



**UNIVERSIDADE TECNÓLOGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**  
**MULTICAMPI APUCARANA E LONDRINA**

**ANDRÉ ABREU**

**SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO POR ISOLADORES ELÉTRICOS DE  
PORCELANA PULVERIZADOS NA ARGAMASSA**

Apucarana

2021

ANDRÉ ABREU

**SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO POR ISOLADORES ELÉTRICOS DE  
PORCELANA PULVERIZADOS NA ARGAMASSA**

**REPLACEMENT OF CEMENT BY POWDERED ELECTRIC PORCELAIN  
INSULATORS IN MORTAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental / multicampi Apucarana e Londrina da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Área de Concentração: Engenharia Ambiental

Linha de Pesquisa: Tecnologias Ambientais

Orientador: Prof. Dr. Alesandro Bail

Coorientadora: Prof(a). Dr(a). Sarah Honorato Lopes da Silva

Apucarana

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite que outros remixem, adaptem e criem a partir do trabalho para fins não comerciais, desde que atribuam o devido crédito e que licenciem as novas criações sob termos idênticos.

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Londrina**



ANDRE ABREU

**SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO POR ISOLADORES ELÉTRICOS DE PORCELANA PULVERIZADOS NA ARGAMASSA**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Engenharia Ambiental.

Data de aprovação: 17 de Setembro de 2021

Prof Alesandro Bail, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Ricardo Schneider, - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.a Sarah Honorato Lopes Da Silva, - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.a Silvia Paula Sossai Altoe, Doutorado - Universidade Estadual de Maringá

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 17/11/2021.

## AGRADECIMENTO

Um homem sem fé e sem gratidão é um homem vazio, meus agradecimentos a Deus que rege tudo e a todos. Uma dissertação de mestrado não se faz sozinho. É o tipo de trabalho que é feito a “quatro mãos”, e, no meu caso, muitas mãos. Nas muitas etapas da pesquisa e no desenrolar das atividades de elaboração do trabalho final foram muitas as pessoas que me ajudaram e me incentivaram a perseverar. Gostaria de expressar meu sincero agradecimento a todas essas pessoas que estiveram comigo até aqui.

Ao professor Dr. Alesandro Bail que tão brilhantemente idealizou sua função de me orientar, guiar e arguir nesse trabalho. Acreditou em mim e me confiou essa pesquisa tão rica. Sua competência e genialidade que permitiram minha caminhada até aqui não somente nesse trabalho, mas em outros que surgiram a partir desse.

A professora Msc. Sarah Honorato Lopes, que com muita paciência se colocou à disposição, sanou e esclareceu muitas dúvidas no percurso dessa pesquisa com sua coorientação.

Ao professor Dr. André Mate Sagave, que foi meu orientador na graduação e prontamente me estendeu a mão para uma carta de indicação ao mestrado. Também ao me conceder o laboratório tecnológico (LATEC) da Universidade do Vale do Itajaí (UNIVALI) onde fiz a minha graduação, que em tempos de pandemia nada se abria, graças a ele os ensaios de resistência à compressão e à tração na flexão foram realizados.

Aos meus pais Alcides Costa Abreu e Sueli Aparecida Codognos Abreu, que sempre me incentivaram e puderam com muita luta me proporcionar conhecimento, também utilizei de suas mãos para a produção de isoladores elétricos moídos. Mérito nosso esse trabalho, vocês são parte de mim.

Ao meu filho Guilherme Correa Abreu, que mesmo distante, é minha força e minha luz, o papai disse que ia vencer e com sua ajuda estou vencendo. Te amo filho querido.

À minha esposa, Cely Myszkowski de Oliveira, sem a qual esse trabalho não teria sido realizado. Muito obrigado pelo amor, atenção, paciência e principalmente companheirismo em tudo. Muitas das epifanias e descobertas da pesquisa eu tive com você ao meu lado, que me ajudou não só nos ensaios, mas nas análises e no desenvolvimento da pesquisa. Dedico este trabalho a você.

Aos amigos de modo geral, mas não posso deixar de mencionar aqui, Cleberson Bernardo Paetzold que me acolheu como um irmão, ao Toni Roberto de Souza Filho que esteve presente com muita disposição para me apoiar e escutar, ao Eduardo Martins Sequeira

que me auxiliou nos ensaios de compressão e tração na flexão, onde no seu trabalho atual podemos romper os corpos de prova.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA) pela disponibilidade dos laboratórios multi-uso de pesquisa nos ensaios realizados na etapa de estudos preliminares desta dissertação. Ao Professor Doutor César Ricardo Teixeira Tarley, da Universidade Estadual de Londrina (UEL), pela disponibilização da discente Luciane Effting e das análises de microscopia eletrônica.

Enfim, encerro meus agradecimentos a você que por algum motivo está lendo, nunca se esqueça que você é aquilo que sonha. Sonhe alto, gratidão a tudo e a todos.

ABREU, André. **Substituição de cimento por isoladores elétricos de porcelana pulverizados na argamassa**: tecnologias ambientais. 2021. 129. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, 2021.

## RESUMO

Com a crescente escassez dos recursos naturais não renováveis e a indústria da construção civil sendo um dos setores que mais consome esses recursos, faz-se necessário a busca e o estudo de novos materiais não convencionais, os quais possam substituir parcial ou totalmente as matérias-primas cuja extração e processamento causam maior impacto ambiental. O presente estudo tem como objetivo investigar o potencial pozolânico do resíduo de isolador elétrico de porcelana. Para tanto, foi realizada uma avaliação da atividade pozolânica de resíduos de isoladores elétricos de porcelana, pulverizando-o e usando-o em substituição parcial ao cimento em formulações de argamassa nas proporções de 5%, 10% e 20%, aplicando uma metodologia de processamento adequada para explorar a atividade pozolânica do material, atendendo às normas de caracterização de cimento. O material cerâmico, substituto parcial do cimento Portland, atendeu aos requisitos físicos e químicos estabelecidos pela norma brasileira, na qual, a soma dos compostos  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  é maior que 89%, valor superior ao mínimo estabelecido (70%). Os resultados indicaram que esse tipo de material possui potencial para substituir o cimento em misturas cimentícias ao nível de 5%, mostrando-se eficaz nos requisitos físicos e químicos, sendo assim possível concluir que o uso da porcelana em substituição parcial ao cimento pode contribuir para a redução do impacto ambiental de argamassas cimentícias no que diz respeito às emissões de  $\text{CO}_2$ .

**PALAVRAS-CHAVE:** Resíduos de isoladores elétricos de porcelana; Redução de impacto ambiental; Construção civil; Substituição parcial do cimento em argamassas e pozolanicidade.

ABREU, André. **Replacement of cement by powdered electric porcelain insulators in mortar**: environmental technologies. 2021. 129. Dissertation (Master in Environmental Engineering) – Federal University of Technology - Paraná, Apucarana, 2021.

## ABSTRACT

Due to the growing scarcity of non-renewable natural resources, associated to the fact of the construction industry be one of the biggest consumers, it is necessary to search for new non-conventional materials, which can partially or totally replace raw materials whose extraction and processing cause an important environmental impact. This study aims to investigate the pozzolanic potential of porcelain electrical insulator waste. Therefore, an evaluation of the pozzolanic activity of residues from porcelain electrical insulators was carried out, powdering it and using it as a partial substitute for cement in mortar formulations in the proportions of 5%, 10% and 20%, applying a methodology of adequate processing to explore the pozzolanic activity of the material, meeting the standards for the characterization of cement. The ceramic material, a partial substitute for Portland cement, met the physical and chemical requirements established by the Brazilian standard, in which the sum of  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  compounds is greater than 89%, which is higher than the minimum established (70%). The results indicated that this type of material has the potential to replace cement in cementitious mixtures at a level of 5%, being effective in terms of physical and chemical requirements, thus it is possible to conclude that the use of porcelain as a partial replacement for cement can contribute to the reduction of the environmental impact of cementitious mortars with regard to  $\text{CO}_2$  emissions.

**KEYWORDS:** Waste from porcelain electrical insulators; Environmental impact reduction; Construction; Partial replacement of cement in mortars and pozzolanicity.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$\mu\text{m}$	Micrômetro
<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>AIE</b>	Agência Internacional de Energia
<b>A/C</b>	Relação Água/Cimento
<b>ANEEL</b>	Agência Nacional de Energia Elétrica
<b>ARI</b>	Alta Resistência Inicial
<b>Ca(OH)<sub>2</sub></b>	Hidróxido de Cálcio
<b>CPCB</b>	Conselho Central de Controle de Poluição
<b>CPs</b>	Corpos-de-Prova
<b>CPV</b>	Cimento Portland 5
<b>C-S-H</b>	Silicato de Cálcio
<b>DRX</b>	Difração de Raios X
<b>EPA</b>	Environmental Protection Agency
<b>FRX</b>	Fluorescência de Raios X
<b>GEE</b>	Gases de efeito estufa
<b>Gt</b>	Giga tonelada
<b>IAP</b>	Índice de Atividade Pozolânica
<b>IEA</b>	International Energy Agency
<b>IEP</b>	Isolador Elétrico de Porcelana
<b>IEPP</b>	Isolador Elétrico de Porcelana Pulverizado
<b>INPE</b>	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
<b>IPCC</b>	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
<b>kN</b>	Kilo Newton
<b>LATEC</b>	Laboratório Tecnológico
<b>LEED</b>	Liderança em Energia e Design Ambiental
<b>MEV</b>	Microscopia Eletrônica de Varredura
<b>mm</b>	Milímetros
<b>MPa</b>	Mega Pascal
<b>Mt</b>	Mega Tonelada
<b>MW</b>	Mega Watts
<b>NBR</b>	Norma Brasileira Regulamentadora
<b>P.A.</b>	Para análise
<b>PET</b>	Polietileno Tereftalato
<b>RCD</b>	Resíduo de Construção e Demolição
<b>SENAI</b>	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
<b>t</b>	Toneladas
<b>UEL</b>	Universidade Estadual de Londrina
<b>UNIVALI</b>	Universidade do Vale do Itajaí
<b>UTFPR</b>	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
<b>W</b>	Watts



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Variação anual das emissões de CO <sub>2</sub> 2010-2017.....	13
<b>Figura 2</b> - Exemplos de utilização dos isoladores elétricos de porcelana (IEP).....	21
<b>Figura 3</b> - Descartes de IEPs em caçambas, rios, terrenos e local de destinação de RCD. 22	
<b>Figura 4</b> - Fluxograma do processo de fabricação do cimento Portland.....	27
<b>Figura 5</b> - Fases de hidratação de misturas cimentícias.....	29
<b>Figura 6</b> - Processo de hidratação do cimento. ....	31
<b>Figura 7</b> - Fluxograma de materiais e métodos. ....	40
<b>Figura 8</b> - Isoladores elétricos de porcelana adquiridos para o processo de moagem. ....	42
<b>Figura 9</b> - Frasco de Le Chatelier para ensaio da massa específica do aglomerante. ....	46
<b>Figura 10</b> - Picnômetro para determinação da massa específica.....	48
<b>Figura 11</b> - Equipamento utilizado para o ensaio granulométrico. ....	49
<b>Figura 12</b> - Equipamento utilizado no ensaio de FRX.....	55
<b>Figura 13</b> - Equipamento utilizado no ensaio de DRX. ....	56
<b>Figura 14</b> - Microscópio Eletrônico de Varredura similar ao utilizado nesta dissertação. ....	57
<b>Figura 15</b> - Ensaio de consistência, mesa de flow.....	59
<b>Figura 16</b> - Equipamento utilizado para os ensaios: compressão e tração na flexão. ....	60
<b>Figura 17</b> - Curva granulométrica do agregado miúdo. ....	64
<b>Figura 18</b> - Curva granulométrica do IEPP. ....	67
<b>Figura 19</b> - Análise da difração de raios X da porcelana pulverizada.....	70
<b>Figura 20</b> - Análise de microscopia eletrônica de varredura da IEPP.....	71
<b>Figura 21</b> - Difração de raios X dos CPs referência.....	78
<b>Figura 22</b> - Difração de raios X dos CPs com substituição de 5% de aglomerante por IEPP. .....	79
<b>Figura 23</b> - Difração de raios X dos CPs com substituição de 10% de aglomerante por IEPP. .....	81
<b>Figura 24</b> - Difração de raios X dos CPs com substituição de 20% de aglomerante por IEPP. .....	82
<b>Figura 25</b> - Imagens de microscopia eletrônica de varredura dos CPs (a) referência e (b) contendo 5% de IEPP. ....	86
<b>Figura 26</b> - Resistência à compressão dos CPs ensaiados.....	88
<b>Figura 27</b> - Gráfico do resultado da tração da flexão (MPa).....	92

## LISTA DE TABELAS/QUADROS

<b>Tabela 1</b> - Composição do cimento Portland CPV-ARI.....	42
<b>Tabela 2</b> - Características físicas do cimento CPV-ARI.....	43
<b>Tabela 3</b> - Classificação do agregado miúdo de acordo com as frações granulométricas... 44	44
<b>Tabela 4</b> – Traços utilizados para preparar os CPs de referência e com IEPP. ....	52
<b>Tabela 5</b> - Ensaios, normas e amostras analisadas.....	58
<b>Tabela 6</b> - Massa específica do aglomerante. ....	61
<b>Tabela 7</b> - Massa específica do agregado miúdo. ....	62
<b>Tabela 8</b> - Análise granulométrica do agregado miúdo.....	63
<b>Tabela 9</b> - Ensaio granulométrico da porcelana.....	66
<b>Tabela 10</b> - Resultado da análise de fluorescência de raios X do IEPP. ....	68
<b>Tabela 11</b> - Dados obtidos pelo método Chappelle modificado conforme literatura. ....	73
<b>Tabela 12</b> - Dados obtidos pelo método Chappelle modificado conforme NBR 15895 (ABNT, 2010). ....	75
<b>Tabela 13</b> - IAP da metacaulinita de acordo com a temperatura de tratamento. ....	76
<b>Tabela 14</b> - Índice do desempenho da atividade pozolânica com o cimento Portland.....	84
<b>Tabela 15</b> - Índice de consistência da argamassa no estado fresco.....	85
<b>Tabela 16</b> - Análise de variância (ANOVA) em relação à idade de rompimento dos CPs. ..	90
<b>Tabela 17</b> - Análise de variância (ANOVA) em relação às substituições. ....	91

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	8
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	11
2.1 GERAL .....	11
2.2 ESPECÍFICOS .....	11
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	12
3.1 EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO .....	12
3.2 POLUIÇÃO DA INDÚSTRIA CIMENTEIRA E GERAÇÃO DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO .....	16
3.4 RESÍDUOS DE ISOLADORES ELÉTRICOS DE PORCELANA .....	19
3.5 REAÇÃO POZOLÂNICA .....	24
3.6 ASPECTOS TÉCNICOS DO CIMENTO PORTLAND .....	26
3.7 ALTERNATIVAS MUNDIAIS DO USO DE RESÍDUOS EM SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO .....	34
3.7.1 Incentivo da obtenção do selo LEED para gerenciamento de resíduos .....	34
3.7.2 Substituição do cimento por casco de vidro .....	35
3.7.3 Substituição do cimento por lascas de pneu .....	35
3.7.4 Resíduos de escória de cobre como material suplementar para o concreto .....	36
3.7.5 Utilização de agregados alternativos de isoladores elétricos de porcelana em concretos .....	37
3.7.6 Propriedades de argamassas de cimento produzidas com resíduo de isolador de porcelana .....	38
<b>4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS</b> .....	40
4.1 MATERIAIS .....	41
4.1.1 Porcelana .....	41
4.1.2 Aglomerante .....	42
4.1.3 Agregado miúdo .....	43
4.1.4 Água .....	44

4.1.5 Reagentes químicos.....	44
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	45
4.2.1 Massa específica do aglomerante.....	45
4.2.2 Massa específica do agregado miúdo.....	46
4.2.3 Análise granulométrica do agregado miúdo.....	49
4.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO ISOLADOR ELÉTRICO DE PORCELANA PULVERIZADO.....	50
4.3.1 Beneficiamento do isolador elétrico de porcelana.....	50
4.3.2 Análise granulométrica do IEPP.....	50
4.3.3 Definição do traço e moldagens dos CPs.....	51
4.3.4 Índice de atividade pozolânica (IAP) – Chappelle modificado.....	52
4.3.5 Índice de desempenho do material pozolânico com cimento Portland aos 28 dias.....	53
4.3.6 Caracterização estrutural e composicional dos materiais utilizados.....	54
4.3.6.1 Fluorescência de raios X.....	54
4.3.6.2 Difração de raios X.....	55
4.3.6.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	56
4.4 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA ARGAMASSA.....	57
4.4.1 Índice de consistência.....	58
4.4.2 Resistência à compressão e tração da flexão.....	59
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	61
5.1.1 Massa específica do aglomerante.....	61
5.1.2 Massa específica do agregado miúdo.....	62
5.1.3 Análise granulométrica do agregado miúdo.....	63
5.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA PORCELANA PULVERIZADA.....	65
5.2.1 Análise granulométrica da porcelana.....	65
5.2.2 Fluorescência de Raios X do IEPP.....	67
5.2.3 Difração de Raios X do IEPP.....	69

5.2.4 Microscopia eletrônica de varredura do IEPP .....	70
5.2.5 Índice de atividade pozolânica – Chapelle modificado .....	71
<b>5.3 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS</b> .....	<b>77</b>
5.3.1 Difração de Raios X dos CPs .....	77
5.3.2 Índice de desempenho do material pozolânico com cimento Portland aos 28 dias .....	84
5.3.3 Índice de consistência .....	85
5.3.4 Microscopia eletrônica de varredura das argamassas .....	85
5.3.5 Resistência à compressão simples e tração na flexão .....	87
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	<b>94</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>97</b>
<b>8 APÊNDICES</b> .....	<b>107</b>

## 1 INTRODUÇÃO

*“A pior consequência do desenvolvimento industrial e da produção de materiais, de forma a responder às necessidades crescentes da população mundial, é a deterioração do ambiente devido à poluição de recursos preciosos como o ar, o solo e a água” (GONDAL; SIDDIQUI, 2007).*

A procura mundial por agregados alternativos para aplicação na construção civil tem aumentado nos últimos anos, principalmente devido ao crescimento célere das economias de países como o Brasil, a China e a Índia. Naturalmente, este crescimento motiva o desenvolvimento de atividades de construção e demolição gerando, conseqüentemente, mais resíduos (AGUIAR et al., 2014).

Desse modo, uma vez que a tecnologia da indústria da construção civil encontra-se intimamente interligada ao uso de materiais e ao consumo de energia e recursos naturais, a degradação ambiental irreversível só poderá ser mitigada se o crescimento dessa indústria ocorrer de forma sustentável. Sendo assim, o alcance dar-se-á à medida que os materiais por ela produzidos e utilizados, bem como as estruturas por ela projetadas e construídas, forem duráveis, de baixo custo e amigáveis ao meio ambiente.

Nesse contexto, o desenvolvimento sustentável engloba a investigação de processos para a obtenção de materiais alternativos, que permitam o emprego de resíduos industriais na sua fabricação, que sejam duráveis e capazes de serem aplicados em diversas tecnologias (MATOS, 2015).

De acordo com a ABPC:

*“o cimento Portland, um dos componentes de maior destaque dentro da construção civil, possui uma ampla diversificação de usos por apresentar características peculiares, que confere ao cimento trabalhabilidade, moldabilidade, alta durabilidade e resistência a cargas e ao fogo” (ABCP, 2021).*

No entanto, apesar de todas as vantagens da utilização do cimento na construção civil, a produção de tal material traz consigo uma série de problemas ambientais (MAURY, 2012):

- Atividades de mineração;
- Geração de gases de efeito estufa;
- Transporte;
- Consumo de energia elétrica.

Diante dos problemas causados pela produção do cimento e do elevado consumo desse material pela sociedade, no ano de 2019 foram consumidas quase 55 mil toneladas; a utilização de materiais alternativos como seus substituintes parciais pode diminuir o impacto ambiental do setor sem causar danos à resistência e durabilidade das construções. Esse aspecto parece bastante atrativo para o cenário atual, onde toda e qualquer ação sustentável e amigável ao meio ambiente é bem-vinda (ABCP, 2020).

Nesse sentido, uma grande quantidade de estudos já foram realizados e têm apontado que a substituição parcial do cimento Portland em argamassas e concretos pode ser feita por diversos materiais, (Silva et al., 2016) como é o caso dos resíduos de isoladores elétricos de porcelana e de muitos outros.

A redução de consumo de cimento tem sido explorada por meio do uso de materiais alternativos, tal como o pó de pedra (BEZERRA et al., 2017), casco de vidro (CEMENT CONCRETE & AGGREGATES Australia, 2008), lascas de pneu (SIDDIQUE, 2014), escória de cobre (MOURA; GONÇALVES; LIMA, 2007), entre outros resíduos que cumpram a função de aglutinante e que possam preservar ou até melhorar as propriedades do produto final.

A inserção desses materiais às misturas cimentícias, seja em substituição ao cimento ou como adição, torna-se viável uma vez que, em muitos casos, pode

ocorrer reação com o hidróxido de cálcio liberado durante as etapas de hidratação do cimento, resultando em uma produção extra de silicatos de cálcio hidratados, os quais são os maiores responsáveis pela resistência das pastas de cimento. Em geral, essa é uma característica dos materiais pozolânicos e é chamada efeito pozolânico (DE OLIVEIRA; BARBOSA, 2006).

A indústria dos isoladores elétricos de porcelana é caracterizada por um setor industrial de expressiva produção no Brasil e com altas taxas de geração de resíduos. Isso associado à composição química desses materiais torna evidente seu potencial para reaproveitamento. O passivo anual brasileiro desse tipo de cerâmica é da ordem de 25 mil toneladas e vem aumentando com o acúmulo sofrido com o passar dos anos (ANTONIO; ANTONIO, 2015). Porém, é necessária uma análise mais detalhada das propriedades mecânicas das argamassas e concretos contendo esse tipo de adição, para que além de benefícios de cunho ambiental, esses tragam também qualidade e segurança às obras.

Portanto, o presente trabalho tem como objetivo o estudo da possibilidade de uso de isoladores elétricos de porcelana por meio do beneficiamento e caracterização desses materiais substituindo parcialmente cimento Portland em argamassas.



## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 GERAL**

Avaliar o emprego de isoladores elétricos de porcelana pulverizados na substituição parcial do cimento Portland nas formulações de argamassa e contribuir para uma nova tecnologia para a indústria fabricante de cimento por meio da substituição parcial do cimento.

### **2.2 ESPECÍFICOS**

- Desenvolver uma formulação para misturas cimentícias com substituição parcial do cimento Portland que possibilite diminuir seu consumo e resulte em vantagens ambientais;
- Investigar o potencial pozolânico do isolador elétrico de porcelana pulverizado;
- Analisar a influência da substituição do cimento pelo isolador elétrico pulverizado no desempenho mecânico das argamassas;
- Estudar a influência da porcelana pulverizada sobre as propriedades mecânicas dos corpos-de-prova por meio da difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura do isolador elétrico de porcelana e da argamassa.
- Propor um mecanismo químico de ação da porcelana pulverizada como material substituto parcial do cimento.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesse capítulo serão apresentadas estruturas teóricas relevantes para a compreensão do estudo mencionado.

