHEIRO, T.J. et al. Vidro Vulcânico Maciço: Pozolana Natural no Oeste Paulista. **Revista do Instituto de Geociências - USP**, São Paulo, Brasil, 2010.

MORAIS, D. M, **Briquetes de Resíduos Ligno-celulósicos como Potencial Energético para a Queima de Blocos Cerâmicos: Aplicação em uma Indústria que Abastece o Distrito**

Federal. 2007. 230 f. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2007.

MOURA, C.A.M. et al. Caracterização de resíduos telha cerâmica vermelha de fontes distintas visando proposta coprocessamento como matéria-prima para clínquer Portland. **Scientia Cum Industria**, v. 6, Mato-Grosso, Brasil, 2018, p. 31-37.

NEVES, I. B. F. **Avaliação da Carbonatação em Argamassas de Cimento com Adições de Cinza de Casca de Arroz Amorfa e Cristalina**. 2005. 149 p. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2005.

OLIVEIRA, V. C. H. C. et al. Estratégias para a minimização da emissão de CO₂ de concretos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 167-181, 2014.

PEREIRA-DE-OLIVEIRA, L. A.; CASTRO-GOMES, J. P.; SANTOS, M. S. S. The Potential Pozzolanic Activity of Glass and Red-Clay Ceramic Waste as Cement Mortars Components. **Construction and Building Materials**, v. 31, Covilhã, Portugal, 2012, p. 197-203.

PINHEIRO, D. G. L. **Avaliação da atividade pozolânica em cinzas de casca de arroz (CCA) com diferentes teores de sílica amorfa**. 2016. 100p. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2016.

QUEIROZ, V.S. **Avaliação do Ciclo de Vida de Emissão de CO₂ na Indústria do Cimento: um estudo comparativo entre o cimento LC³ e o cimento Portland composto**. 2018. 84 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2018.

REGO, J. H. S. **As Cinzas de Casca de Arroz (CCAs) Cristalina e Amorfa como Adição Mineral ao Cimento – Aspectos da microestrutura das pastas**. 2004. 274p. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2004.

OLIVEIRA, Maria Gisele Fonseca de. **ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050**. Rio de Janeiro: Snic, 2019. 64 p

ROCHA, E. G. A. **Os Resíduos Sólidos de Construção e Demolição: gerenciamento, quantificação e caracterização. Um estudo de caso no Distrito Federal**. 2006. 155 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006.

ROJAS, M.I.S et al. Use of ceramic industry milling and glazing waste as an active addition in cement. **Journal American Ceramic Society**, v. 101, Madri, Espanha, 2017, p. 2028-2037.

SANTANA, T. S. **Avaliação da Influência da Utilização de Agregado Miúdo Reciclado em Argamassas Estabilizadas**. 2018. 129 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2018.

SANTOS, P. S. **Ciência e Tecnologia das Argilas**, 2. Edição, São Paulo: Edgard Blucher, São Paulo, Brasil, 1992.

SENTHAMARAI, R.M.; MANOHARAN, P.D. Concrete with ceramic waste aggregate, **Cement and Concrete Composites**, v. 27, Chennai, Índia, 2005, p. 910-913.

SERGIO FILHO, João et al . Estudo da reologia de pastas cimentícias contendo resíduo de tijolo cerâmico moído e metacaulim. **Matéria (Rio J.)**, Rio de Janeiro , v. 25,n. 1, e-12554, 2020.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. Números - Números da Indústria. Disponível em: < <http://snic.org.br/numeros-industria.php> >. Acesso em: 9 de outubro de 2019.

SKIBSTED, J.; SNELLINGS, R.. Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends, **Cement and Concrete Research**, Brasília, Distrito Federal, v. 12, 2007, p. 42-46.

SPOSTO, R. M.; MORAIS, D. M.; PEREIRA, C. H. F. A Qualidade do Processo de Produção de Blocos Cerâmicos Fornecidos para o Distrito Federal, **Cerâmica Industrial**, v. 12, Arhus, Dinamarca, 2019, p. 105-121.

SOUSA, J. G. G. **Contribuição ao Estudo da Relação entre Propriedades e Proporcionamento de Blocos de Concreto – Aplicação ao Uso de Entulho como Agregado Reciclado**. 2001. 120 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2001.

STAFFORD, F. N. **Desempenho Ambiental da Indústria de Cimento Portland por Meio da Avaliação de Ciclo de Vida: Três Estudos de Caso**. 2016. 153 f. Tese (Doutorado em Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2016.

TAVARES, S. N. **Metodologia de Análise de Ciclo de Vida Energético de Edificações Residenciais Brasileiras**. 2006. 222 f. Tese (Doutorado em Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2006.

TEIXEIRA, V.G. et al. Principais Métodos de Caracterização da Porosidade de Resinas à Base de Divinilbenzeno. **Química Nova**, v. 24, São Paulo, Brasil, 2001, p. 808-818.

TORGAL, F.P., JALALI, S. Reusing ceramic wastes in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, Guimarães, Portugal, 2010, p. 832-838.

VASCONCELOS, W. S. **Ações de Controle da Produção de Alvenaria de Vedação em Blocos Cerâmicos: Um Estudo de Caso em Brasília/DF**. 2015. 166p. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2015.

WALKER, R., PAVÍA, S. Physical properties and reactivity of pozzolans, and their influence on the properties of lime–pozzolan pastes. **Mater Struct**, v.44, Dublin, Irlanda, 2011, p.1139–1150.

ZÁLESKA, M. et al. Physical and chemical characterization of technogenic pozzolans for the application in blended cements. **Construction and Building Materials**, v. 160, Praga, República Tcheca, 2018, p. 105-116.