#### 3.1 EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO

O Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - IPCC (IPCC, 2014) - afirma que as emissões antropogênicas de gases de efeito estufa (GEE) são alarmantes e que a participação da humanidade nas mudanças climáticas globais é evidente.

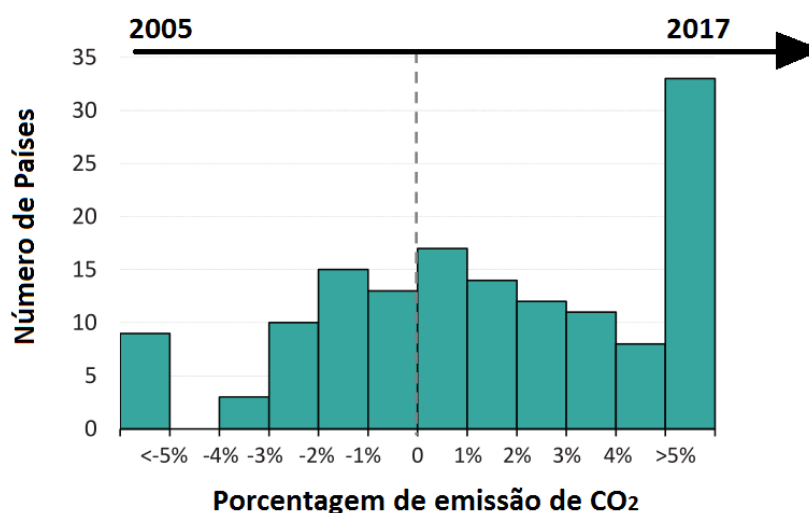
A chamada pegada de carbono (em inglês *carbon footprint*) é frequentemente usada como uma referência à quantidade de carbono (geralmente em toneladas) emitida por uma atividade ou organização. Por exemplo, as emissões de carbono provenientes da queima de combustíveis fósseis se acumulam na atmosfera se não houver biocapacidade suficiente para absorvê-las e promovem o aumento do efeito estufa. Portanto, quando a pegada de carbono é relatada no contexto da pegada ecológica total, as toneladas de emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) são expressas como a quantidade de área de terra produtiva necessária para sequestrar essas emissões de CO<sub>2</sub>. Finalmente, isso expressa qual é a biocapacidade necessária para neutralizar as emissões de queima de combustíveis fósseis (CCCF, 2020).

Segundo BIROL (2019), no relatório da Agência Internacional de Energia (AIE), dois terços dos países aumentaram seus níveis de emissões de GEE desde 2010. Cerca de 20% dos países, os quais apresentaram taxas de crescimento anual superior a 5%, representam 5% das emissões globais e estão distribuídos homogeneamente entre os continentes.

Atualmente, dos 214 países, dois deles e uma organização transnacional são responsáveis por 55% das emissões globais totais de CO<sub>2</sub> (OLIVIER et al., 2014). A China gera 10,3 Gt de emissões de CO<sub>2</sub> (29% do total), e os Estados Unidos são responsáveis por 5,3 Gt de CO<sub>2</sub> (15% total). A União Europeia – UE, por sua vez, é responsável por 3,7 Gt de CO<sub>2</sub> (11% do total).

No entanto, para atribuir a responsabilidade deve-se considerar os fluxos de “*Carbon footprint*” - pegada de carbono, o que torna os números um pouco diferentes. Uma visão geral desse modelo pode ser vista na Figura 1.

**Figura 1** - Variação anual das emissões de CO<sub>2</sub> 2010-2017.



Fonte – IEA (2019).

O desenvolvimento de técnicas de avaliação da pegada de carbono na última década forneceu um conjunto de ferramentas para monitorar as emissões de CO<sub>2</sub> no mundo (ČUČEK; KLEMEŠ; KRAVANJA, 2012). Uma visão geral das tendências virtuais de CO<sub>2</sub> no comércio internacional com base na perspectiva de consumo da população mundial foi realizada com base na literatura recente, resultando em uma observação seguida de uma recomendação (LIU et al., 2015):

- (1) Existem lacunas significativas de CO<sub>2</sub> entre as emissões do produtor e do consumidor;
- (2) Consumir ou optar por produtos importados produzidos com menor intensidade de emissão de carbono do que na indústria doméstica.

Os GEE possuem também relevante contribuição dos incêndios e queimadas. Em 2015 mais de 94 mil incêndios, a maioria em turfeiras ricas em carbono, tomaram conta da Indonésia, liberando grande quantidade de fumaça espessa (RAYMOND et al., 2015). Como resultado das imensas reservas de carbono convertidas em CO<sub>2</sub> e lançadas à atmosfera pelos incêndios, milhões de pessoas na Malásia e Cingapura tiveram sua saúde afetada. Tal como reportado pela literatura, no final de outubro de 2015, os incêndios liberaram cerca de 10 toneladas de CO<sub>2</sub>, equivalente a cerca de 3% das emissões globais de combustíveis fósseis ou mais emissões de carbono do que as liberadas pela Alemanha em 2013 (WHITBURN et al., 2015). Além disso, desde setembro de 2015, em 26 ocasiões, as emissões diárias da Indonésia decorrentes dos incêndios excederam as geradas pela economia dos Estados Unidos.

As queimadas também apresentam agressão ao meio ambiente e, no Brasil, a origem das queimadas no ambiente rural está relacionada com o meio de produção, que tem no manejo do fogo a solução mais rápida e econômica para geração de renda na agricultura (STARLING ASSAD DE AVILA et al., 2019).

De acordo com dados do Instituto nacional de Pesquisas Espaciais (INPI), o Brasil encerrou 2020 com o maior número de focos de queimadas em uma década (INPE, 2021). No ano de 2020, o país registrou, aproximadamente, 223 mil focos contra 197 mil em 2019, um aumento de 12,7%. Os números ficaram

atrás do recorde de 2010, quando o país registrou cerca de 319 mil focos de incêndio.

Durante a combustão da matéria orgânica há formação de CO<sub>2</sub>, principal gás de efeito estufa, representando cerca de 90% dos gases liberados. Desse modo, a queima de biomassa afeta não apenas a floresta a nível local, mas também o ciclo do carbono, influenciando as trocas radiativas terrestres e as mudanças no clima. A liberação de dióxido de carbono na atmosfera é um dos fatores mais importantes para o aquecimento global e atualmente o Brasil é o sétimo país que mais contribui para o nível de emissões de carbono no mundo, prejudicando, portanto, não só a saúde da população brasileira, como também da comunidade internacional (PADILLA et al., 2017)

Não somente os incêndios e as queimadas, mas os desmatamentos também interferem de forma direta no que se refere ao meio ambiente. No sentido de promover desequilíbrio climático, o desmatamento em áreas naturais vem causando o aquecimento global, pois a função da vegetação é controlar a temperatura e as chuvas. Por exemplo, de acordo com pesquisas relacionadas ao chamado Rio Voador, a floresta amazônica é um importante fornecedor de umidade atmosférica, proporcionando melhor controle de temperatura e certa frequência de chuvas para grande parte do continente sul-americano. Se essa dinâmica for considerada de uma perspectiva global, pode-se concluir que a retirada de florestas tem contribuído para aumentar a média térmica e reduzir as chuvas em várias regiões. Dados divulgados pelo INPE mostram que entre agosto de 2019 e julho de 2020 houve um aumento de 34,5% nos alertas de desmatamento em relação ao mesmo período do ano anterior. Ao todo, no Brasil, foram 9205 km<sup>2</sup> desmatados (INPE, 2021).

Quando se trata da análise setorial da origem das emissões de dióxido de carbono, sabe-se que o setor de geração de eletricidade e calor, transporte e indústria são responsáveis por mais de 80% das emissões globais de CO<sub>2</sub> (AMMENBERG et al., 2015). Por esse motivo, existe uma grande necessidade de redução das emissões de CO<sub>2</sub> provenientes desses setores (ČUČEK; KLEMEŠ; KRAVANJA, 2012b).

### **3.2 POLUIÇÃO DA INDÚSTRIA CIMENTEIRA E GERAÇÃO DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

A produção global da indústria cimenteira cresceu mais de 73% entre 2005 e 2013, de 2,31 Gt para 4,0 Gt, o que significa que também houve um aumento considerável nas emissões de CO<sub>2</sub> provenientes da produção de cimento (BRANNVOLL, 2019). Em 2015 a produção global de cimento caiu 1,91%, saindo de 4,18 Gt em 2014 para, aproximadamente, 4,10 Gt em 2015. Já em 2016, a produção voltou a crescer, sendo a China e a Índia, de longe, os maiores países produtores de cimento do mundo (MINERAL COMMODITY SUMMARIES, 2017). Segundo GARSIDE (2021), a produção global de cimento deverá aumentar de 3,27 Gt em 2010 para 4,83 Gt em 2030. Assim, a indústria de cimento é um poluidor industrial relevante em termos de GEE e as reduções de emissões nesse setor podem contribuir significativamente com as reduções das emissões gerais de GEE (VALDERRAMA et al., 2012). Globalmente, o setor do cimento é responsável por 5 a 7% de todas as emissões antropogênicas de dióxido de carbono e cerca de 3% do total de emissões de GEE (FRY, 2013).

Além da geração de CO<sub>2</sub> associada à produção do cimento, nas últimas décadas, o setor contribuiu para uma crise ambiental global impulsionada

parcialmente por recursos materiais desperdiçados, e pelo ritmo acelerado da geração de resíduos de construção e demolição (RCDs) em todo o mundo. Em 2014, as atividades geradoras de RCDs resultaram em 1,13 bilhão de toneladas na China (LU et al., 2017); mais de 850 milhões de toneladas na UE (EUROSTAT, 2019); e mais de 530 milhões de toneladas nos EUA (EPA, 2018).

De forma geral, os RCDs são um dos resíduos gerados em maior quantidade no mundo. Constatou-se que os RCDs atingiram 30 a 40% do total de resíduos sólidos devido às atividades de construção e demolição em larga escala resultantes da acelerada urbanização e reconstrução de cidades que passaram por desastres naturais (AKHTAR; SARMAH, 2018).

A taxa de urbanização rápida não é responsável apenas pelo aumento do uso de recursos não renováveis, mas também pela geração de grande quantidade de RCDs, o que causa uma preocupação ambiental relevante (WU et al., 2016). Vários estudos revelaram significativos impactos ambientais e consequências dos RCDs, incluindo aumento da poluição, esgotamento de recursos e deterioração da terra (COELHO; DE BRITO, 2012). Ressalta-se que a ausência de um plano adequado de gerenciamento de resíduos em grandes centros urbanos, incorre na destinação a aterros sanitários de uma parcela significativa (85 a 90%) dos RCDs gerados (ABEDIN; JAHIRUDDIN, 2015). Por sua vez, essa prática tem se tornado uma ameaça potencial ao desenvolvimento sustentável e à segurança ecológica.

No Brasil, os RCDs são classificados como algum resíduo sólido do tipo inerte em conformidade com a NBR 10004, incluindo metal, argamassa, concreto, tijolo, plástico, madeira, cerâmica e vidro, cuja capacidade de reutilização é de, aproximadamente, 80% do seu conteúdo, indicando um alto potencial para exploração do valor econômico dos RCDs (ZHENG et al., 2017).

Tendo isso em vista, um grande número de estudos foi realizado para a quantificação de RCDs em diferentes países do mundo, tais como na Grécia (FATTA et al., 2004), Tailândia (KOFOWOROLA; GHEEWALA, 2009), Taiwan (HUANG et al., 2011), Espanha (VILLORIA SÁEZ; DEL RÍO MERINO; PORRAS-AMORES, 2012) Malásia (MAH; FUJIWARA; HO, 2016) e China (DING; XIAO, 2014).

Vários métodos têm sido propostos ao longo do tempo para a estimativa dos RCDs, tais como, (a) modelo empírico baseado em regressão (YOST; HALSTEAD, 1996), (b) modelo dinâmico baseado em atividades (HSIAO et al., 2002), (c) modelo de análise de sistema baseado em planilha (WANG et al., 2004), (d) modelo de análise de processo de entrada baseado na Web (LI; ZHANG, 2013), (e) abordagem (DING; XIAO, 2014) e (f) modelo de princípio do balanço de massa (LI et al., 2016).

No Brasil, a produção estimada de RCDs é superior a 70 milhões de toneladas/ano (cerca de 500 kg/ano per capita), porém, como esse valor é variável e dependente do índice de desenvolvimento humano (IDH), observa-se variações importantes nos valores quando são consideradas diferentes regiões geográficas. O lixo ilegalmente despejado em áreas urbanas, riachos, estradas e outros locais despreparados apresenta impactos ambiental e econômico substanciais, resultando em problemas financeiros para a comunidade e administração pública. Nos últimos anos, os governos aprovaram novas políticas sobre responsabilidade ambiental, despejo e reciclagem de resíduos em geral. Como resultado, a situação nas grandes cidades está mudando com a implantação de usinas de reciclagem, porém, atualmente apenas uma pequena parte dos RCDs é recuperada (CONTRERAS et al., 2016).



Os RCDs compreendem uma ampla variedade de materiais, como resultado de diferentes técnicas e atividades do setor de construção (DI MARIA; EYCKMANS; VAN ACKER, 2018). A fração mineral é composta por resíduos não perigosos, mas devido às altas taxas de geração, a logística e o uso da terra para armazenamento temporário ou aterro representam as principais preocupações em sua gestão (GÁLVEZ-MARTOS et al., 2018).

Com o objetivo de reduzir a quantidade de RCDs descartados em aterros, os regulamentos ambientais incentivam a redução, reutilização e reciclagem de fontes como estratégias de gestão mais adequadas, especialmente nos países desenvolvidos. Em particular, a reciclagem tem sido mais utilizada em comparação à redução e à reutilização, embora apenas alguns países tenham atingido altas taxas de reciclagem até o momento (EUROSTAT, 2019). Os principais motivos são a baixa disponibilidade de aterros (LEGG et al., 2008), alta disponibilidade e/ou baixo preço de agregados naturais (BLENGINI; GARBARINO, 2010), baixa qualidade de agregados reciclados (DI MARIA; EYCKMANS; VAN ACKER, 2018), falta ou classificação ineficiente de resíduos na fonte (HOSSAIN; WU; POON, 2017).

### **3.4 RESÍDUOS DE ISOLADORES ELÉTRICOS DE PORCELANA**

O sistema elétrico brasileiro é proporcional à extensão territorial do país, totalizando 164,8 mil MW de potência instalada e 46 empresas geradoras, com quase 84 milhões de unidades consumidoras, conforme levantamentos da

Agência Nacional de Energia Elétrica do primeiro trimestre de 2019 (ANEEL, 2019).

Os isoladores elétricos de porcelana (IEP) são utilizados em todo o processo de geração de energia elétrica (Figura 2). Sua produção concentra-se em aproximadamente seis empresas no Brasil. A produção brasileira em 2001 foi de 33 mil toneladas, correspondendo a um faturamento de cerca de US\$ 50 milhões. Após um aumento nos investimentos por parte das empresas privatizadas na área de distribuição, para cumprimento de metas da ANEEL, o mercado tem se mantido mais estável em função das indefinições da questão tarifária. Já o mercado associado à produção e transmissão de energia tem aumentado a demanda devido à necessidade de aumento de capacidade e a interligação de sistemas, com o objetivo de disponibilizar sobras regionais de energia elétrica para as áreas com carência de oferta (ANEEL, 2019).

**Figura 2** - Exemplos de utilização dos isoladores elétricos de porcelana (IEP).

a) Isoladores elétricos em postes urbanos



b) Isoladores elétricos em padrões residenciais



c) Isoladores elétricos em subestações



**Fonte** - a) ELETROBRAS (2018); b) ANCORA (2019); c) TECNOGERA (2019).

Dentre os materiais isolantes utilizados no sistema de transmissão e distribuição de energia elétrica, o IEP é o material mais comumente utilizado para isoladores aéreos (MORENO, 2012). Isoladores elétrico de porcelana, possuem propriedades, como alta resistência mecânica, alta estabilidade elétrica e resistência a corrosão, mesmo em ambiente úmido (HWANG et al., 2011).

Os IEPs são os materiais cerâmicos multifásicos mais complexos usados como isolantes aéreos para isolamento de baixa e alta tensão (YAYA et al., 2017). São basicamente produzidos a partir de matérias-primas cerâmicas naturais como argilas, caulim, feldspato e quartzo (AKWILAPO; WIJK, 2004). Na Figura 3 têm-se imagens de IEPs após utilização nas redes elétricas.

**Figura 3** - Descartes de IEPs em caçambas, rios, terrenos e local de destinação de RCD.



Fonte - CAMPOS, 2009.

No processo de produção, esses dispositivos passam por diferentes transformações físicas e reagem juntos sob condição térmica para gerar o produto final (YAYA et al., 2017). As argilas que compõe esses dispositivos, tal como silicatos de alumínio ou magnésio hidratado, contendo em certos tipos, outros elementos como ferro, potássio e lítio. a caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), apresentam papel fundamental na atuação como aglutinantes para os outros ingredientes e garantem a plasticidade do material e sua fácil moldagem e modelagem. Ao mesmo tempo, o feldspato  $[(\text{K}, \text{Na}, \text{Ca})(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8]$  funciona como fundente e fonte alternativa de alumina e sílica, enquanto o quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), usado como material de enchimento, ajuda a manter a forma do corpo de porcelana no estado fresco e durante a queima (MERGA et al., 2019).

O Isolador de porcelana especial, isto é, isoladores de subestações elétricas, recebem adição de alumina, podendo ser chamados de isoladores de alumina. Outras matérias-primas podem ser empregadas para melhorar a resistência mecânica (via de regra, a combinação da argila e caulim são os grandes responsáveis pelas propriedades mecânicas) e a ação dielétrica dos isoladores (intimamente ligada ao feldspato presente nas argilas), tais como hidróxido de ferro, o silicato de cálcio e o silicato de magnésio. O aumento do teor de quartzo proporciona maior resistência sob altas temperaturas, maior resistência mecânica e menor rigidez dielétrica. Por isso, a dosagem correta das matérias-primas é fundamental para se obter o produto com as características desejadas. O aumento no teor de feldspato aumenta o comportamento isolante, já o aumento no teor de caulim e argila implica em menor rigidez dielétrica (CAMPOS, 2009).

A fabricação dos isoladores elétricos de porcelana é dividida em: a) armazenamento das matérias-primas em silos; b) moagem e dosagem dos componentes; c) armazenamento da massa em tanques; d) retirada da água; e) moldagem a vácuo (fabricação da porcelana crua); f) extrusão e torneação ou extrusão e calibração; g) vitrificação e h) sinterização (ROSA, 2010).

Na fase de fabricação da porcelana crua as matérias-primas são moídas e dosadas separadamente. A argila e o feldspato são submetidos ao peneiramento em peneira com malha de 75  $\mu\text{m}$ , enquanto o quartzo é submetido ao peneiramento em tela com abertura de 45  $\mu\text{m}$ . Uma prensa hidráulica é usada para preparar espécimes de molde cilíndrico com um diâmetro de 20 mm e espessura de 5 mm, e então cada lote de espécimes é queimado a 1000, 1100, 1200 e 1300  $^{\circ}\text{C}$ , sob taxa de aquecimento/resfriamento de 6  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  (IQBAL, 2008).

### 3.5 REAÇÃO POZOLÂNICA

Para obter benefícios técnicos e econômicos a indústria do cimento há décadas utiliza adições minerais em substituição parcial ao clínquer no cimento Portland. Além de vantagens associadas à diminuição de custos e à determinadas propriedades cimentícias, as adições minerais propiciam uma maior sustentabilidade na cadeia produtiva do cimento, pois possibilitam a reciclagem de subprodutos e resíduos industriais, a redução de emissões perigosas lançadas na atmosfera e do gasto de energia durante a sua fabricação, e, por vezes, a minimização do consumo de recursos naturais não renováveis (GARCIA et al., 2015).

As adições minerais compreendem substâncias silicosas finamente cominuídas, que uma vez adicionadas ao cimento e ao concreto interagem química e fisicamente com os produtos da hidratação do clínquer ou do cimento, modificando a microestrutura do material. O efeito químico é decorrente da capacidade de reação da adição mineral com o hidróxido de cálcio -  $\text{Ca(OH)}_2$  - gerado durante a hidratação do cimento, para formar silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional. A reação entre a adição mineral e o  $\text{Ca(OH)}_2$  é denominada reação pozolânica. Quanto às alterações físicas, vários efeitos podem ser gerados pelas adições minerais nos materiais à base de cimento: (i) efeito microfíler, produto do aumento da densidade da mistura pelo preenchimento de espaços vazios pelas partículas das adições, cujo diâmetro médio deve ser semelhante ou menor que o diâmetro médio das partículas de cimento; (ii) refinamento da estrutura de poros, ocasionado pelas partículas das adições que podem agir como pontos de nucleação para os produtos de hidratação; (iii) e

alteração da microestrutura da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado, reduzindo ou eliminando o acúmulo de água livre que fica retido sob os agregados, bem como preenchendo os espaços vazios deixados pelas partículas de cimento próximas à superfície do agregado (efeito microfíler) e reduzindo a concentração de  $\text{Ca(OH)}_2$  na região devido à reação pozolânica (DOS SANTOS; DE CASTRO; GONÇALVES, 2018).

Uma das adições minerais mais comuns e que vem ganhando espaço no mercado brasileiro é a argila calcinada. Para a sua produção têm sido empregadas substâncias minerais argilosas de composição caulínica (metacaulinita). As argilas do grupo da caulinita sofrem transformações químicas, em especial, a desidroxilação e amorfismo dos constituintes argilosos entre  $500^\circ\text{C}$  e  $800^\circ\text{C}$ , faixa de temperatura que lhes conferem, quando devidamente cominuídas, reatividade química basicamente de caráter pozolânico (WILBURN, 2003).

### 3.6 ASPECTOS TÉCNICOS DO CIMENTO PORTLAND

O clínquer Portland, é o principal constituinte do cimento Portland, material resultante da calcinação a aproximadamente 1450 °C de uma mistura de calcário e argila e eventuais corretivos químicos de natureza silicosa, aluminosa ou ferrífera, empregados de modo a garantir o balanço de massa adequado. Esse termo refere-se a certa proporção de determinados compostos químicos da mistura, dentro de limites específicos, para proporcionar a formação de compostos hidráulicos e conferir a propriedade ligante do cimento Portland (SILVA et al., 2016).

Assim, em escala industrial, para se obter o clínquer Portland, desenvolve-se uma operação complexa que consiste na extração e britagem das matérias-primas, seguindo-se à preparação adequada da mistura crua (farinha), isto é, moagem e homogeneização, com posterior queima por volta de 1420 °C em forno rotativo, seguida de resfriamento no resfriador industrial. O cimento Portland é obtido a partir da moagem do clínquer com uma ou mais formas de sulfato de cálcio, estas últimas empregadas em proporções que variam em massa de 3 a 5%, aproximadamente, com o objetivo principal de regular o tempo de pega ou endurecimento inicial do produto (AÏTCIN, 2016). A Figura 4 esquematiza o processo de obtenção do cimento Portland. Por razões técnicas, ambientais e econômicas, as adições normalizadas vêm sendo utilizadas cada vez mais, não somente no Brasil, mas também em âmbito mundial como constituintes dos cimentos, moídas em conjunto com o clínquer ou separadamente (SEFFF, 2005).

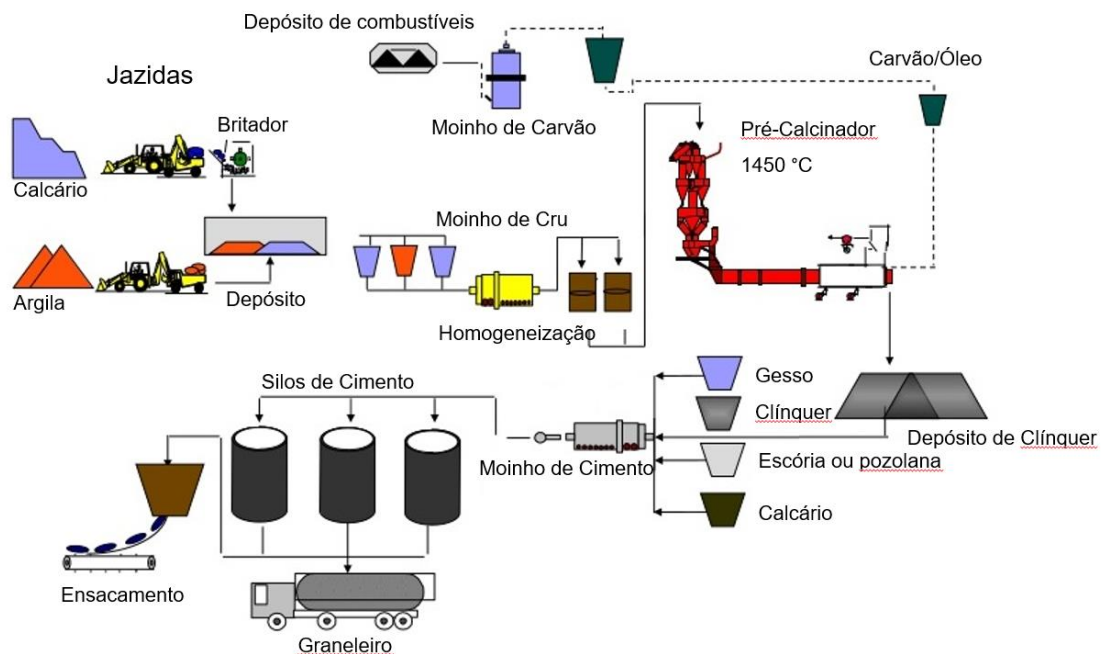
Para a fabricação do clínquer Portland, o material de partida deve conter em sua composição química os óxidos principais do clínquer:  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$



e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Raramente esses componentes são encontrados em uma única rocha em proporções adequadas. Por isso, é necessário preparar misturas de dois ou mais tipos de rochas. O clínquer é formado por, aproximadamente, 75 a 80% de calcário e 20 a 25% de argila.

Quando um componente químico essencial não está presente na proporção adequada, eventuais aditivos corretivos são utilizados, tais como minério de ferro, areia e bauxita. As etapas relacionadas às matérias-primas são: extração, britagem, pré-homogeneização, moagem e homogeneização, as quais permitem que a farinha - o material resultante, apresente a composição química preestabelecida, a finura (granulometria) adequada para uma boa combinação de seus constituintes e uma homogeneidade apropriada (SEFFF, 2005).

**Figura 4 - Fluxograma do processo de fabricação do cimento Portland.**



**Fonte -** Adaptado de SCHORCHT et al., (2013).

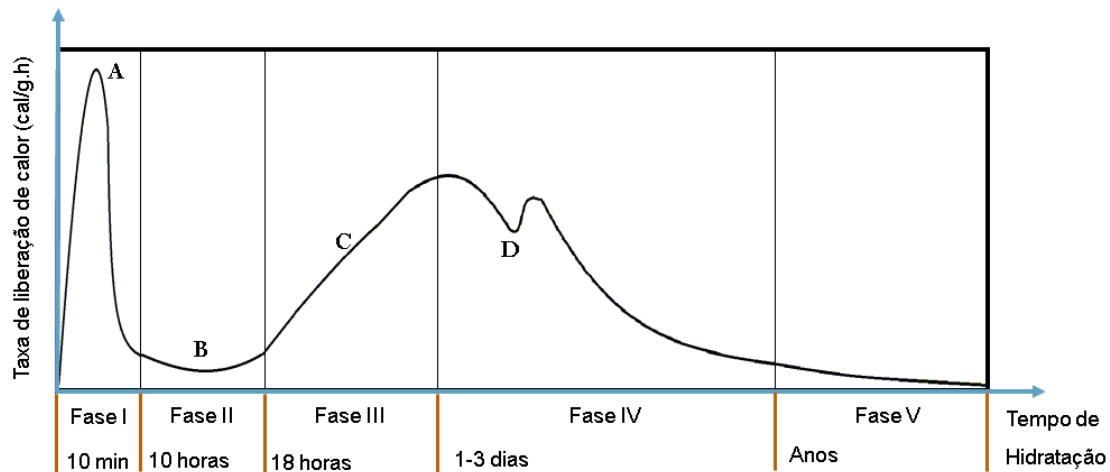
É importante salientar que os processos de hidratação e de formação da microestrutura influenciam diretamente as características físicas, mecânicas e

funcionais de argamassas e concretos. À medida que se adiciona água ocorrem quase instantaneamente reações químicas entre os silicatos e aluminatos, denominadas reações de hidratação do cimento Portland (ROMANO et al., 2016).

Esse processo de hidratação consiste na ocorrência de reações simultâneas dos compostos anidros com a água. O silicato tri-cálcio ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ,  $\text{C}_3\text{S}$ ) apresenta rápida hidratação e desprende uma quantidade de calor equivalente a  $\Delta H_{\text{hid}} \sim -500 \text{ J/g}$ . A hidratação do silicato tri-cálcio resulta em um gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e cristais de hidróxido de cálcio,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , sendo responsável pela resistência inicial e aumento da resistência final da pasta. Já o silicato di-cálcio ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ) possui hidratação lenta e desprende menor quantidade de calor ( $\Delta H_{\text{hid}} \sim -250 \text{ J/g}$ ), no entanto, é responsável pelo aumento da resistência nas idades avançadas da argamassa. A sua hidratação produz  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e C-S-H em menor volume quando comparado ao  $\text{C}_3\text{S}$ . O aluminato tricálcio ( $\text{C}_3\text{A}$ ) reage rapidamente com a água, liberando maior quantidade de calor ( $\Delta H_{\text{hid}} \sim -1350 \text{ J/g}$ ), pois não há precipitação dos compostos hidratados sobre a superfície das partículas chegando à fase cristalina estável após formar composições intermediárias. Faz-se necessário a adição de componentes a base de sulfato, como a gipsita, que formam sulfoaluminato de cálcio e, ao reagirem com o aluminato tricálcio ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{C}_3\text{A}$ ), retardam as reações proporcionando um maior tempo de início e fim de pega (CARVALHO, 2013).

Segundo (MACIEL et al., 2019), todas as reações de hidratação são exotérmicas, sendo divididas em estágios conforme o seu grau de hidratação em relação ao tempo. A Figura 5 relaciona a taxa de evolução de calor por tempo, nas cinco fases de hidratação que acontecem nas misturas cimentícias.

**Figura 5** - Fases de hidratação de misturas cimentícias.



Fonte - Adaptado de BULLARD (2013).

- A** – Dissolução de espécies iônicas e formação de fases hidratadas;
- B** – Indução;
- C** – Hidratação;
- D** – Transformação da etringita em monosulfoalumínio.

No primeiro estágio acontece a maior parte das reações químicas do cimento, dissolução de espécies iônicas e formação de fases hidratadas, devido à rápida dispersão de calor quando a água é introduzida. Sulfatos alcalinos são completamente dissolvidos em poucos segundos liberando íons como  $K^+$ ,  $SO_4^{2-}$  e  $Na^+$  para o meio. A hidratação do composto  $C_3S$  está vinculada ao aumento da concentração de íons  $Ca^{2+}$  e  $OH^-$  na fase líquida, embora a relação C:S do produto hidratado seja menor. No segundo estágio, conhecido como período de indução, as reações de hidratação ocorrem muito vagarosamente, devido à formação de uma camada de gel de C-S-H (silicato de cálcio hidratado) ao redor das partículas de cimento, formando uma camada de somente alguns nanômetros (JENNINGS, 2009). Este estágio ocorre em um período que vai de minutos até horas, dependendo das características do cimento, adições ou

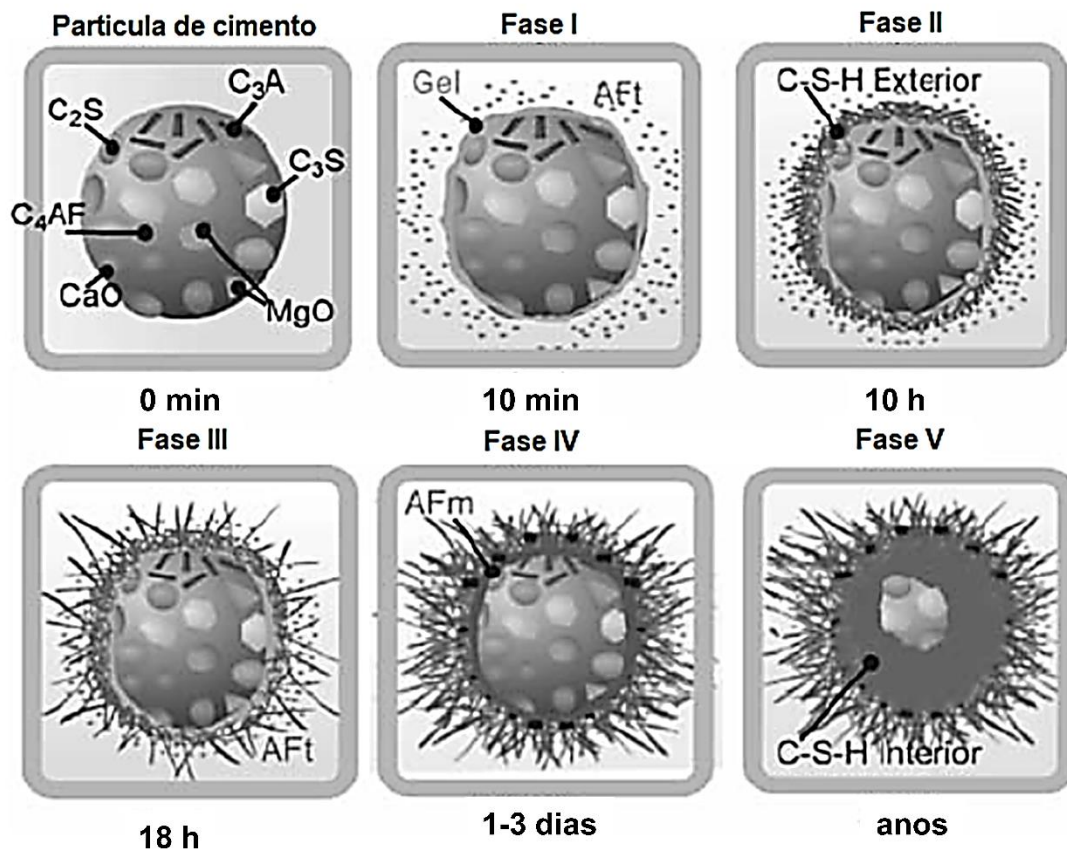
aditivos. Quando a camada de gel é rompida, a difusão iônica é facilitada e a velocidade de reação aumenta. No terceiro estágio, devido a saturação iônica da fase aquosa, ocorre a rápida formação do C-S-H e C-H (hidróxido de cálcio), resultando em redução gradual da concentração de íons de  $\text{Ca}^{2+}$ . Finalmente no quarto estágio a formação do C-S-H e C-H continuam, mas de forma mais lenta, reduzindo a velocidade de reação global (ROMANO et al., 2016).

Nesse sentido, alguns estudos já foram realizados, e esses apontam que a substituição parcial do cimento Portland em argamassas e concretos pode ser feita por resíduos que apresentem propriedades pozolânicas. A adição de pozolanas ao cimento Portland torna-se viável, já que a principal propriedade de uma pozolana é a sua capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio (CH) presente no cimento, formando compostos estáveis de poder aglomerante, como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Assim, o hidróxido de cálcio (CH) liberado durante a hidratação do cimento reage com a pozolana, utilizada como substituição parcial do cimento, resultando na produção extra de silicatos de cálcio hidratados, o qual é o maior responsável pela resistência das pastas de cimento. Esta capacidade é característica das pozolanas e é chamada efeito pozolânico (DE OLIVEIRA; BARBOSA, 2006).

A concentração de sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) diminui devido à dissolução do sulfato de cálcio, logo a resistência mecânica e a diminuição da porosidade ocorrem devido à rápida formação de compostos hidratados. No quarto estágio, a fase C-S-H continua a ser formada, porém as taxas de reações reduzem gradativamente (ARTIOLI; BULLARD, 2013). A indicação da hidratação do  $\text{C}_3\text{A}$  representa o momento em que o sulfato de cálcio se esgota e a etringita formada pela hidratação nas primeiras idades reage com o  $\text{C}_3\text{A}$  adicional e  $\text{C}_2(\text{A},\text{F})$  para formar monossulfoaluminato de cálcio, caracterizando o estágio IV. No quinto e último

estágio acontece a densificação da microestrutura, gerada pelo preenchimento dos poros existentes entre as partículas. A Figura 6 representa as diferentes fases de hidratação (CORDEIRO et al., 2017).

**Figura 6 -** Processo de hidratação do cimento.



**Partícula de cimento:** estado natural, silicato dicálcio ( $C_2S$ ) aluminato tricálcio ( $C_3A$ ), silicato tricálcio ( $C_3S$ ), Óxido de magnésio ( $MgO$ ), Óxido de cálcio ( $CaO$ ) e Aluminato ( $C_4AF$ );

**Fase I:** Dissolução dos álcalis ou sulfato de cálcio e íons;

**Fase II:** Indução, formação de uma camada de gel de C-S-H externo;

**Fase III:** Rápida formação do C-S-H e C-H;

**Fase IV:** Continua a formação de C-S-H de forma mais lenta.

**Fase V:** Hidróxido de cálcio interno.

**Fonte –** Adaptado de COSTA et al., (2009).

O grau de hidratação, quantidade de água e evolução do calor de hidratação podem variar com diferentes tipos de adições no cimento. Três efeitos físicos podem ser observados na hidratação do cimento com adições minerais

em sua composição: o efeito de diluição do cimento Portland, equivalente ao aumento da relação água/cimento, inversamente proporcional à taxa de substituição do cimento; o efeito da distribuição granulométrica, ou efeito fíler, que depende da granulometria e da quantidade de adição mineral, relacionado à porosidade da mistura; e o efeito de nucleação, que é um processo físico/químico proporcionado pela ativação da hidratação do cimento, o que catalisa a nucleação dos hidratos, reduzindo a barreira de energia (LAWRENCE; CYR; RINGOT, 2003).

Contudo, com os avanços técnicos e experimentais acerca dos materiais cimentícios, observou-se que a argamassa e o concreto apresenta vulnerabilidade aos processos de deterioração no decorrer da sua utilização, com a agressividade ambiental e tempo de ocorrência das reações em função do meio em que este está inserido (PEREIRA et al., 2018).

Essas deteriorações do material podem ser oriundas de diversos fatores intrínsecos e extrínsecos a este, podendo ser classificados em físicos e químicos, a fim de definir os fenômenos de deterioração dos produtos cimentícios, agindo de forma isolada ou combinada. Quando da utilização prática da estrutura de concreto ou argamassa, os fenômenos de degradação tendem a ocorrer conjuntamente. Os principais agentes de deterioração físicos são: i) desgaste superficial devido à abrasão, erosão ou cavitação e ii) fissuração ocasionada pelos gradientes de temperatura e umidade, carregamento estrutural e exposição a extremos de temperatura tais como o congelamento e o fogo. Os agentes de deterioração químicos são: i) hidrólise dos componentes da pasta de cimento por água e, ii) trocas iônicas entre fluídos agressivos e a pasta de cimento com conseqüente reações causadoras de produtos expansíveis, tais

como expansão por sulfato, reação álcali-agregado e corrosão da armadura no concreto (PEREIRA et al., 2018).

A reação álcali-agregado pela presença de fases reativas nos agregados, e o ataque por sulfatos de origem interna pela presença de sulfetos também nos agregados, apresentam-se como agentes patológicos agressivos à durabilidade de estruturas de matriz cimentícia, sendo difícil o diagnóstico no princípio das manifestações, pois estas podem levar anos para serem percebidas macroscopicamente pela presença de exsudações de fases criadas e fissuração das peças (COUTO, 2008).

### **3.7 ALTERNATIVAS MUNDIAIS DO USO DE RESÍDUOS EM SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO**

Nesse capítulo apresenta-se algumas alternativas mundiais do uso de resíduos em substituição ao cimento.

#### **3.7.1 Incentivo da obtenção do selo LEED para gerenciamento de resíduos**

Liderança em Energia e Design Ambiental (em inglês *Leadership in Energy and Environmental Design* - LEED), é um sistema internacional de certificação e orientação ambiental para edificações utilizado em mais de 160 países, e possui o intuito de incentivar a transformação dos projetos, obras e operações das edificações, sempre com foco na sustentabilidade. Os RCDs constituem um dos maiores fluxos de resíduos em muitos países (KOULOURIS et al., 2004). Estima-se que a indústria global de concreto consuma aproximadamente 10 bilhões de toneladas de areia e rochas (dados de 2002) e produza mais de 1 bilhão de toneladas de resíduos de construção e demolição anualmente (MEHTA, 2002).

A reciclagem de RCDs em novas construções de engenharia, incluindo seu uso como agregado em concreto novo, é considerada parte integrante da construção verde com concreto. O sistema de classificação LEED (2000), desenvolvido pelo US Green Building Council, por exemplo, concede pontos de certificação pelo uso de materiais reciclados pós-consumo, como resíduos de construção e demolição em novas construções.

Como alternativas a redução de RCDs, emissão de GEE e consumo de energia, atualmente alguns estudos estão sendo realizados.



### **3.7.2 Substituição do cimento por casco de vidro**

O casco de vidro tem sido usado em diferentes aplicações de construção, incluindo substituição de cimento, substituição agregada de concreto, leitos de estradas, pavimentos, valas, meios de drenagem, etc. e em aplicações de uso geral, incluindo abrasivos, fluxos/aditivos, fabricação de isolamento de fibra de vidro e isolamento de espuma. Quando usado como substituto da areia, há alguma indicação de que pode haver uma redução perceptível na resistência à compressão (CEMENT CONCRETE & AGGREGATES AUSTRALIA, 2008).

No entanto, isso não é observado de forma consistente (OLIVEIRA, 2008). O principal problema dos resíduos de casco de vidro no concreto é o risco de uma possível reação de álcali-sílica. Esse risco pode ser gerenciado efetivamente usando cimento CPV ARI misturado (DU; TAN, 2013) contendo cinzas volantes e/ou escória granulada do alto forno.

### **3.7.3 Substituição do cimento por lascas de pneu**

Lascas de pneus de sucata e agregados de borracha triturada também foram utilizados em argamassas e concretos. O concreto de borracha foi recomendado para aplicações em que o amortecimento de vibrações ou resistência a impactos ou explosões ou onde é necessária alta absorção de energia plástica. O concreto com agregado de borracha também foi recomendado para aplicações como enchimento de valas e cama de tubo, concreto escoável de baixa resistência, pregar concreto e suporte de pedra (SIDDIQUE, 2014).

A fabricação de cimento na Índia atingiu 280 Mt em 2014 (VAN OSS; PADOVANI, 2003), perdendo apenas para a China. A Índia exporta apenas

pequenos volumes de cimento, com a demanda interna de concreto impulsionada por uma economia crescente, população crescente e aumento dos padrões de vida (BANIK, 2014). A extração em massa de areia, geralmente via dragagem de rios, é um problema na Índia há vários anos e é alimentado principalmente pela demanda de construção. Uma decisão do tribunal superior em 2011 praticamente eliminou a dragagem de areia (IANS, 2010) com a consequência de problemas de fornecimento na Índia.

#### **3.7.4 Resíduos de escória de cobre como material suplementar para o concreto**

Nos últimos anos, o progresso tecnológico, o desenvolvimento industrial, o crescimento populacional e o aumento resultante no consumo de recursos naturais causaram um uso desordenado de recursos não-renováveis, aumento no consumo de energia e geração de grandes volumes de resíduos urbanos e industriais. Conseqüentemente, impactos ambientais negativos, como o esgotamento da camada de ozônio, o efeito estufa e a poluição das nascentes estão prejudicando cada vez mais o planeta. A atividade de construção causa grandes danos ao meio ambiente, devido ao consumo de grandes volumes de recursos naturais e energia e pelos grandes volumes de resíduos que gera. No entanto, essa indústria também é caracterizada por um alto potencial de uso de resíduos reciclados em materiais de construção. Assim, muitas atividades de pesquisa foram realizadas com o objetivo de utilizar resíduos como material

cimentício suplementar pozolânico para a produção de materiais à base de cimento a serem utilizados na construção (MOURA; GONÇALVES; LIMA, 2007).

Os produtos de escória de cobre produzidos pela indústria química podem causar problemas ambientais nas áreas circundantes, se não forem descartados adequadamente. O processo de fabricação de cobre na fábrica de fundição de cobre de Sarcheshmeh é combinado com uma quantidade de escória misturada com lixo e lixo. Esses subprodutos podem ser uma opção para a produção de mistura de cimento. A escória de cobre é uma substância que também é conhecida como resíduo sólido que pode ser promissor na indústria da construção como uma substituição parcial ou total do cimento. Existem muitos estudos em andamento para descobrir a possibilidade de usar a escória de cobre como parte da mistura de cimento (MIRHOSSEINI et al., 2017).

O uso de resíduos industriais, como escória de cobre, pode ajudar a reduzir as questões ambientais e sustentabilidade desenvolvimento.

Tendo em vista as diferentes reações envolvidas com a química do cimento e as possíveis substituições que podem ser realizadas, duas propriedades são relevantes para avaliar a possibilidade de substituição do cimento: resistência a compressão e tração na flexão.

A resistência a compressão e a resistência à tração na flexão é normatizada por NBR 13279 (ABNT, 2005), sendo eles um dos principais requisitos para a produção de argamassas e concretos, com a qual é analisada a capacidade desses materiais de suportar cargas (ROGÉRIO CAMPOS RAMOS, 2017).

### **3.7.5 Utilização de agregados alternativos de isoladores elétricos de porcelana em concretos**

A busca por materiais alternativos e sua utilização na construção civil vem nos últimos anos se intensificando com exemplos como reaproveitamento de borracha de pneu, cinza de casca de arroz, entulhos, entre outros. Os isoladores elétricos de porcelana, por possuírem similaridade nas suas características químicas, quando comparados aos agregados comuns, são passíveis de serem utilizados, sobre tudo em substituição aos agregados e até como adição pozolânica ao cimento Portland (CAMPOS; PAULON, 2015).

IEPP foram avaliados como substitutos de agregados miúdo e graúdo comuns em concretos, areia e brita. Os estudos foram realizados por meio da comparação de traços de concreto com diferentes teores de porcelana a um traço referência. A substituição combinada dos agregados miúdo e graúdo por IEPP, mostrou melhoria nas propriedades mecânicas. A resistência à compressão simples a partir de 28 dias de idade para todos os traços com a porcelana, apresentou resultados superiores aos do traço referência, na idade de 365 dias, resistência 35% superior, de 96,6 Mpa, quando comparado ao traço referência (ANTONIO; ANTONIO, 2015).

### **3.7.6 Propriedades de argamassas de cimento produzidas com resíduo de isolador de porcelana**

O uso de agregados artificiais em argamassas e concretos vem aumentando com a escassez das jazidas de areia natural e, conseqüentemente os custos de transporte de areia de outros locais mais distantes para os centros consumidores com alta demanda, tem levado as empresas a escolherem areias alternativas, em particular areias de resíduos de britagem de rochas. Alguns fatores além da exaustão das reservas, tais como a contaminação das fontes

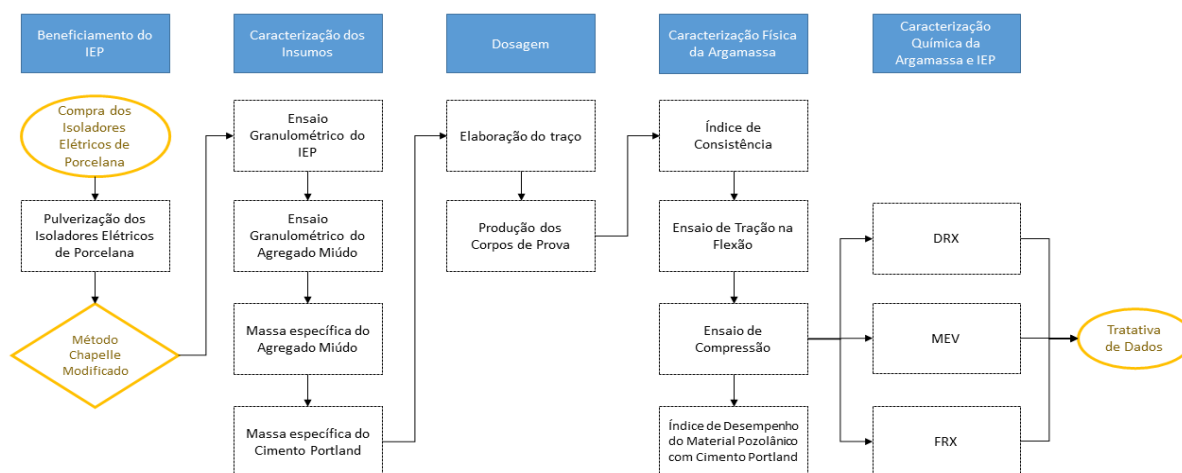
pela poluição e as restrições ambientais à extração em várzeas e leitos de rios podem dificultar a extração de areia.

A utilização de IEPP como substituto parcial do cimento Portland ou para substituição da areia em argamassas de assentamento e revestimento, nas propriedades estudadas, é uma alternativa que se mostrou viável, tendo como base os resultados obtidos neste estudo experimental, concluiu-se que a quantidade de substituição de 20%, pode ser substituída totalmente (CAMARINI; SOARES, 2018).

## 4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados e descritos os procedimentos dos ensaios realizados em laboratório para a avaliação da porcelana e da argamassa, tais como aqueles para a determinação da massa específica, fluorescência de raios X (FRX), difração de raios X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Chapelle modificado para a determinação do índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento. Por fim, está representado na Figura 7 o fluxograma que contempla todas as etapas da presente pesquisa.

**Figura 7 - Fluxograma de materiais e métodos.**



Fonte - Autor (2021).

## **4.1 MATERIAIS**

Como supracitado, com o objetivo de avaliar o potencial de isoladores elétricos de porcelana na substituição parcial do cimento, foram produzidas argamassas cimentícias com teores de substituição de 5, 10 e 20%. Sendo assim, apresenta-se os insumos empregados.

### **4.1.1 Porcelana**

As porcelanas isolantes foram adquiridas do mercado local (Figura 8), pois para a coleta da porcelana residual seria necessário solicitar à Copel (Distribuidora de energia elétrica no estado do Paraná) um chamado para o transporte dos isoladores com defeitos de Curitiba para Londrina ou Maringá, o que poderia inviabilizar o projeto em termos de tempo/logística. Diferentemente dos isoladores poliméricos que apresentam desgaste devido ao uso, os isoladores cerâmicos de porcelana não sofrem alterações significativas da sua composição físico-química (MANTOVANI et al., 2013). Portanto, optou-se por utilizar isoladores novos em virtude da questão logística para adquirir os resíduos.

**Figura 8** - Isoladores elétricos de porcelana adquiridos para o processo de moagem.



Fonte: Autor (2021).

#### 4.1.2 Aglomerante

O aglomerante utilizado, por ter alta resistência inicial e baixa adição de pozolona, foi o cimento Portland CPV-ARI, da marca Liz, sem adições, exceto o gesso e calcário, para melhor explorar os efeitos da adição do isolador elétrico de porcelana pulverizado (IEPP) nas misturas. As principais características do cimento utilizado nesse projeto são apresentadas nas Tabelas 1 e 2.

**Tabela 1** - Composição do cimento Portland CPV-ARI.

Cimento Portland (ABNT)	Tipo	Composição (% massa)			Norma Brasileira
		Clínquer + Gesso	Escória Siderúrgica	Calcário	
CPV-ARI	Alta Resistência Inicial	95 – 100	-	0 - 5	ABNT 5733

Fonte - ABCP (2020).

As características do cimento utilizado o diferem dos outros existentes no mercado e a Tabela 2 mostra as principais propriedades do aglomerante em questão. O cimento foi doado pela concreteira e argamassadeira Areia Ana da



cidade de Camboriú-SC, o qual foi armazenado em condições adequadas enquanto os experimentos foram realizados.

**Tabela 2** - Características físicas do cimento CPV-ARI.

Resistências à Compressão (Mpa)					Finuras		Tempo de Pega (min)	
Idades (DIA)	01	03	07	28	# 325%	Blaine (m <sup>2</sup> /kg)	Início de Pega	Fim de Pega
NBR 5733	14,0	24,0	34,0	-	-	≥ 280	≥ 60	≤ 600
CPV-ARI Premium Liz	26,1	41,4	47,9	53,7	1,3	507	113	148

\*Blaine: Ensaio de permeabilidade ao ar para determinar a superfície específica.

\*# 325%: Numeração da peneira, sendo de tamanho 0,044mm.

Fonte - InterCement, (2020).

Conforme verificado, o cimento utilizado ultrapassa os limites mínimos exigidos pela norma, sendo apto para o uso.

#### 4.1.3 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi areia fina de quartzo doada pela concreteira e argamassadeira Areia Ana da cidade de Camboriú-SC.

Utilizou-se a NBR 7214 (ABNT, 2015) como referência para a caracterização do agregado miúdo. A Tabela 3 apresenta os limites dos parâmetros granulométricos referentes às aberturas das malhas e as respectivas denominações.

**Tabela 3** - Classificação do agregado miúdo de acordo com as frações granulométricas.

Material retido entre as peneiras de abertura nominal de	Denominação
2,4 mm e 1,2 mm	Areia Grossa
1,2 mm e 0,6 mm	Média Grossa
0,6 mm e 0,3 mm	Média Fina
0,3 mm e 0,15 mm	Fina

Fonte - NBR 7214 (ABNT, 2015).

#### 4.1.4 Água

Toda a água utilizada para a confecção dos corpos-de-prova deste trabalho foi proveniente da concessionária de água do município de Itajaí-SC, SEMASA.

#### 4.1.5 Reagentes químicos

Outros materiais/reagentes utilizados foram: ácido clorídrico (HCl) concentrado P.A. (densidade aproximadamente de 1,17 g/mL e 37% de pureza); álcool etílico absoluto (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) P.A.; éter etílico (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>O) P.A.; carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) P.A.; indicador fenolftaleína P.A.; indicador vermelho de metila; sacarose P.A.; água destilada produzida no laboratório da UTFPR de Apucarana-PR e fervida para remover o CO<sub>2</sub> para os ensaios de índice de atividade pozolânica.

## **4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS**

Os ensaios físico-químicos e mecânicos foram realizados parcialmente na Universidade do Vale do Itajaí-UNIVALI, que disponibilizou sua infraestrutura e supervisão dos técnicos de laboratório. A caracterização da porcelana e dos corpos-de-prova (CPs) foi realizada em laboratórios da Universidade Tecnológica Federal do Paraná e Universidade Estadual de Londrina, bem como em laboratórios terceirizados quando necessário.

### **4.2.1 Massa específica do aglomerante**

O ensaio de determinação de massa específica do cimento Portland utilizado como aglomerante foi realizado segundo a NBR 16605 (ABNT, 2017) Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica.

Para o ensaio foi preparada e reservada uma amostra de aproximadamente 200 g do cimento Portland CPV-ARI. Com o auxílio de um funil haste longa, foi introduzido o líquido de medição (querosene) no frasco de Le Chatelier até que o nível compreendido entre 0 e 1 cm<sup>3</sup> e a seguir a leitura do volume inicial ( $V_i$ ) foi realizada.

Em seguida, uma amostra de 60 g do aglomerante foi pesada e introduzida no frasco de Le Chatelier (Figura 09) com o auxílio do funil de haste curta. O frasco então foi tampado e girado rapidamente para eliminar o ar e então a leitura do volume final ( $V_f$ ) foi realizada.

**Figura 9** - Frasco de Le Chatelier para ensaio da massa específica do aglomerante.



**Fonte** - Autor, (2021).

O resultado do ensaio foi expresso com base na média da leitura de duas amostras, com três algarismos significativos, e foi calculado pela Equação 1:

$$\rho = \frac{m}{V_f - V_i} \quad [1]$$

Onde:

$\rho$  = massa específica do aglomerante (g/cm<sup>3</sup>);

$m$  = massa do aglomerante (g);

$V_i$  = leitura do volume inicial (cm<sup>3</sup>);

$V_f$  = leitura do volume final (cm<sup>3</sup>).

#### **4.2.2 Massa específica do agregado miúdo**

A determinação da massa específica do agregado miúdo foi realizada pelo método do picnômetro, adotando-se a NBR 16916 (ABNT, 2021) como padrão

de referência (Figura 10). Esta NBR, cancela e substitui a ABNT NBR NM 52:2009.

Colocou-se a amostra no molde tronco-cônico sem comprimi-la, aplicou-se suavemente em sua superfície 25 golpes com a haste de compactação e levantou-se verticalmente o molde. Separou-se da amostra do agregado miúdo,  $(500 \pm 0,1)$  g na condição saturada, colocou-se no frasco e determinou-se a massa do conjunto ( $m_C$ ). Compreendido pela massa da amostra na condição saturada mais a massa do frasco. Encheu-se o frasco com água potável até o próximo e abaixo da marca de 500 mL. Moveu-se de forma a eliminar as bolhas de ar e depois colocou-se em um banho mantido a temperatura constante de  $(23 \pm 2)$  °C. Após aproximadamente 1 h, completou-se com água até a marca de 500 mL e determinou-se a massa total com exatidão de 0,1 g ( $m_D$ ), que correspondeu à massa da amostra na condição saturada, mais a massa do frasco e mais a massa da água. Em seguida, tomou-se concomitantemente da amostra preparada e colocou-se em uma bandeja para secar a  $(105 \pm 5)$  °C durante pelo menos 24 h. Esfriou à temperatura ambiente em dessecador e determinou-se a massa da amostra seca ( $m_A$ ) com exatidão de 0,1 g.

**Figura 10** - Picnômetro para determinação da massa específica.



**Fonte** - Autor, (2021).

Determinou-se a massa do picnômetro contendo a água mais o agregado. O resultado do ensaio foi a média da medida de duas amostras, com três algarismos significativos. A massa específica do agregado foi expressa em  $\text{g/cm}^3$  e foi obtida através da Equação 2:

$$\rho_s = \frac{m_A}{V - V_a} \quad [2]$$

Onde:

$\rho_s$  = é a densidade do agregado na condição seca  $\text{g/cm}^3$ ;

$m_A$  = massa da amostra seca em estufa (g);

$V$  = é o volume do frasco calibrado ( $\text{cm}^3$ ).

$V_a$  = é o volume de água adicionada ao frasco, de acordo com a Equação 3 ( $\text{cm}^3$ );

$$V_a = \frac{m_D - m_C}{\rho_a} \quad [3]$$

Onde:

$m_C$  = massa do conjunto formado pela massa da amostra (g);

$m_D$  = massa da amostra seca, mais a massa do frasco mais a massa da água (g)

$\rho_a$  = é a densidade da água ( $\text{g/cm}^3$ );

### 4.2.3 Análise granulométrica do agregado miúdo

O ensaio de granulometria foi realizado segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003) Agregados – Determinação da composição granulométrica.

A execução do ensaio consistiu em encaixar as peneiras, previamente limpas, de modo a formar um único conjunto de peneiras, com abertura de malha em ordem crescente da base para o topo, provendo um fundo de peneiras adequado para o conjunto, conforme Figura 11.

**Figura 11** - Equipamento utilizado para o ensaio granulométrico.



Fonte - Autor (2021).

Colocou-se a amostra ou porções da mesma sobre a peneira superior do conjunto, de modo a evitar a formação de uma camada espessa de material sobre qualquer uma das peneiras.

Promoveu-se a agitação mecânica do conjunto por 10 minutos, para permitir a separação e classificação prévia dos diferentes tamanhos de grãos da amostra e determinar a massa total de material retido em cada uma das peneiras e no fundo do conjunto.

Para cada uma das amostras de ensaio foi calculado a porcentagem retida, em massa, em cada peneira, com aproximação de 0,1%. Ao longo do procedimento tomou-se o cuidado de monitorar as amostras para que apresentassem necessariamente a mesma dimensão máxima característica e para que nas demais peneiras os valores de porcentagem retida individualmente não diferissem em mais que 4% entre si. Foram então calculadas as porcentagens médias, retida e acumulada, em cada peneira, com aproximação de 1% e determinado o módulo de finura, com aproximação de 0,01. A análise foi realizada em duplicata.

### **4.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO ISOLADOR ELÉTRICO DE PORCELANA PULVERIZADO**

#### **4.3.1 Beneficiamento do isolador elétrico de porcelana**

O isolador elétrico de porcelana (IEP) adquirido conforme item 4.1.1 passou por um processo de moagem manual, até que o aspecto granulométrico desejado fosse alcançado. O material pulverizado foi peneirado para segregação das partículas que passaram na peneira 0,074 mm, ou seja, na composição dos CPs foi utilizada a fração do material composta por grãos < 75 µm. O material pulverizado e peneirado foi classificado como isolador elétrico de porcelana pulverizado (IEPP).

#### **4.3.2 Análise granulométrica do IEPP**

A análise granulométrica do IEPP foi realizada no laboratório LATEC (Laboratório Tecnológico da Univali – Itajaí/SC) com o mesmo equipamento do



item 4.2.3, conforme norma NBR 7211 (ABNT, 2009), que define as frações granulométricas do mineral moído. Foram analisadas duas amostras nesse ensaio.

#### **4.3.3 Definição do traço e moldagens dos CPs**

Nessa etapa do estudo experimental, o IEPP foi testado em misturas de argamassa. Para uniformizar a nomenclatura dos CPs referência e daqueles com substituição parcial do cimento Portland CPV-ARI por IEPP, o termo aglomerante passou a ser utilizado para se referir ao cimento ou à mistura cimento mais IEPP. Foram criados quatro cenários para essa avaliação:

- Referência (sem adição de IEPP);
- 5% de IEPP em substituição ao cimento Portland;
- 10% de IEPP em substituição ao cimento Portland;
- 20% de IEPP em substituição ao cimento Portland.

A razão mássica aglomerante:areia (C:S) utilizada em todos os CPs foi 1:3 (1 kg de aglomerante para 3 kg de areia), um traço comum utilizado na construção civil, e a razão mássica água:aglomerante (W:C) foi 0,56 (0,56 kg de água para 1 kg de aglomerante). Optou-se pelo uso de uma quantidade alta de aglomerante para verificar a resistência da argamassa, evidenciando assim o efeito da substituição do cimento. As misturas com substituição parcial do aglomerante foram preparadas respeitando as mesmas razões mássicas C:S e W:C. É importante notar que a razão W:C permaneceu constante, o que ajudou a manter a plasticidade no estado fresco. Considerando o modelo de substituição do aglomerante por IEPP, nos CPs com substituição a razão

água:(cimento+IEPP) também foi mantida constante. A Tabela 4 representa as substituições (traços) realizadas neste estudo.

**Tabela 4** – Traços utilizados para preparar os CPs de referência e com IEPP.

Material utilizado (kg)						
ID	Substituição (%)	Cimento	IEPP	Areia	Água	W:C
S0	0,0	1,800	-	5,400	1,021	0,5672
S5	5,0	1,710	0,090			
S10	10,0	1,620	0,180			
S20	20,0	1,440	0,360			

W:C = razão água:aglomerante

Fonte: Autor, (2021).

#### 4.3.4 Índice de atividade pozolânica (IAP) – Chapelle modificado

O ensaio de Chapello modificado foi feito de acordo com a literatura (TAO SUN et al., 2019), e de acordo com a NBR 15895 (ABNT, 2010), com algumas adaptações por conta do equipamento de agitação disponível. Em um béquer contendo 250 mL de água destilada, foi pesado 0,1000 g da amostra pulverizada e 0,2000 g de CaO (obtido do tratamento térmico do CaCO<sub>3</sub> a 1000 °C durante 4 h). A solução foi mantida por 16 h em temperatura de 90 °C em equipamento padronizado com agitação mecânica. O resultado foi medido, por meio de titulação de 50,00 mL da solução com HCl 0,1 M e fenolftaleína (1 g/L). Esse método prevê que, quanto maior o consumo de Ca(OH)<sub>2</sub> formado pela hidratação do CaO, maior a atividade pozolânica do material. Ao final do ensaio, o cálculo do índice de atividade pozolânica foi calculado pela Equação 4:

$$IAP = 2x \frac{V_{branco} - V_{amostra}}{V_{branco}} \frac{MM(Ca(OH)_2)}{MM(CaO)} x 1000 \quad [4]$$

Onde:

$IAP$  = índice de atividade pozolânica (mg  $\text{Ca(OH)}_2$ /g amostra);  
 $V_{branco}$  = mililitros de HCl 0,1 M consumidos pela solução “branco”;  
 $V_{amostra}$  = mililitros de HCl 0,1 M consumidos pela amostra;  
 $MM$  = massa molar dos compostos  $\text{Ca(OH)}_2$  ( $74,09 \text{ g mol}^{-1}$ ) e  $\text{CaO}$  ( $56,08 \text{ g mol}^{-1}$ );  
 $1000$  = fator para expressar a atividade pozolânica em mg/g;  
 $2$  = fator estequiométrico da reação de neutralização;

A título de comparação, realizou-se o cálculo do índice de atividade pozolânica Chapelle, que corresponde ao teor de hidróxido de cálcio fixado, obtido pela Equação 5:

$$I_{Ca(OH)_2} = \frac{28 \cdot (V_3 - V_2) \cdot F_c}{m_2} \cdot 1,32 \quad [5]$$

Onde:

$I_{Ca(OH)_2}$  = é o índice de atividade pozolânica Chapelle obtido no ensaio, correspondente ao teor de hidróxido de cálcio fixado, é expresso em miligramas (mg) e  $\text{Ca(OH)}_2$  por grama de material;  
 $m_2$  = é a massa de material pozolânico (g);  
 $V_2$  = é o volume de HCl 0,1M consumido no ensaio (mL);  
 $V_3$  = é o volume de HCl 0,1M consumido no ensaio branco (mL);  
 $F_c$  = é o fator de correção de HCl para concentração de 0,1M;  
1,32 é a razão de massas molares  $\text{Ca(OH)}_2/\text{CaO}$ .

#### **4.3.5 Índice de desempenho do material pozolânico com cimento Portland aos 28 dias**

A determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, segundo NBR 5752 (ABNT, 2014), consistiu em relacionar as resistências de CPs com argamassa de cimento e areia com as resistências de CPs com as

argamassas contendo substituição do cimento por 5, 10 e 20% de IEPP. Essa relação ocorre de acordo com a Equação 6 e deve ser superior a 75%.

$$I_{\text{cimento}} = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \times 100 \quad [6]$$

Onde:

$I_{\text{cimento}}$  = Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em porcentagem;

$f_{cB}$  = Resistência média dos CPs de cimento com IEPP;

$f_{cA}$  = Resistência média dos CPs de cimento sem substituição.

### **4.3.6 Caracterização estrutural e composicional dos materiais utilizados**

#### **4.3.6.1 Fluorescência de raios X**

A fluorescência de raios X (FRX) é uma técnica analítica multi-elementar não destrutiva capaz de realizar a análise e as determinações quantitativa e qualitativa da concentração de elementos em uma ampla variedade de tipos de amostras, em que suas aplicações incluem análises químicas de elementos em ciências ambientais, arqueologia, análise de meteoritos, análises biológicas e materiais, perfil de profundidade química em filmes finos e mapeamento químico. A FRX do IEPP foi realizada sobre uma amostra representativa no Laboratório de Raios X do Instituto de Tecnologia Cerâmica do SENAI na cidade de Criciúma no estado de Santa Catarina, através do método da fusão, utilizando um espectrômetro de fluorescência de raios X modelo Axios, da marca Panalytical. A Figura 12 mostra o equipamento utilizado para a análise.

**Figura 12** - Equipamento utilizado no ensaio de FRX.



Fonte - SENAI, 2021.

#### 4.3.6.2 Difração de raios X

A difração de raios X é o fenômeno de interação entre um feixe incidente de raios X e os elétrons dos átomos componentes de um material, sendo posteriormente detectados os fótons difratados, que constituem o feixe difratado. Essa técnica analítica permite a identificação de arranjos atômicos periodicamente organizados, característica das estruturas cristalinas (MEDEIROS et al., 2015).

Foram medidas 18 amostras (3 amostras do IEP, 3 amostras do cimento Portland, 3 amostras do traço referência, 3 amostras da substituição com 5%, 3 amostras do traço com 10% e 3 amostras do traço com substituição de 20%) nas análises realizadas no Laboratório Multiusuário da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina (LabMult). O equipamento utilizado foi um difratômetro de raios X da marca Rigaku, modelo Ultima IV, operando a 30 kV e 40 mA, com radiação de  $\text{Cu K}\alpha$  ( $\lambda=0,15418$  nm) e taxa de aquisição de  $2^\circ/\text{min}$ . A Figura 13 mostra o equipamento utilizado na pesquisa.

**Figura 13** - Equipamento utilizado no ensaio de DRX.

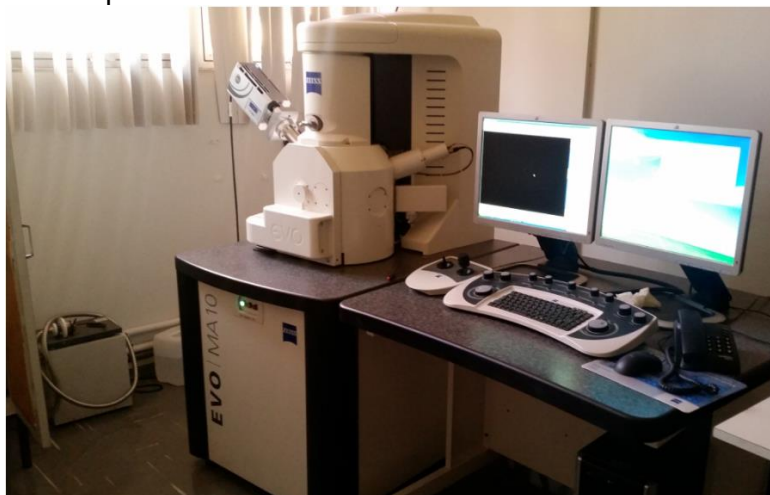


Fonte - UTFPR, 2021.

#### **4.3.6.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)**

O princípio da tecnologia da microscopia eletrônica de varredura (MEV) é usar um feixe de elétrons gerado por um filamento ou cristal, o qual é projetado para explorar a superfície da amostra ponto a ponto e transmitir o sinal do detector para a tela catódica e, em seguida, digitalizá-lo em sincronização total com o feixe incidente (DEDAVID et al., 2007). O modelo do equipamento utilizado foi o FEI Quanta 200 e foram feitas análises de 10 amostras (1 amostra do cimento Portland utilizado nos ensaios, 1 amostra do IEP, 1 amostra da argamassa com substituição de 5% aos 7 dias, 1 amostra da argamassa com substituição de 5% aos 28 dias, 1 amostra da argamassa com substituição de 5% aos 63 dias, 1 amostra da argamassa com substituição de 5% aos 91 dias, 1 amostra da argamassa com traço referência aos 7 dias, 1 amostra da argamassa com traço referência aos 28 dias, 1 amostra da argamassa com traço referência aos 63 dias, 1 amostra da argamassa traço referência aos 91 dias). A Figura 14 mostra um equipamento similar ao que foi utilizado no ensaio.

**Figura 14** - Microscópio Eletrônico de Varredura similar ao utilizado nesta dissertação.



Fonte - (UFU, 2021).

#### **4.4 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA ARGAMASSA**

Todos os traços de argamassas foram submetidos aos ensaios apresentados na Tabela 5, conforme prescrição de suas respectivas normas e quantidades de amostras analisadas.

**Tabela 5 - Ensaios, normas e amostras analisadas.**

Beneficiamento do Material	Amostras	Caracterização dos Insumos	Amostras	Estado Fresco	Amostras	Estado Endurecido	Amostras	Caracterização Química da argamassa	Amostras
Ensaio		Ensaio		Ensaio		Ensaio		Ensaio	
Chapele Modificado	3	Ensaio Granulométrico do IEP	2	Índice de Consistência	12	Ensaio de Tração da Flexão	48	DRX	18
NBR 15895 (ABNT, 2010)		NBR 7211 (ABNT, 2009)		NBR 7215 (ABNT, 2005)		NBR 13279 (ABNT, 2005)		MEV	10
		Ensaio Granulométrico do Agregado Miúdo	2			Ensaio de Compressão	96	FRX	1
		NM 248 (ABNT, 2003)				NBR 13279 (ABNT, 2005)			
		Massa Específica do Agregado Miúdo	2						
		NBR 5737 (ABNT, 1986)							
		Massa Específica do Cimento Portland	2						
		NBR 16605 (ABNT, 2017)							

Fonte: Autor, (2021).

#### 4.4.1 Índice de consistência

No ensaio de consistência foi utilizada a mesa de flow manual NBR 7215 (ABNT, 2019) a qual é uma mesa horizontal e plana de metal não corrosível, com uma haste fixada em seu centro, e que por meio de uma guia conveniente, recebe de um excêntrico um movimento vertical ascendente de  $(12,5 \pm 0,2)$  mm, até o limite do equipamento e em seguida sofre uma queda brusca, o que resulta no espalhamento da argamassa sobre a mesa. Foram analisadas 12 amostras (3 amostras de cada traço) nesse ensaio. A Figura 15 mostra a mesa flow.



**Figura 15** - Ensaio de consistência, mesa de flow.



Fonte - Autor, (2021).

#### **4.4.2 Resistência à compressão e tração da flexão**

O ensaio de resistência à compressão foi realizado segundo a NBR 13279 (ABNT, 2005) – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Essa norma foi escolhida por contemplar também a tração na flexão.

Para a realização deste ensaio, o equipamento utilizado foi uma prensa elétrica digital com carga máxima de 1000 kN, tensão 220 volts, precisão  $\pm 1\%$  e potência 750 watts da marca Solocap geotecnologia rodoviária Ltda. Foram utilizados 6 CPs prismáticos (ensaio em sextuplicata) para cada traço elaborado, totalizando 96 CPs.

O procedimento de ruptura das amostras ocorreu aos 7, 28, 63 e 91 dias, sendo que a aferição da resistência à tração ocorreu com o auxílio de uma prensa e dispositivo específico de acordo com a Figura 16.

**Figura 16** - Equipamento utilizado para os ensaios: compressão e tração na flexão.



Fonte - Autor, (2021).

A resistência à tração na flexão foi calculada segundo a Equação 7:

$$R_t = \frac{1,5LF}{40^3} \quad [7]$$

Onde:

$R_t$  = resistência à tração na flexão (Mpa);  
 $F$  = carga aplicada verticalmente no centro do prisma (N);  
 $L$  = distância entre os suportes (mm) e  
 $40^3$  = (a) altura mm x (a)<sup>2</sup> largura mm.

Na etapa seguinte do ensaio, correspondente à resistência à compressão, foram utilizados os mesmos CPs do ensaio de tração na flexão, conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005) recomenda.

Posicionou-se então os CPs no dispositivo de carga típico para ensaios de resistência à compressão e então aplicou-se uma carga até a ruptura dos mesmos. A resistência à compressão foi calculada segundo a Equação 8:

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad [8]$$

Onde:

$R_c$  = resistência à compressão (Mpa);  
 $F_c$  = carga máxima aplicada (N) e  
1600 = área da seção mm<sup>2</sup>.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

#### 5.1.1 Massa específica do aglomerante

Os valores encontrados para a densidade do cimento Portland CPV-ARI, como pode ser visto na Tabela 6, enquadram o material na categoria de cimento com baixo teor de adições.

**Tabela 6** - Massa específica do aglomerante.

Ensaio I		Ensaio II	
Massa de aglomerante (g)	60,00	Massa de aglomerante (g)	60,00
Leitura inicial (cm <sup>3</sup> )	0,50	Leitura inicial (cm <sup>3</sup> )	0,50
Leitura final (cm <sup>3</sup> )	19,80	Leitura final (cm <sup>3</sup> )	19,90
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,11	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,09
Massa específica média (g/cm <sup>3</sup> )	3,10		

Fonte - Autor, (2021).

Segundo literatura, a massa específica do aglomerante, varia entre 2,80 g/cm<sup>3</sup> para aglomerantes mais leve, tipo CP IV e a 3,12 g/cm<sup>3</sup> para aglomerantes mais densos, tipo CPV ARI, o resultado obtido foi de 3,10 g/cm<sup>3</sup>.

### 5.1.2 Massa específica do agregado miúdo

Foram realizadas duas determinações, sendo que o valor médio encontrado para massa específica do agregado foi de 2,61 g/cm<sup>3</sup>. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 7 e são condizentes com as características de areias naturais com predominância de quartzo.

**Tabela 7** - Massa específica do agregado miúdo.

Ensaio I		Ensaio II	
( $m_A$ ) Massa da amostra seca em estufa (g)	200,00	( $m_A$ ) Massa da amostra seca em estufa (g)	200,00
( $V$ ) Volume frasco calibrado (cm <sup>3</sup> )	580,40	( $V$ ) Volume frasco calibrado (cm <sup>3</sup> )	580,40
( $V_a$ ) Volume de água (cm <sup>3</sup> )	503,60	( $V_a$ ) Volume de água (cm <sup>3</sup> )	504,20
( $m_C$ ) massa do conjunto (g)	387,20	( $m_C$ ) massa do conjunto (g)	387,50
( $m_D$ ) Massa da amostra saturada (g)	890,80	( $m_D$ ) Massa da amostra saturada (g)	891,40
( $\rho_a$ ) densidade da água (g/cm <sup>3</sup> )	1,00	( $\rho_a$ ) densidade da água (g/cm <sup>3</sup> )	1,00
( $\rho_s$ ) Densidade do agregado (g/cm <sup>3</sup> )	2,60	( $\rho_s$ ) Densidade do agregado (g/cm <sup>3</sup> )	2,62

Fonte - Autor, (2021).

Obteve-se assim a massa específica do agregado miúdo de 2,61 g/cm<sup>3</sup>, valor esperado pela literatura.

### 5.1.3 Análise granulométrica do agregado miúdo

A composição granulométrica do agregado miúdo é demonstrada pela Tabela 8.

**Tabela 8** - Análise granulométrica do agregado miúdo.

Peneiras	Retenções						Média
	A			B			
	Massa retida	% retido	% retido acumulada	Massa retida	% retida	% retida acumulada	% retida acumulada
	(g)	(%)	(%)	(g)	(%)	(%)	(%)
4,75 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,36 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,18 mm	3,40	0,68	0,68	3,20	0,59	0,59	0,64
600 µm	37,00	7,40	8,08	38,20	7,09	7,69	7,89
300 µm	126,70	25,36	33,44	164,50	30,55	38,24	35,84
150 µm	258,90	51,81	85,25	258,10	47,93	86,17	85,71
Fundo	73,70	14,75	100,00	74,50	13,83	100,00	100,00
Somatório	499,70	-		538,50	-		
Diâmetro máximo	1,18mm						
Módulo de finura	1,30						

*A e B representam uma duplicata do agregado miúdo.*

**Fonte** - Autor, (2021).

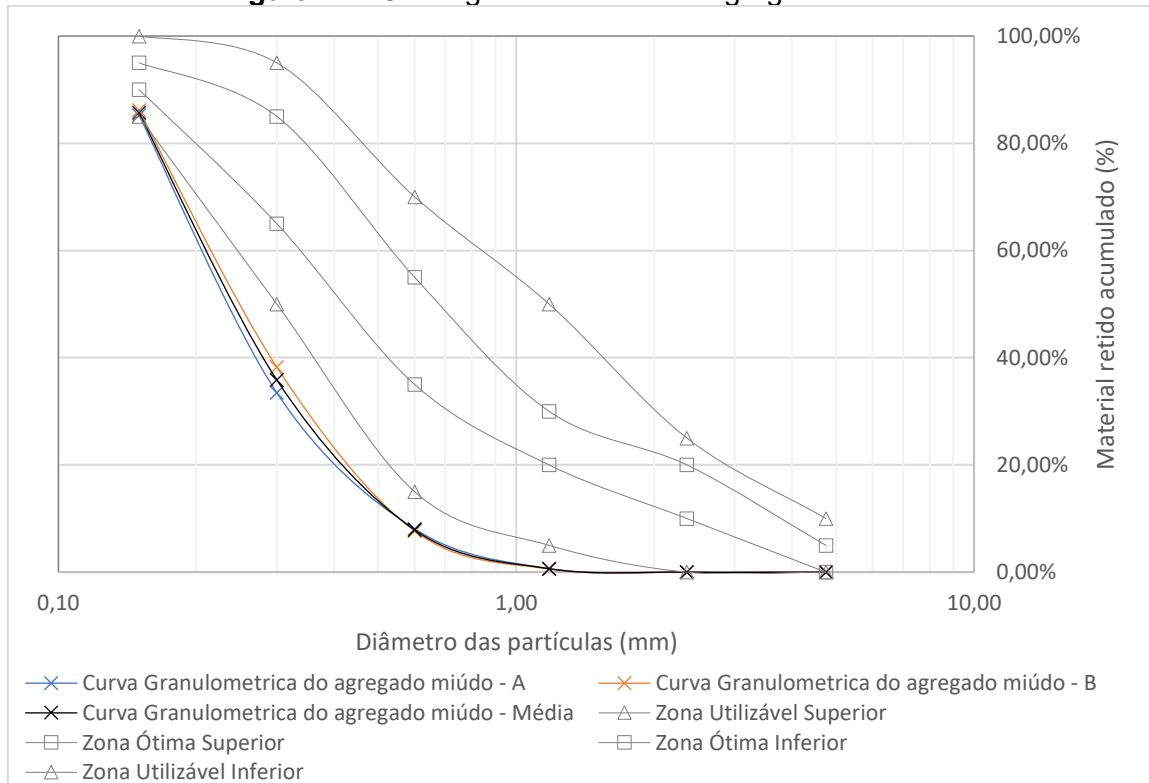
O módulo de finura, expresso pela Equação 9, encontrado foi de 1,30 e o diâmetro máximo, característica do agregado, foi de 1,18 mm.

$$MF = \frac{\sum \%retidoacumulado(Peneiras_{4,75+2,36+1,18+600+300+150})}{100} \quad [9]$$

As curvas granulométricas são apresentadas na Figura 17. Por inexistir normas que determinem curvas granulométricas para este tipo de argamassa,

foram utilizados como base os limites apresentados na NBR 7211 (ABNT, 2009), agregados.

**Figura 17 - Curva granulométrica do agregado miúdo.**



**Fonte - Autor, (2021).**

As curvas granulométricas da Figura 17 do agregado miúdo representa uma caracteriza o agregado como fino, estando abaixo da zona utilizável.

A zona utilizável inferior, representa as características granulométricas de areias consideradas finas. Areias para utilização em revestimentos argamassados devem possuir curva granulométrica contínua e bem distribuída.

A presença de uma linha contínua na curva granulométrica, indica a existência de grãos de tamanhos diferentes, o que proporciona um maior empacotamento e, conseqüentemente, uma resistência maior. Apesar de a areia

analisada estar fora dos limites utilizáveis, a mesma apresentou características desejáveis para elaboração da argamassa.

## **5.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA PORCELANA PULVERIZADA**

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios com a porcelana pulverizada.

### **5.2.1 Análise granulométrica da porcelana**

A composição granulométrica do IEPP é apresentada na Tabela 9.

**Tabela 9** - Ensaio granulométrico da porcelana.

Peneiras	Retenções						Média
	A			B			
	Massa retida	% retida	% retida acumulada	Massa retida	% retida	% retida acumulada	% retida acumulada
	(g)	(%)	(%)	(g)	(%)	(%)	(%)
4,75 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,36 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,18 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
600 µm	8,00	1,60	1,60	10,10	2,02	2,02	1,81
300 µm	160,60	32,18	33,79	155,60	31,10	33,11	33,45
150 µm	139,50	27,96	61,74	139,90	27,96	61,07	61,41
Fundo	190,90	38,26	100,00	194,80	38,93	100,00	100,00
Somatório	499,00	-		500,40	-		
Diâmetro máximo	600 µm						
Módulo de finura	0,97						

A e B representam uma duplicata do IEP.

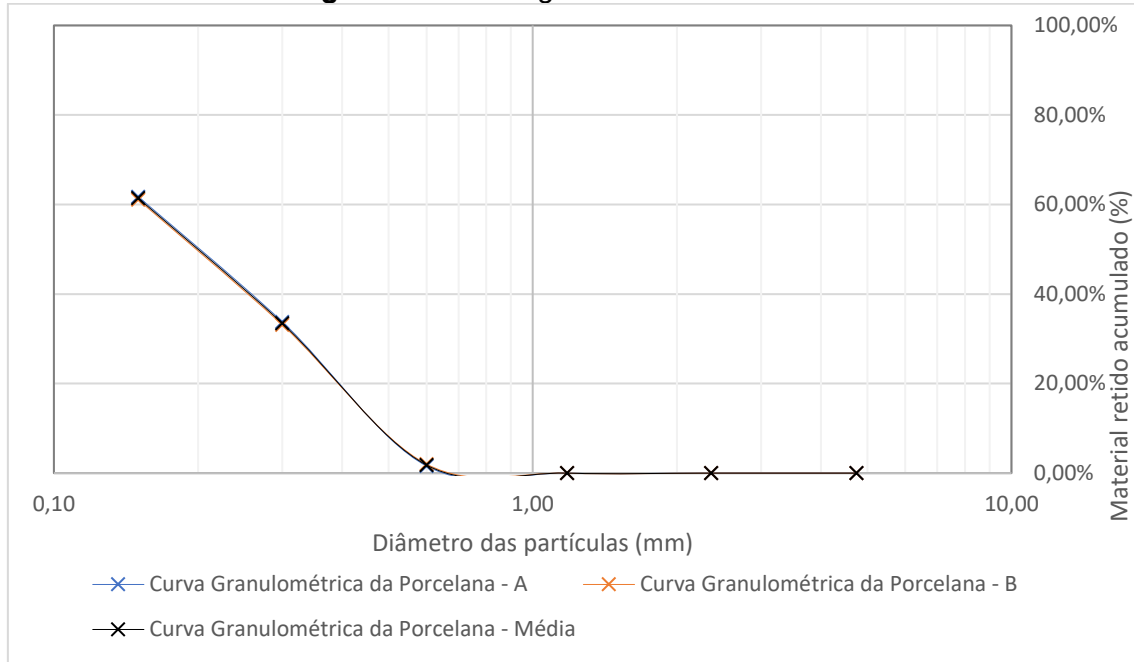
**Fonte** - Autor, (2021).

O módulo de finura encontrado foi de 0,97, obtido através da Equação 5 e a dimensão máxima característica do IEPP foi de 600 µm.

A curva granulométrica obtida da porcelana, na Figura 18, mostra uma linha uniforme, ao contrário do agregado miúdo, isso mostra o quanto o tamanho dos grãos foi diminuído por meio da moagem. Adicionalmente, a curva granulométrica mostra um alto grau de homogeneidade em termos de tamanho de grão.



**Figura 18 - Curva granulométrica do IEPP.**



**Fonte - Autor, (2021).**

### 5.2.2 Fluorescência de Raios X do IEPP

Como esperado, os resultados da análise de fluorescência de raios X confirmaram que os isolantes de porcelana são formados, majoritariamente, por silício, alumínio e oxigênio. A composição centesimal dos isolantes foi expressa na base óxido para fins de seguir as convenções da técnica (Tabela 10).

**Tabela 10** - Resultado da análise de fluorescência de raios X do IEPP.

Nomenclatura do óxido	Fórmula	Teor (%)
Dióxido de Silício	SiO <sub>2</sub>	75,1
Óxido de Alumínio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,6
Óxido de Ferro Hematita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,2
Óxido de Potássio	K <sub>2</sub> O	2,6
Óxido de Sódio	Na <sub>2</sub> O	0,7
Óxido de Cálcio	CaO	0,5
Dióxido de Titânio	TiO <sub>2</sub>	0,3
Óxido de Magnésio	MgO	0,3
Óxido de Manganês	MnO	0,1
Óxido de Cromo	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1
Pentóxido de Fósforo	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,1
Óxido de Bário	BaO	<0,05
Óxido de Chumbo	PbO	<0,05
Óxido de Estrôncio	SrO	<0,05
Óxido de Zinco	ZnO	<0,05
Óxido de Zircônio	ZrO <sub>2</sub>	<0,05
Óxido de Cobalto	Co <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	N.D.

Fonte - Autor, (2021).

Uma análise mais detalhada desses resultados levou, no entanto, a uma consideração mais sutil. O fato desta matriz inorgânica apresentar um baixo teor de cálcio (apenas 0,5% na base óxido), pode ter sido uma das principais razões para o perfil de resistência observado nos ensaios com os CPs produzidos (ver

sessão 6.3.3 (posteriormente). Como descrito na literatura, ambientes químicos silicosos, porém, ricos em cálcio, podem favorecer as reações de hidratação do cimento pela formação de plataformas reativas onde os sítios de cálcio podem causar mudanças significativas na acidez ou basicidade da superfície dos cristalitos de quartzo ou aluminossilicatos, favorecendo níveis mais elevados de substituição do cimento (DE MOURA et al., 2019).

Devido à presença de outros elementos químicos no material, como por exemplo ferro e potássio, e da necessidade de investigação do perfil cristalográfico da fase sílica ( $\text{SiO}_2$ ), a amostra de isolador de porcelana moída foi analisada por difração de raios X.

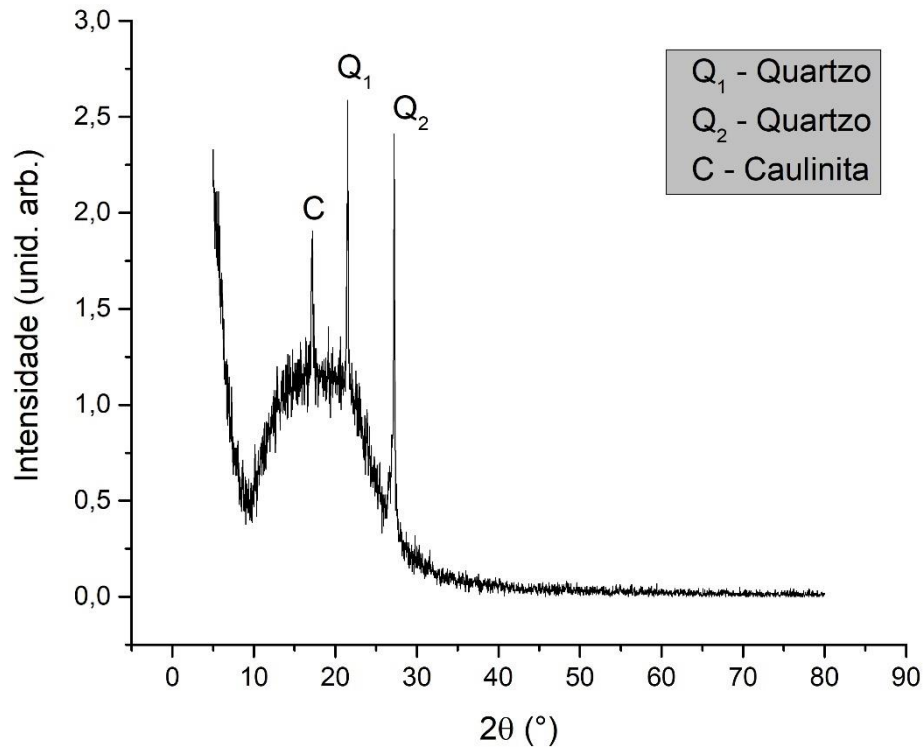
### **5.2.3 Difração de Raios X do IEPP**

A Figura 19 mostra o perfil cristalográfico da amostra de isolante elétrico de porcelana pulverizada obtido por meio da técnica de difratometria de raios X.

A amostra de IEPP utilizada neste trabalho apresentou perfil predominantemente amorfo, caracterizado pelo halo na região de 10 a 30 ° ( $2\theta$ ), já na região dos 17,2° apresenta caulinita, sendo que os picos de difração em 21,5 ° e 27,3 ° ( $2\theta$ ) foram atribuídos à fase quartzo do óxido de silício (ZUO et al., 2016).

A presença do halo amorfo na Figura 19 seria um indicativo da reatividade da porcelana utilizada neste trabalho. Conforme (ROY et al., 2006), um material que apresente sua composição baseada em uma parte de sílica amorfa e outra parte de sílica cristalina, pode comporta-se como um típico material pozolânico e possibilitar mudanças na sua estrutura cristalográfica quando submetido ao processo de hidratação do cimento.

**Figura 19** - Análise da difração de raios X da porcelana pulverizada.



Fonte - Autor, (2021).

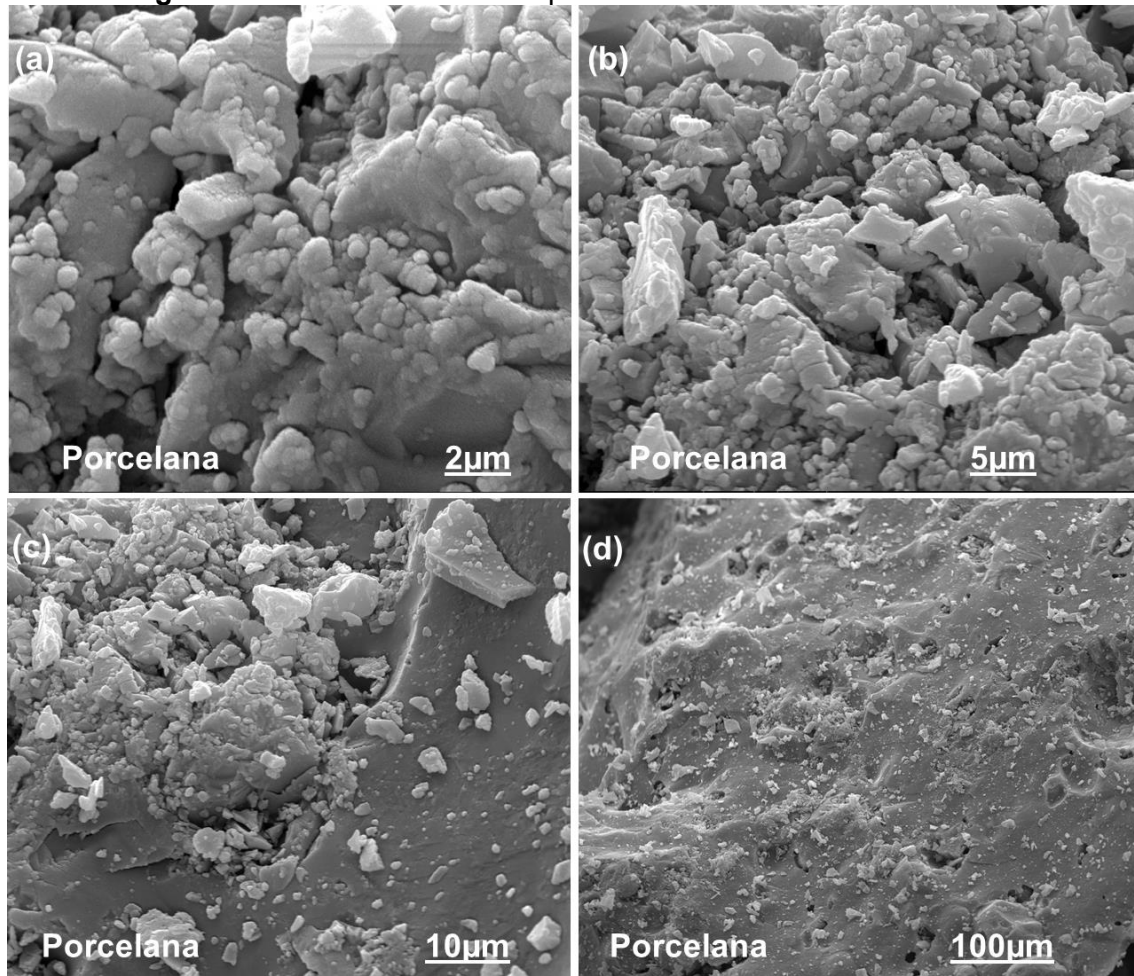
#### 5.2.4 Microscopia eletrônica de varredura do IEPP

A amostra de isolador elétrico da porcelana pulverizado antes do peneiramento foi analisada por microscopia eletrônica de varredura (MEV). A amostra analisada foi formada pela mistura de todas as granulometrias obtidas no processo de moagem empregado.

De acordo com as imagens da Figura 20 é possível notar a alta variação de tamanho das partículas, desde aquelas superiores a 100 micra até outras que chegam a menos de 1 micra. Porém, no ensaio granulométrico que mede a finura de até 0,75 mm, o material mostrou uma boa distribuição dos grãos. Já o MEV, cujo nível de identificação das partículas é maior, a distribuição de tamanho mostrou-se mais abrangente, com grãos de tamanhos diferentes. Esse resultado

foi esperado por conta do IEPP, nesse caso, não ter sido submetido ao peneiramento prévio.

**Figura 20** - Análise de microscopia eletrônica de varredura da IEPP.



Fonte - Autor, (2021).

### 5.2.5 Índice de atividade pozolânica – Chappelle modificado

O método Chappelle modificado permitiu o cálculo do índice de atividade pozolânica (IAP), o qual expressa a capacidade do material avaliado em reagir com o hidróxido de cálcio e contribuir com as reações de hidratação do cimento.

Os resultados apresentados na Tabela 11 mostram coerência com o perfil cristalográfico obtido por difratometria de raios X. A baixa atividade pozolânica

sugerida pelos resultados deveu-se, principalmente, à presença de fases cristalinas e tamanho elevado de partícula ocasionando um espaçamento muito grande.

**Tabela 11** - Dados obtidos pelo método Chapelle modificado conforme literatura.

Branco	Replicata	Massa CaO (g)	Consumo de HCl (mL)			Desvio Médio (mL)	Média (triplicata) (mL)	
	1	0,2005	14,90	14,70	14,50	0,1333	14,70	
	2	0,2007	14,10	15,20	14,90	0,4222	14,73	
<b>Média</b>							<b>14,72</b>	
Fc (HCl)							1,1300	
Sílica (referência)	Replicata	Massa (g)	HCl consumido (mL)			Desvio Médio (mL)	Média HCl (mL)	IAP
	1	0,1002	10,90	10,90	10,80	0,04440	10,87	
	2	0,1002	10,80	11,90	11,60	0,4222	11,43	
<b>Média</b>							<b>11,15</b>	<b>640</b>
Porcelana	Replicata	Massa (g)	HCl consumido (mL)			Desvio Médio (mL)	Média HCl (mL)	IAP
	1	0,1000	13,00	13,30	13,50	0,1778	13,27	
	2	0,1000	12,50	13,10	13,30	0,3111	12,97	
<b>Média</b>							<b>13,12</b>	<b>286</b>

*IAP: Índice de atividade pozolânica expresso em mg de Ca(OH)<sub>2</sub>/g de amostra.*

*Fc: Fator de correção da solução de HCl padronizada.*

*Para todos os testes pesou-se, aproximadamente, 0,200 g de CaO.*

**Fonte** - Autor, (2021).

Como pode ser visto na Tabela 11, a sílica utilizada como referência mostrou um IAP mais elevado, 640 Ca(OH)<sub>2</sub>/g, resultado um pouco abaixo do reportado por TAVARES et al. (2020), que usou um fumo de sílica típico com atividade pozolânica correspondente a 926 mg Ca(OH)<sub>2</sub>/g, medida pelo método

Chapelle modificado. A literatura reporta que sílica amorfa pode apresentar IAP entre 1400 e 1500 mg de  $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$  (ANDRADE, 2017), o que não foi observado neste presente trabalho. Por sua vez, a amostra de IEPP apresentou IAP igual a 327 mg  $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ , inferior ao mínimo exigido pela NBR 15895 (ABNT, 2010), que é  $\text{IAP} = 436 \text{ mg Ca(OH)}_2/\text{g}$ , ou seja, 330 mg  $\text{CaO/g}$  (CHRISTÓFOLLI, 2010).

Conforme supracitado, a Tabela 12 mostra os resultados obtidos conforme a NBR 15895 (ABNT, 2010).



**Tabela 12** - Dados obtidos pelo método Chappelle modificado conforme NBR 15895 (ABNT, 2010).

Branco	Replicata	Massa CaO (g)	Consumo de HCl (mL)			Desvio Médio (mL)	Média (triplicata) (mL)	
	1	0,2005	14,90	14,70	14,50	0,1333	14,70	
	2	0,2007	14,10	15,20	14,90	0,4222	14,73	
<b>Média</b>							<b>14,72</b>	
Fc (HCl)							1,1300	
Sílica (referência)	Replicata	Massa (g)	HCl consumido (mL)			Desvio Médio (mL)	Média HCl (mL)	IAP
	1	0,1002	10,90	10,90	10,80	0,04440	10,87	1604
	2	0,1002	10,80	11,90	11,60	0,4222	11,43	1368
<b>Média</b>							<b>11,15</b>	<b>1486</b>
Porcelana	Replicata	Massa (g)	HCl consumido (mL)			Desvio Médio (mL)	Média HCl (mL)	IAP
	1	0,1000	13,00	13,30	13,50	0,1778	13,27	606
	2	0,1000	12,50	13,10	13,30	0,3111	12,97	731
<b>Média</b>							<b>13,12</b>	<b>668</b>

Fonte - Autor, (2021).

Em comparação a outros materiais e com base no IAP, o IEPP mostrou potencial limitado para ser utilizado como material pozolânico substituto do cimento. Para efeito de comparação com resultados da literatura, a Tabela 12, a seguir, mostra os valores de IAP para a metacaulinita submetida a tratamento térmico (MOTHÉ, 2004).

**Tabela 13** - IAP da metacaulinita de acordo com a temperatura de tratamento.

<b>Material</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>IAP mg Ca(OH)<sub>2</sub>/g</b>
Metacaulinita	490	717
	600	721
	650	732
	700	743
	700	734
	750	689
	800	653
	900	353

**Fonte** - MOTHÉ (2004).

A metacaulinita é um material manufaturado resultante da desidratação do caulim. O processo de calcinação é aplicado com o objetivo de alterar a estrutura cristalina do caulim, tornando-o amorfo e passível de reação com hidróxido de cálcio que é produzido na hidratação do cimento. O melhor resultado da Tabela 12 (IAP = 743 mg Ca(OH)<sub>2</sub>/g), mais elevado que o obtido para o IEPP, porém, demandando tratamento térmico da metacaulinita a 700 °C. Considerando um processo em escala industrial, um tratamento térmico a essa temperatura pode se tornar inviável, pois demandaria um grande aporte de energia térmica. De maneira geral, as informações da Tabela 12 mostram que o IEPP apresenta baixa atividade pozolânica, porém, pela sua composição química, rica em silício, poderia ser aproveitado em substituições parciais do cimento para produção de argamassas e concreto.

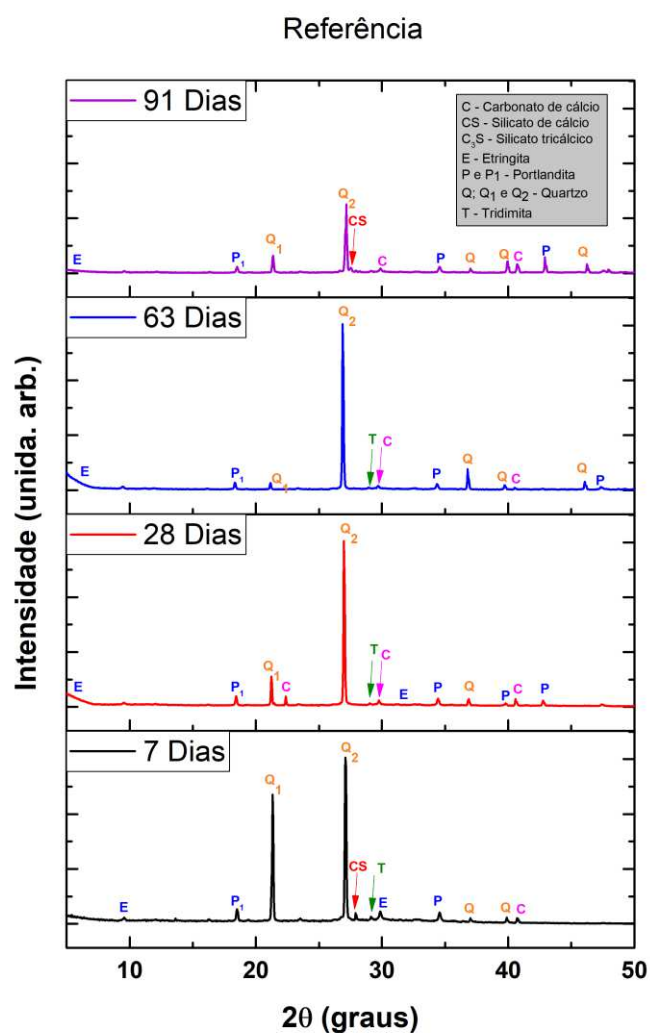
### **5.3 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS**

Na sequência, são apresentados os resultados obtidos das análises realizadas sobre os CPs de argamassa produzidos.

#### **5.3.1 Difração de Raios X dos CPs**

Os resultados de difratometria de raios X dos CPs de referência (sem adição de IEPP) são apresentados na Figura 21.

**Figura 21** - Difração de raios X dos CPs referência.



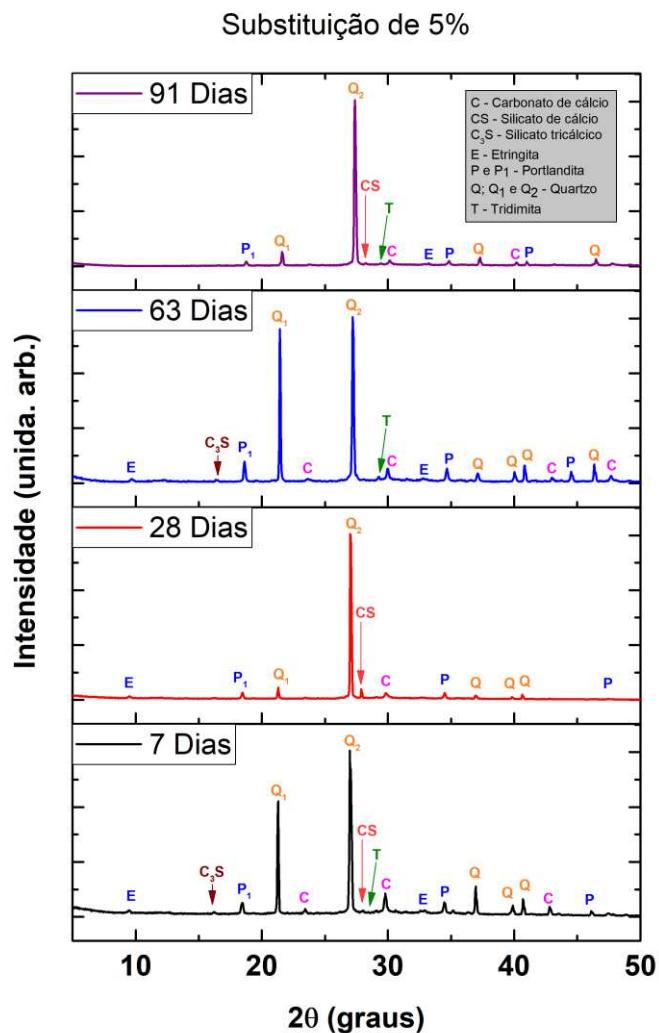
Fonte - Autor, (2021).

Na Figura 21, os picos indicados por Q<sub>1</sub> e Q<sub>2</sub> são referentes à fase quartzo da sílica. Os CPs referência tiveram a relação Q<sub>1</sub>/Q<sub>2</sub> alterada antes dos 7 dias. A literatura reporta que o quartzo apresenta dois picos de difração (Q<sub>1</sub> e Q<sub>2</sub>) de alta intensidade na região de 21° e 27° (2θ), respectivamente, sendo que a intensidade de Q<sub>2</sub> é maior que a intensidade de Q<sub>1</sub> (BISWAS et al., 2018). Os CPs referência apresentaram alterações significativas nas intensidades dos picos de difração indexados Q<sub>1</sub> e Q<sub>2</sub> e o monitoramento das intensidades de Q<sub>1</sub> e Q<sub>2</sub> é importante porque podem contribuir para a compreensão do processo de

crescimento dos grãos de quartzo conforme sua superfície vai sendo exposta às espécies químicas existentes no meio de reação, pois alterações nas intensidades de  $Q_1$  e  $Q_2$  podem indicar o crescimento preferencial dos grãos em uma determinada direção (INOUE; HIRASAWA, 2013).

Os resultados de difratometria de raios X dos CPs com substituição de 5% de cimento por IEPP são apresentados na Figura 22.

**Figura 22** - Difração de raios X dos CPs com substituição de 5% de aglomerante por IEPP.

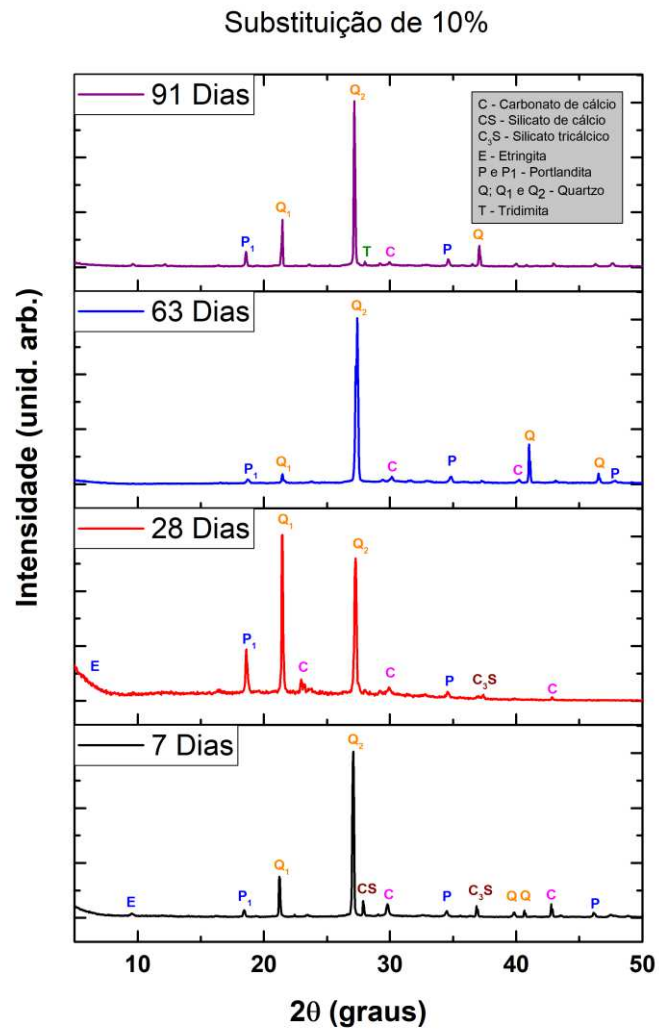


Fonte - Autor, (2021).

Os CPs com 5% de substituição apresentaram intensidades de Q1 e Q2 muito semelhantes às observadas para os CPs referência. Foi, porém, observado que os picos menos expressivos do quartzo – acima de 35 ° (2θ), apresentaram maior intensidade nos CPs com 5% de substituição. A 28 dias de cura o perfil do difratograma foi semelhante ao da referência com mesma idade. A resistência a compressão experimentou crescimento semelhante nesse período. Porém, aos 63 dias o pico Q<sub>1</sub> voltou a apresentar alta intensidade e isso foi coincidente com um decréscimo na taxa de aumento da resistência à compressão, porém, a taxa de aumento da resistência à flexão foi mantida. Aos 91 dias a relação Q<sub>1</sub>/Q<sub>2</sub> sofreu um drástico decréscimo, indicando um possível crescimento preferencial dos grãos formados por cristalitos de quartzo.

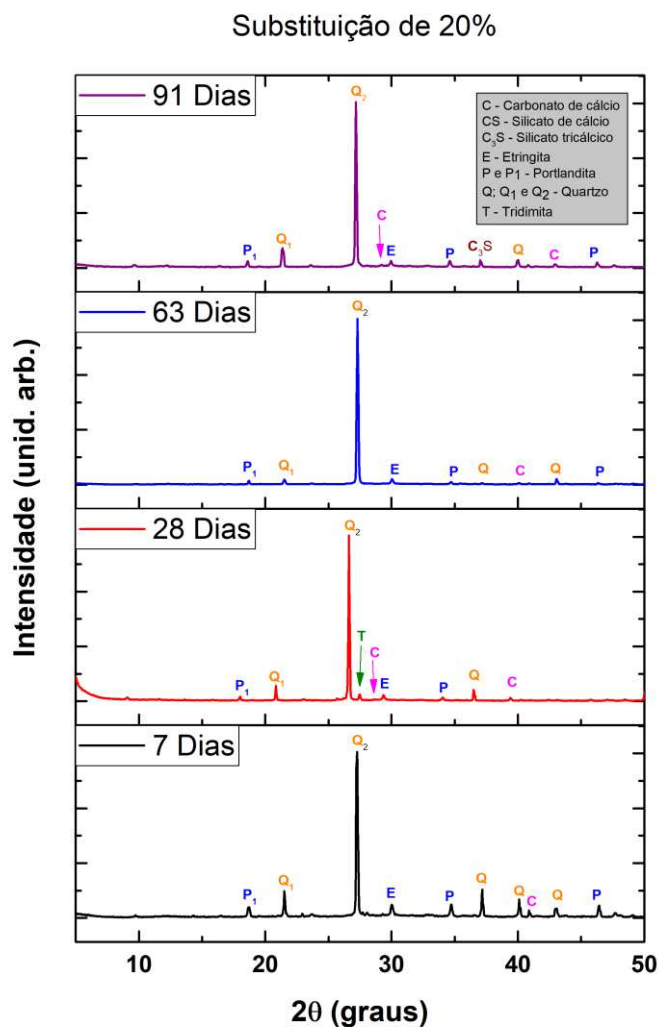
Os difratogramas de raios X dos CPs com substituição de 10 e 20% de cimento por IEPP são apresentados nas Figuras 23 e 24, respectivamente.

**Figura 23 - Difração de raios X dos CPs com substituição de 10% de aglomerante por IEPP.**



Os CPs com 10% de IEPP apresentaram evolução semelhante aos CPs com 20% de substituição, exceto pela idade de 28 dias, onde houve inversão da relação  $Q_1/Q_2$ , alcançando um valor maior que 1.

**Figura 24** - Difração de raios X dos CPs com substituição de 20% de aglomerante por IEPP.



Os CPs com 20% de IEPP parecem ter sido aqueles em que a relação  $Q_1/Q_2$  do quartzo menos foi alterada. Nem mesmo aos 7 dias a relação  $Q_1/Q_2$  ficou próxima daquela observada para a referência. A substituição de 20% de aglomerante teria comprometido a resistência à compressão e flexão por que o material adicional, ou seja, o IEPP, teria ultrapassado o limite de proporção



mássica em que sua contribuição para as reações de hidratação do cimento é perceptível.

Nenhum dos CPs correspondentes às substituições avaliadas apresentou halo amorfo ao ser submetido a análise de DRX, nem mesmo após os primeiros 7 dias de cura. Isso revela que o IEPP, que apresentou IAP acima de 600, foi convertido em fase cristalina (quartzo) logo nos primeiros dias de cura e isso pode ser observado nos 3 níveis de substituição.

A relação  $Q_1/Q_2$  pode ser um indicativo do processo de dissolução/cristalização da sílica presente na forma de quartzo nos CPs estudados. Como o processo de cura do concreto é baseado em uma série de reações químicas de dissolução/cristalização, certamente elas foram afetadas pela presença de 5 a 20% de IEPP em substituição ao cimento Portland.

### 5.3.2 Índice de desempenho do material pozolânico com cimento Portland aos 28 dias

Pode-se observar o resultado do índice da atividade pozolânica conforme a NBR 5752 (ABNT, 2014) com cimento Portland na Tabela 13.

**Tabela 14** - Índice do desempenho da atividade pozolânica com o cimento Portland.

Média Resistência 28 dias	Referência	Média 5%	Média 10%	Média 20%
	38,20	33,84	30,67	25,71
I <sub>cimento</sub>		88,57%	80,28%	67,29%

Fonte - Autor, (2021).

A atividade pozolânica é dada pela relação entre a resistência à compressão da argamassa com o material em estudo e a resistência à compressão da argamassa de referência.

O índice de atividade pozolânica do IEPP com o aglomerante, aos 28 dias, em relação aos CPs de referência foi de 88,57% com a substituição de 5% e 80,28% com a substituição de 10%. De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 1992), esse índice deve ser, no mínimo, de 75%, ou seja, o material avaliado (IEPP) atende a esta exigência da norma, podendo ser considerado pozolânico.

### 5.3.3 Índice de consistência

No ensaio de índice de consistência obtivemos os seguintes resultados apresentados na Tabela 14:

**Tabela 15** - Índice de consistência da argamassa no estado fresco.

Índice de consistência				Média	Desvio Padrão
Argamassa					
Referência	220	225	227	225	3,61
5%	217	231	224	224	7,00
10%	190	204	201	201	7,37
20%	183	187	191	187	4,00

Fonte - Autor, (2021).

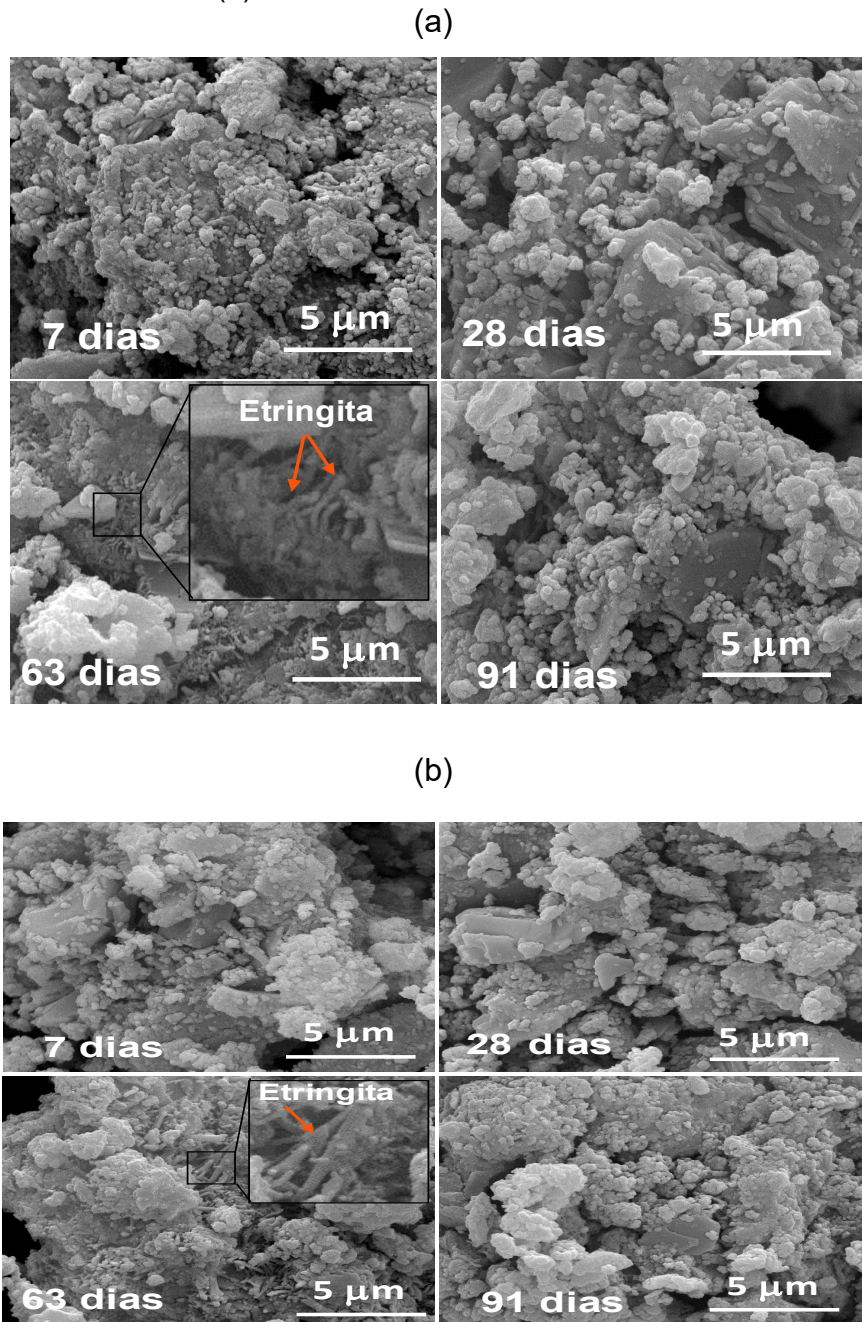
A quantidade de água se manteve constante conforme o traço utilizado, isso fez com que a argamassa produzida perdesse sua consistência. Como pode-se observar na tabela 14, apenas a argamassa com substituição de 5% do aglomerante utilizado (cimento Portland CPV-ARI) por IEPP atendeu à norma NBR 7215 (ABNT, 2005), tendo apresentado o índice de consistência de  $224 \pm 7$  mm.

### 5.3.4 Microscopia eletrônica de varredura das argamassas

As argamassas preparadas foram avaliadas por MEV com base nos CPs referência e nos CPs produzidos com substituição de 5% do aglomerante por IEPP. Foram analisados somente os CPs com 5% de IEPP pelo fato de ter sido

a substituição com os melhores resultados no ensaio de compressão. As imagens obtidas por MEV são apresentadas na Figura 25.

**Figura 25** - Imagens de microscopia eletrônica de varredura dos CPs (a) referência e (b) contendo 5% de IEPP.



Fonte - Autor, (2021).

As imagens obtidas por MEV evidenciam a presença de grande quantidade de grãos micrométricos de quartzo, como esperado pela razão

aglomerante:areia (1:3) cuja superfície serviu para o crescimento de partículas menores referentes aos vários tipos de minerais evidenciados por DRX, tais como gesso -  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  -, calcita -  $\text{CaCO}_3$  - e portlandita -  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

As imagens revelaram ainda a presença de etringita, mineral cuja fórmula química pode ser expressa como  $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_2 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ , na forma de bastonetes nos CPs referência e nos CPs com substituição do aglomerante por 5% de IEPP. A ocorrência de etringita com o típico formato de bastão pode ser observada nos detalhes da Figura 25. Nas imagens de MEV ainda é possível notar que o mineral etringita parece aumentar sua concentração com o tempo de cura da argamassa preparada e aos 63 dias esse mineral parece estar presente em maior concentração que no início do tempo de cura, o que representa uma formação tardia ocasionando calor na hidratação acarretando fissuração. A formação de etringita é associada à geração de estresse na argamassa, expansão do volume e rachaduras, sendo importante o monitoramento da sua presença na argamassa (CARDENAS; KUPWADE-PATIL; EKLUND, 2011).

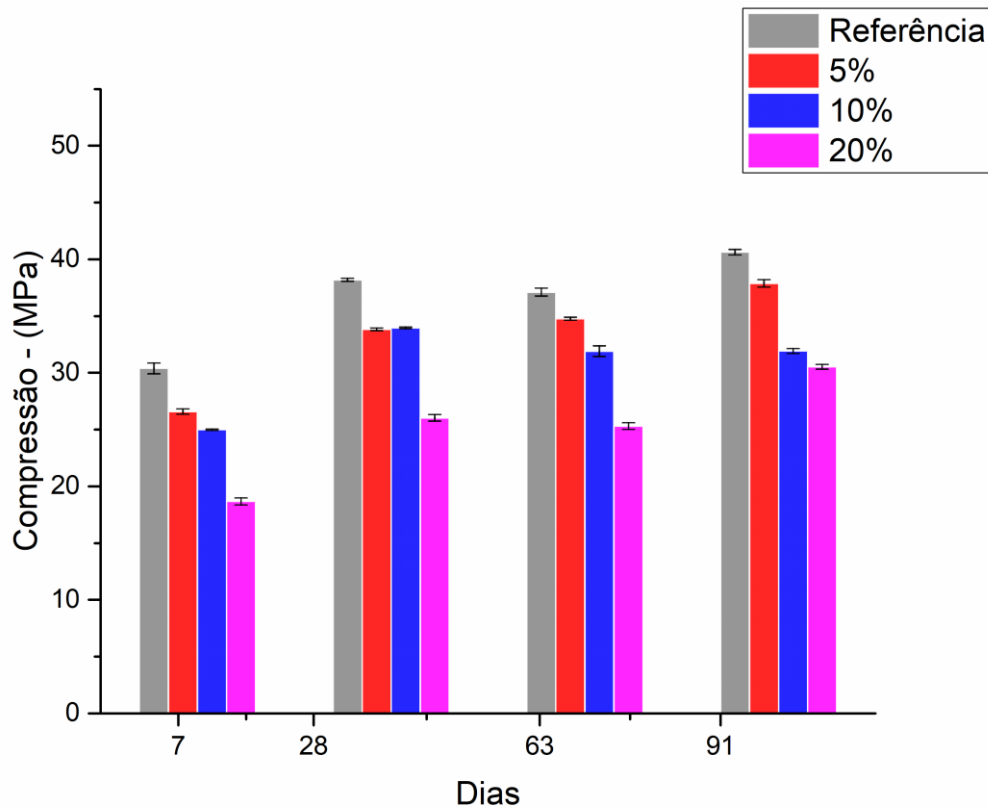
No estudo comparativo, o conjunto de imagens não permitiu identificar qualquer aspecto físico suficiente para concluir que a presença de IEPP na mistura cimentícia causou alguma alteração relevante.

### **5.3.5 Resistência à compressão simples e tração na flexão**

Com base nos resultados de caracterização do IEPP, os CPs foram preparados com três diferentes níveis de substituição do aglomerante e avaliados quanto à resistência à compressão e resistência à flexão.

A Figura 26 mostra os resultados obtidos para resistência à compressão para os três níveis de substituição do aglomerante.

**Figura 26** - Resistência à compressão dos CPs ensaiados.



**Fonte** - Autor, (2021).

O resultado mostrou, de maneira geral, que quando se aumentou o percentual de substituição a resistência diminuiu, dessa forma, o melhor resultado obtido foi com 5% de substituição do aglomerante por IEPP. Mesmo assim, com base no tratamento estatístico aplicado aos resultados obtidos (Tabela 15), pode-se afirmar que o nível de substituição 5% causou mudanças significativas à argamassa analisada em comparação àquela preparada sem a substituição parcial do aglomerante.

Por meio da tratativa dos dados, conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005), considerando os valores obtidos para os CPs no ensaio de resistência à compressão, utilizou-se a análise estatística de variância (ANOVA) para definir

um conjunto de dados representativos por meio da eliminação de informações consideradas não significativas (todos os cálculos estatísticos são apresentados nos apêndices). Mais especificamente, a ANOVA possibilitou a eliminação de médias de três ou mais resultados cujo desvio padrão apresentou-se acima de 0,5 MPa. A ANOVA indicou os seguintes parâmetros para o tratamento dos dados: valores  $<0,05$  diferença significativa e valores  $>0,05$  não há diferença significativa. Com esse critério, pode-se verificar na Tabela 15 que os resultados obtidos do ensaio de resistência à compressão foram significativamente diferentes, exceto os valores obtidos para os CPs com substituição de 10% em idades de rompimento de 63 e 91 dias, e para os CPs com substituição de 20% em idades de 28 e 63 dias.

**Tabela 16** - Análise de variância (ANOVA) em relação à idade de rompimento dos CPs.

<b>Efeito ao longo dos dias – Referência</b>				
Referência	7 Dias	28 Dias	63 Dias	91 Dias
7 Dias	NS	0,000	0,000	0,000
28 Dias	0,000	NS	0,032	0,004
63 Dias	0,000	0,032	NS	0,001
91 Dias	0,000	0,004	0,001	NS
<b>Efeito ao longo dos dias - 5%</b>				
5%	7 Dias	28 Dias	63 Dias	91 Dias
7 Dias	NS	0,001	0,000	0,000
28 Dias	0,001	NS	0,005	0,001
63 Dias	0,000	0,005	NS	0,000
91 Dias	0,000	0,001	0,000	NS
<b>Efeito ao longo dos dias - 10%</b>				
10%	7 Dias	28 Dias	63 Dias	91 Dias
7 Dias	NS	0,000	0,002	0,000
28 Dias	0,000	NS	0,013	0,001
63 Dias	0,002	0,013	NS	0,053
91 Dias	0,000	0,001	0,053	NS
<b>Efeito ao longo dos dias - 20%</b>				
20%	7 Dias	28 Dias	63 Dias	91 Dias
7 Dias	NS	0,000	0,000	0,000
28 Dias	0,000	NS	0,245	0,000
63 Dias	0,000	0,245	NS	0,000
91 Dias	0,000		0,000	NS

*NS: Não significativo.*

**Fonte** - Autor, (2021).

Seguindo o mesmo critério, compilou-se os dados de forma que todos os resultados fossem verificados estatisticamente para avaliar suas particularidades. Na Tabela 16 pode-se visualizar que os resultados obtidos para os CPs referência aos 7, 28, 63 e 91 dias, para os três níveis de substituição de aglomerante por IEPP, apresentam diferenças consistentes. Isso mostrou que



houve um aumento significativo na resistência dos CPs, comprovando de forma favorável a influência do aumento do teor de substituição.

**Tabela 17 - Análise de variância (ANOVA) em relação às substituições.**

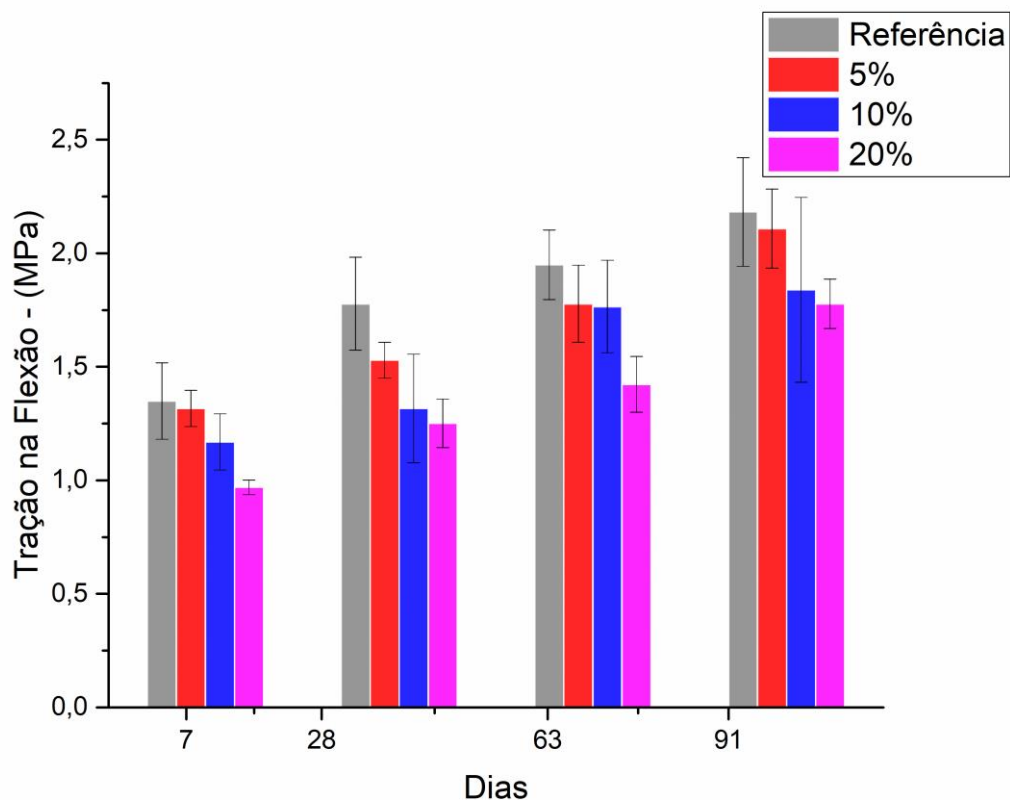
<b>Efeito da substituição nos 7 Dias</b>				
7 DIAS	REF	5%	10%	20%
REF	NS	0,001	0,000	0,000
5	0,001	NS	0,004	0,000
10	0,000	0,004	NS	0,000
20	0,000	0,000	0,000	NS
<b>Efeito da substituição nos 28 Dias</b>				
28 Dias	REF	5	10	20
REF	NS	0,001	0,000	0,000
5	0,001	NS	0,001	0,001
10	0,000	0,001	NS	0,002
20	0,000	0,001	0,002	NS
<b>Efeito da substituição nos 63 Dias</b>				
63 Dias	REF	5	10	20
REF	NS	0,000	0,002	0,025
5	0,000	NS	0,025	0,000
10	0,002	0,025	NS	0,000
20	0,025	0,000	0,000	NS
<b>Efeito da substituição nos 91 Dias</b>				
91 Dias	REF	5	10	20
REF	NS	0,001	0,001	0,000
5	0,001	NS	0,002	0,000
10	0,001	0,002	NS	0,000
20	0,000	0,000	0,000	NS

*NS: Não significativo.*

**Fonte -** Autor, (2021).

A Figura 27 mostra os resultados obtidos para tração na flexão para os três níveis de substituição do aglomerante.

**Figura 27** - Gráfico do resultado da tração da flexão (MPa).



Fonte - Autor, (2021).

Apesar da resistência à tração na flexão dos CPs com substituição ter sido menor que a dos CPs referência, o perfil de evolução de idade de ruptura mostra que as substituições apresentaram uma tendência geral de atingir valores estatisticamente equivalente aos da referência. Assim, a substituição do aglomerante pela IEPP em nível de 5% parece ter sido mais influenciada em termos cinéticos, pois na maior idade de ruptura (91 dias), a resistência à compressão e à flexão dos CPs com 5% de substituição foram equivalentes à da referência.

É notável que, quanto mais se adiciona o IEPP, menor a resistência à compressão. Já nos resultados de tração na flexão, as resistências encontradas, acompanharam de forma uniforme as resistências dos corpos de prova de referência, sem adição de IEPP. Como podemos verificar na figura 27, a tração da flexão com substituição e 20%, se encontra na mesma região do CP de referência aos 28 dias. Segundo (SHIROMA, 2016), para se obter ganho de resistência é necessário contar com a possibilidade da ocorrência das reações pozolânicas a longo prazo, ou seja, que a argamassa continue ganhando resistência com o tempo, o que, apesar de uma eventual cinética desfavorável em relação à condição referência, garantiria a qualidade da argamassa em termos de resistência. Já (CAMARINI; SOARES, 2018), que estudaram o material de isolador de porcelana moído (IPM), relataram que pelo fato IPM ter apresentado atividade pozolânica, há possibilidade de continuidade de reações com o aglomerante e as resistências poderiam aumentar em idades superiores aos 90 dias, porém ressalva que esse fato deve ser investigado em mais profundidade.

## 6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos para a substituição parcial do aglomerante (cimento Portland) por IEPP em diferentes níveis, foi possível avaliar a possibilidade de uso de até 5% de IEPP sem alterar significativamente as propriedades da argamassa estudada. Substituições mais elevadas, no entanto, não favoreceram o ganho de resistência ao longo do tempo analisado. As técnicas utilizadas para o monitoramento do estudo foram cruciais para a compreensão dos eventos relacionados à formação da argamassa. A análise granulométrica permitiu a classificação do agregado miúdo como fino, o que proporciona um maior empacotamento dos grãos e, conseqüentemente, favoreceu o aumento da resistência dos CPs de maneira geral. Por outro lado, o ensaio granulométrico do IEPP mostrou que o tamanho dos grãos foi diminuído por meio da moagem.

No que se refere a análise de fluorescência de raios X, o IEPP apresentou baixo teor de cálcio, o que pode ter sido uma das principais razões para o perfil de resistência, em geral, inferior àquele apresentado pelos CPs referência.

A difratometria de raios X do IEPP mostrou a presença de halo amorfo, que é um forte indicativo de reatividade do material com a mistura cimentícia, e a presença dos minerais quartzo, gesso, calcita e portlandita. Além disso, a difratometria de raios X indicou a presença de etringita, mineral que pode ser associado à diminuição da resistência da argamassa se formada tardiamente, no entanto, as intensidades relativas dos picos de difração da etringita e do quartzo, mineral majoritário, não permitiram concluir que houve diferença significativa entre a quantidade de etringita nos CPs referência e nos CPs com substituição. Nenhum CP apresentou perfil cristalográfico com halo amorfo,

sugerindo que o IEPP foi convertido em fase cristalina (quartzo) logo nos primeiros dias de cura, tendo isso ocorrido para os três níveis de substituição.

A microscopia eletrônica de varredura realizada no IEPP antes do peneiramento, mostrou alta variação de tamanho das partículas, desde aquelas superiores a 100 micra até outras que chegaram à quase 1 micra.

O método Chapelle modificado permitiu verificar a capacidade do IEPP de reagir com o hidróxido de cálcio para contribuir com a hidratação do cimento. O resultado obtido por esse método foi de 327 mg  $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ , ou seja, abaixo de 436 mg  $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ , o mínimo exigido pela norma brasileira. Esses resultados, abaixo do mínimo corroboram os resultados obtidos na resistência a compressão. No entanto, pela NBR 15895 (ABNT, 2010), o IAP foi de 668 mg  $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ , ou seja, acima do exigido, o que torna o material pozolânico, diferente do resultado obtido por meio da metodologia de cálculo proposta na literatura.

Mesmo assim, o índice de desempenho do material pozolânico com o cimento Portland aos 28 dias foi favorável para as substituições nas proporções de 5 e 10%, estando acima de 75% do valor referência, conforme requer a NBR 12653 (ABNT, 2014), indicando que o IEPP, apesar do baixo índice de atividade pozolânica, pode ter favorecido a densificação da argamassa.

Em se tratando do índice de consistência da argamassa no estado fresco, obteve-se valores relativamente esperados, onde o traço de referência foi de 225 e com a substituição de 20% foi de 187. Isso ocorreu pois manteve-se o consumo de água no traço utilizado.

Com base nas resistências encontradas, de maneira geral, que quando se aumenta o percentual de substituição as resistências diminuem, sendo assim, o melhor resultado foi com 5%, mesmo assim, considerando os resultados tratados

estatisticamente, pode-se afirmar que 5% de substituição causa mudanças significativas nos CPs produzidos.

Com base nos resultados obtidos, é possível empenhar-se para que seja realizado ou intensificado, a substituição do cimento Portland pela mistura de IEPP, que seguramente contribuiria para os aspectos ambientais de forma significativa.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEDIN, A.; JAHIRUDDIN, M. **Waste generation and management in Bangladesh: An overview**. Asian Journal of Medical and Biological Research, v. 1, n. 1, p. 114–120, 2015.
- ABRÃO, P. C. R. A.; CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M. **Efficiency of Portland-pozzolana cements: Water demand, chemical reactivity and environmental impact**. Construction and Building Materials, v. 247, 2020.
- AGUIAR, J.; CAMARÕES, A.; FANGUEIRO, R.; EIRES, R.; CUNHA, S.; M. KHERADMAND. **Materiais de Construção Sustentáveis**. Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, v. 1, p. 1–828, 2014.
- AITCIN, P. C. **Portland cement**. 3<sup>o</sup> ed. Canada: Elsevier Ltd, 2016.
- AKHTAR, A.; SARMAH, A. K. **Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective**. Journal of Cleaner Production, v. 186, p. 262–281, 2018.
- AKWILAPO, L. D.; WIİK, K. Ceramic properties of Pugu kaolin clays. Part 2: Effect of phase composition on flexural strength. **Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia**, v. 18, n. 1, p. 7–16, 2004.
- AMMENBERG, J.; LEENARD, B.; MATS, E.; ANTON, H. MARSHALL, R. **Improving the CO2 performance of cement, part III: The relevance of industrial symbiosis and how to measure its impact**. Journal of Cleaner Production, v. 98, p. 145–155, 2015.
- ANCORA 2019. Disponível em <<https://ancoraindustrial.com.br/isoladores-rede-eletrica#group1-4>> Acesso 24 de abril de 2019.
- ANDRADE, D. D. S. Microestrutura De Pastas De Cimento Portland Com Nanossílica Coloidal E Adições Minerais Altamente Reativas Daniel. **Materials**, v. 50, n. 61, p. 1–7, 2017.
- ANEEL. ANEEL - AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **ANEEL - AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA**, p. 1131–1141, 2019.
- ANTONIO, M.; ANTONIO, V. Utilização de agregados alternativos de isoladores elétricos de porcelana em concretos. 2015.
- ARTIOLI, G.; BULLARD, J. W. Cement hydration: The role of adsorption and crystal growth. **Crystal Research and Technology**, v. 48, n. 10, p. 903–918, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248 – **Agregados Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5752 – **Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211 – **Agregados para concreto** - Especificação. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7214 – **Areia normal para ensaio de cimento**. Rio de Janeiro, 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653 – **Materiais pozolânicos** - Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13276 – **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos**. Rio de Janeiro, 2005.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15895 – **Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado**. Rio de Janeiro, 2018.

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

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

BANIK, W.; PADOVANI, F. **Índia em transformação: o novo crescimento econômico e as perspectivas pós-crisis**. Scielo Brasil, p. 12 junho 2014.

BEZERRA, A. A. S. dos S.; BARBOSA, A. A. C. D.; BARBOSA, A. A. C. D.; VELOSO A. A.; SANTOS, L. P. Estudo de viabilidade da utilização do resíduo do pó de pedra como agregado miúdo em concreto. Campo Grande-MS, 2017.

BIROL, F. **CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion**. p. 1–165, 2019.

BISWAS, R. K. et al. **Study of short range structure of amorphous Silica from PDF using Ag radiation in laboratory XRD system, RAMAN and NEXAFS**. Journal of Non-Crystalline Solids, v. 488, n. February, p. 1–9, 2018.

BLENGINI, G. A.; GARBARINO, E. **Resources and waste management in Turin (Italy): The role of recycled aggregates in the sustainable supply mix**. Journal of Cleaner Production, v. 18, n. 10–11, p. 1021–1030, 2010.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. **Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil**.



Ceramica, v. 61, n. 358, p. 178–189, 2015.

CAMARINI, G.; SOARES, M. DA S. **Propriedades de argamassas de cimento produzidas com resíduo de isolador de porcelana**. Revista Materia, v. 23, n. 1, 2018.

CAMPOS, M. A. **Estudo do reaproveitamento de isoladores elétricos de porcelana como agregados em argamassas e concretos**. 2009. P. 166. Dissertação mestrado - Unicamp, Campinas.

CARDENAS, H.; KUPWADE-PATIL, K.; EKLUND, S. Recovery from Sulfate Attack in Concrete via Electrokinetic Nanoparticle Treatment. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 23, n. 7, p. 1103–1112, 2011.

CARVALHO, J. O. Cimento no Brasil. **O mundo do cimento**, Sindicato Nacional da Industria do Cimento. 2013.

CEMENT CONCRETE & AGGREGATES AUSTRALIA. **Use of Recycled Aggregates in Construction**. n. May, p. 25, 2008. Disponível em: <[https://www.ccaa.com.au/imis\\_prod/documents/Library%20Documents/CCAA%20Reports/RecycledAggregates.pdf](https://www.ccaa.com.au/imis_prod/documents/Library%20Documents/CCAA%20Reports/RecycledAggregates.pdf)> Acesso em maio de 2021.

CHRISTÓFOLLI, J. L. **Estudo de Argilas Calcinadas para Produção de Cimento Portland Pozolânico na Região de Curitiba**. Tese de mestrado, UTFPR . Curitiba, Paraná - Brasil. p. 153, 2010.

COELHO, A.; DE BRITO, J. Influence of construction and demolition waste management on the environmental impact of buildings. **Waste Management**, v. 32, n. 3, p. 532–541, 2012.

CONTRERAS, M.; TEIXEIRA, S. R.; LUCAS, M. C.; CARDOSO, D. S. L.; DA SILVA, G. A. C.; GREGÓRIO, G. C.; DE SOUZA, A. E.; DOS SANTOS, A. **Recycling of construction and demolition waste for producing new construction material** (Brazil case-study). Construction and Building Materials, v. 123, p. 594–600, 2016.

CORDEIRO, L. DE N.; MASUERO, A. B.; MOLIN, D. C. C. D.; SOUZA, P. S. L.; PAES, I. N. L. **Avaliação de processos de misturas de concretos com agregados graúdos reciclados**. Ambiente Construído, v. 17, n. 3, p. 255–265, 2017.

COSTA, C.; Carvalho, P.; Bordado, J.; Nunes, A. **Estudo de Argamassas de Base Cimentícia por Microscopia Electrónica de Varrimento**. Ciência & Tecnologia dos Materiais, v. 21, n. 3–4, p. 31–35, 2009.

COUTO, T. A. **Reação Álcali-Agregado: Estudo do Fenômeno em Rochas Silicosas**. Tese de mestrado, UFG, 2008. p 191. Goiânia, Goiás. .

ČUČEK, L.; KLEMEŠ, J. J.; KRAVANJA, Z. **Carbon and nitrogen trade-offs in biomass energy production**. Clean Technologies and Environmental Policy, v. 14, n. 3, p. 389–397, 2012a.

ČUČEK, L.; KLEMEŠ, J. J.; KRAVANJA, Z. **A review of footprint analysis tools for monitoring impacts on sustainability.** Journal of Cleaner Production, v. 34, p. 9–20, 2012b.

DE MOURA, A. A.; Effting, L.; Cabaial, G. G. A.; Tarley, C. R. T.; Gracioli, A.; Bail, A. **The influence of calcium-rich environments in siliceous industrial residues on the hydration reaction of cementitious mixtures.** Journal of Cleaner Production, v. 225, p. 152–162, 2019.

DE OLIVEIRA, M. P.; BARBOSA, N. P. **Potentialities of a calcined kaolin as material of partial replacement of portland cement in mortars.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 10, n. 2, p. 490–496, 2006.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: Aplicações e preparação de amostras.** Porto Alegre: Edipucrs, 2007.

DI MARIA, A.; EYCKMANS, J.; VAN ACKER, K. **Downcycling versus recycling of construction and demolition waste: Combining LCA and LCC to support sustainable policy making.** Waste Management, v. 75, p. 3–21, 2018.

DING, T.; XIAO, J. **Estimation of building-related construction and demolition waste in Shanghai.** Waste Management, v. 34, n. 11, p. 2327–2334, 2014.

DOS SANTOS, R. F. C.; DE CASTRO, A. L.; GONÇALVES, K. M. **Production of self-compacting concrete incorporated with red clay industry waste.** Revista Materia, v. 23, n. 3, 2018.

DU, H.; TAN, K. H. **Use of waste glass as sand in mortar: Part II - Alkali-silica reaction and mitigation methods.** Cement and Concrete Composites, v. 35, n. 1, p. 118–126, 2013.

ELETROBRAS 2018. Disponível em <<https://www.fecomercioal.com.br/2018/04/eletrobras-informa-calendario-de-servicos-de-manutencao-da-rede-eletrica/>> Acesso em 25 de março de 2019.

EPA. **Advancing Sustainable Materials Management.** n. December, 2018.

EUROSTAT. **Eurostat - Data Explorer.** Disponível em: <https://ec.europa.eu/eurostat>. Acesso em 18 de março de 2021.

FATTA, D.; PAPADOPOULOS, A.; KOURMOUSSIS, F.; MENTZIS, A.; SGOUROU, E.; MOUSTAKAS, K.; LOIZIDOU, M.; SIOUTA, N.. **Estimation methods for the generation of construction and demolition waste in Greece.** Proceedings of the International Conference on Sustainable Waste Management and Recycling: Construction Demolition Waste, p. 25–34, 2004.

FRANK O. BRANNVOLL. **The role of cement in the 2050 Low Carbon Economy.** Disponível em: <https://www.recuperaresiduosencementeras.org/portfolio-items/the-role-of-cement-in-the-2050-low-carbon-economy/>. Acesso em 20 de abril de 2021.

FRY, M. **Cement, carbon dioxide, and the “necessity” narrative: A case study of Mexico**. *Geoforum*, v. 49, p. 127–138, 2013.

GÁLVEZ-MARTOS, J. L.; STYLES, D. SCHOUBENBERGER, H.; ZESHMAR-LAHL, B. **Construction and demolition waste best management practice in Europe**. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 136, p. 166–178, 2018.

GARCIA, E.; CABRAL JUNIOR, M.; QUARCIONI, V. A.; CHOTOLI, F. F. **Avaliação da atividade pozolânica dos resíduos de cerâmica vermelha produzidos nos principais polos ceramistas do Estado de S. Paulo**. *Ceramica*, v. 61, n. 358, p. 251–258, 2015.

GARSIDE, M. **Principais países da produção global de cimento em 2020 | Statista**. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/267364/world-cement-production-by-country/>>. Acesso em: 3 jul. 2021.

GONDAL, M. A.; SIDDIQUI, M. N. **Identification of different kinds of plastics using laser-induced breakdown spectroscopy for waste management**. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, v. 42, n. 13, p. 1989–1997, 2007.

HOSSAIN, M. U.; WU, Z.; POON, C. S. **Comparative environmental evaluation of construction waste management through different waste sorting systems in Hong Kong**. *Waste Management*, v. 69, p. 325–335, 2017.

HSIAO, T. Y.; HUANG, Y. Y.; YU, Y. H.; WERNICK, I. K. **Modeling materials flow of waste concrete from construction and demolition wastes in Taiwan**. *Resources Policy*, v. 28, n. 1–2, p. 39–47, 2002.

HUANG, R. Y.; YE, L. H.; CHEN, H. H.; LIN, J. D.; CHEN, P. F.; SUNG, P. H.; YAU, J. T. **Estimation of construction waste generation and management in Taiwan**. *Advanced Materials Research*, v. 243–249, p. 6292–6295, 2011.

HWANG, Y. C.; KIM, D. H.; HWANG, I. N.; SONG, S. J.; PARK, Y. J.; KOH, J. T.; SON, H. H.; OH, W. M. **Chemical constitution, physical properties, and biocompatibility of experimentally manufactured portland cement**. *Journal of Endodontics*, v. 37, n. 1, p. 58–62, 2011.

IAN. **Sand mining ban in Maharashtra threatens mega projects | Maharashtra News | Zee News**. Disponível em: <[https://zeenews.india.com/news/maharashtra/sand-mining-ban-in-maharashtra-threatens-mega-projects\\_659907.html](https://zeenews.india.com/news/maharashtra/sand-mining-ban-in-maharashtra-threatens-mega-projects_659907.html)> Acesso em 25 de março de 2021.

INOUE, M.; HIRASAWA, I. The relationship between crystal morphology and XRD peak intensity on CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O. *Journal of Crystal Growth*, v. 380, p. 169–175, 2013.

INPE. **Plano de dados abertos**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://ckan.sig.cm-agueda.pt/>> Acesso em 25 de março de 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion**. IEA Publications, p. 1–165, 2019.

IPCC. **Contribuição do Grupo de Trabalho II para o Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas (IPCC).** Disponível em: <  
[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar5\\_wg2\\_spmport-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar5_wg2_spmport-1.pdf)>  
Acesso em 25 de março de 2021.

IQBAL, Y. **On the Glassy Phase in Tri-Axial Porcelain Bodies.** J pak Mater Soc, v. 2, n. 2, p. 62–71, 2008.

JENNINGS, H. **The Colloid / Nanogranular Nature of Cement.** In: Nanotechnology in Construction 32. 3. ed. 9. p. 27–36.

KOFOWOROLA, O. F.; GHEEWALA, S. H. **Estimation of construction waste generation and management in Thailand.** Waste Management, v. 29, n. 2, p. 731–738, 2009.

KOULOURIS, A.; LIMBACHIYA, M. C.; FRIED, A. N.; ROBERTS, J. J. Use of recycled aggregate in concrete application: Case studies. **Proceedings of the International Conference on Sustainable Waste Management and Recycling: Construction Demolition Waste**, p. 245–257, 2004.

LAWRENCE, P.; CYR, M.; RINGOT, E. **Mineral admixtures in mortars: Effect of inert materials on short-term hydration.** Cement and Concrete Research, v. 33, n. 12, p. 1939–1947, 2003.

LEGG, D.; LEVESON-GOWER, H.; ZOBOLI, R.; HERCZEG, M.; BAHN-WALKOWIAK, B.; BLEISCHWITZ, R. MAZZANTI, M.; SKOVGAARD, M.; DIGE, G. **Effectiveness of environmental taxes and charges for managing sand, gravel and rock extraction in selected EU countries.** Disponível em: <  
[https://www.eea.europa.eu/publications/eea\\_report\\_2008\\_2/](https://www.eea.europa.eu/publications/eea_report_2008_2/)> Acesso em 13 de março de 2021.

LI, Y.; ZHANG, X.; DING, G.; FENG, Z. **Developing a quantitative construction waste estimation model for building construction projects.** Resources, Conservation and Recycling, v. 106, n. October 2017, p. 9–20, 2016.

LI, Y.; ZHANG, X. **Web-based construction waste estimation system for building construction projects.** Automation in Construction, v. 35, p. 142–156, 2013.

LIU, X.; XU, W.; PAN, Y.; DU, E. **Suspect that Zhu et al. (2015) may have underestimated dissolved organic nitrogen (N) but overestimated total particulate N in wet deposition in China.** Science of the Total Environment, v. 520, p. 300–301, 2015.

LU, W.; WEBSTER, C.; PENG, Y.; CHEN, X.; ZHANG, X. **Estimating and calibrating the amount of building-related construction and demolition waste in urban China.** International Journal of Construction Management, v. 17, n. 1, p. 13–24, 2017.

MACIEL, M. H.; SOARES, G. S.; ROMANO, R. C. DE O.; CINCOTTO, M. A. **Monitoring of Portland cement chemical reaction and quantification of the**

**hydrated products by XRD and TG in function of the stoppage hydration technique.** Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, v. 136, n. 3, p. 1269–1284, 2019.

MAH, C. M.; FUJIWARA, T.; HO, C. S. **Construction and demolition waste generation rates for high-rise buildings in Malaysia.** Waste Management and Research, v. 34, n. 12, p. 1224–1230, 2016.

MANTOVANI, V. A.; FRANCO, C. S.; MANCINI, S. D.; HASEGAWA, H. L.; GIANELLI, B. F.; RODRIGUES, L. L. **Comparison of polymers and ceramics in new and discarded electrical insulators: Reuse and recycling possibilities.** Revista Materia, v. 18, n. 4, p. 1549–1562, 2013.

MEDEIROS, M. H. F. DE; HOPPE FILHO, J.; GOBBI, A.; PEREIRA, E. **High reactivity pozzolan: a critical evaluation of Pozzolanic Activity Index (PAI) with lime using X-Ray Diffraction.** Ambiente Construído, v. 15, n. 3, p. 19–29, 2015.

MEHTA, P. K. **Greening of the Concrete Industry for Sustainable Development.** Concrete International, v. 24, n. 7, p. 23–28, 2002.

MERGA, A.; MURTHY, H. C. A.; AMARE, E.; AHMED, K.; BEKELE, E. **Fabrication of electrical porcelain insulator from ceramic raw materials of Oromia region, Ethiopia.** Heliyon, v. 5, n. 8, p. e02327, 2019.

MINERAL COMMODITY SUMMARIES. **O Mundo do CIMENTO em 2017.** Disponível em: <<https://cimento.org/o-mundo-do-cimento-2016-e-2017/>>. Acesso em: 3 jul. 2021.

MIRHOSSEINI, S. R.; FADAEI, M.; TABATABAEI, R.; FADAEI, M. J. **Mechanical properties of concrete with Sarcheshmeh mineral complex copper slag as a part of cementitious materials.** Construction and Building Materials, v. 134, p. 44–49, 2017.

MORENO, M. M. T. **Argilas: composição mineralógica, distribuição granulométrica e consistência de pastas.** p. 125 f. : il., fots.gráfs., 2012.

MOTHÉ, L. P. **Avaliação das condições ideais para a produção de metacaulinita através da análise da sua atividade pozolânica.** p. 86, 2004.

MOURA, W. A.; GONÇALVES, J. P.; LIMA, M. B. L. **Copper slag waste as a supplementary cementing material to concrete.** Journal of Materials Science, v. 42, n. 7, p. 2226–2230, 2007.

OLIVEIRA, L. A. P. DE. **Mechanical and Durability Properties of Concrete with Ground Waste Glass Sand.** Istanbul, Turkey. Maio de 2008.

OLIVIER, J. J.; MAENHOUT, G. J.; MUNTEAN, M.; PETERS, J. A. H. W. **Trends in global CO<sub>2</sub> emissions: 2014 Report.** p 227-238. v. 217

PADILLA, M.; OLOFSSON, P.; STEHMAN, S. V.; TANSEY, K.; CHUVIECO, E. **Stratification and sample allocation for reference burned area data.** Remote

Sensing of Environment, v. 203, p. 240–255, 2017.

PEREIRA, E. **Avaliação Do Efeito Combinado Da Reação Álcali- Agregado (Raa) E Ataque Interno Por Sulfatos ( Isa ) Sobre As Resistências Mecânicas E Microestrutura Evaluation of the Combined Effect of the Alkali-Aggregated Reaction ( Aar ) and Internal Sulphate Atta.** Revista Técnico-científica do Crea-PR. p. 1–20, 2018.

RAYMOND, C. L.; HEALEY, S.; PEDUZZI, A.; PATTERSON, P. **Representative regional models of post-disturbance forest carbon accumulation: Integrating inventory data and a growth and yield model.** Forest Ecology and Management, v. 336, p. 21–34, 2015.

ROGÉRIO CAMPOS RAMOS. **Estudo de isolamento acústico de materiais aplicados no revestimento de paredes de alvenaria.** Anápolis, Goiás. Unievangélica, 2017.

ROMANO, R. C. O.; FUJII, A. L.; SOUZA, R. B.; TAKEASHI, M. S.; PILEGGI, R. G.; CINCOTTO, M. A. **Acompanhamento da hidratação de cimento Portland simples com resíduo de bauxita.** Ceramica, v. 62, n. 363, p. 215–223, 2016.

ROSA, Á. L. R. DA. **Materiais elétricos** . Foz do Iguaçu, Paraná. Unioeste, 2010.

ROY, A.; MOELDERS, N.; SCHILLING, P. J.; SEALS, R. K. **Role of an Amorphous Silica in Portland Cement Concrete.** Journal of Materials in Civil Engineering, v. 18, n. 6, p. 747–753, 2006.

SABHA, R. **60 cities generate over 15,000 tonnes of plastic waste per day - Times of India.** Disponível em <<https://www.outlookindia.com/newswire/story/60-cities-generate-over-15k-tonnes-of-plastic-waste-per-day-rs-told/894507>> Acesso em maio de 2021.

SENEFF, L. M. V. F. D. H. **Hidratação do Cimento CP V ARI - RS.** Influência da água nas reações de hidratação. Anais, 49º Congresso Brasileiro de Cerâmica. 2005. São Pedro, SP.

SHIROMA, L. **Atividade pozolânica de resíduos de isoladores de porcelana em matrizes cimentícias.** Tese Doutorado, Unicamp. Campinas, SP. p. 139, 2016.

SIDDIQUE, R. **Ground Granulated Blast Furnace Slag.** Concrete Journal, v. 52, n. 5, p. 387–392, 2014.

SILVA, A. R.; CABRAL, K. C.; PINTO, E. N. DE M. G. **Substituição Parcial Do Cimento Portland Por Resíduo De Cerâmica Vermelha Em Argamassas: Estudo Da Atividade Pozolânica.** 22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, n. 2009, p. 1144–1154, 2016.

SUN, T.; GE, K.; WANG, G.; GENG, H.; SHUI, Z.; CHENG, S.; CHEN, M. **Comparing pozzolanic activity from thermal-activated water-washed and coal-series kaolin in Portland cement mortar.** Construction and Building Materials, Elsevier. 12 p. 2019.

STARLING ASSAD DE AVILA, S. R.; AVILA, M.; BERNARDI, J. V. E.; COUTO JÚNIOR, A. F. **Estudo exploratório sobre dinâmica do desmatamento em assentamentos localizados no território portal da Amazônia.** Retratos de Assentamentos, v. 22, n. 1, p. 139, 2019.

TAVARES, L. R. C.; TAVARES, J. F.; COSTA, L. M.; BEZERRA, A. C. DA SILVA.; CETLIN, P. R.; AGUILAR, M. T. P. **Influence of quartz powder and silica fume on the performance of Portland cement.** Scientific reports, 13 p. 2020.

TECNOGERA 2019. Disponível em <<https://www.tecnogera.com.br/?s=subesta%C3%A7%C3%A3o>> Acesso 15 de abril de 2019.

UFU. **Laboratório Multiusuário de Microscopia Eletrônica de Varredura | FEQ.** Disponível em: <<http://www.feq.ufu.br/unidades/laboratorio/laboratorio-multiusuario-de-microscopia-eletronica-de-varredura>>. Acesso em: 11 jul. 2021.

VALDERRAMA, C.; GRANADOS, R.; CORTINA, J. L.; GASOL, C. M.; GUILLEM, M.; JOSA, A. **Implementation of best available techniques in cement manufacturing: A life-cycle assessment study.** Journal of Cleaner Production, v. 25, p. 60–67, 2012.

VAN OSS, H. G.; PADOVANI, A. C. **Cement Manufacture and the Environment Part II: Environmental Challenges and Opportunities** **Keywords alternative fuels carbon dioxide clinker greenhouse gases (GHG) industrial symbiosis portland cement.** State of the debate. v. 7, n. 1, p. 93–126, 2003.

VILLORIA SÁEZ, P.; DEL RÍO MERINO, M.; PORRAS-AMORES, C. **Estimation of construction and demolition waste volume generation in new residential buildings in Spain.** Waste Management and Research, v. 30, n. 2, p. 137–146, 2012.

WANG, J. Y.; TOURAN, A.; CHRISTOFOROU, C.; FADLALLA, H. **A systems analysis tool for construction and demolition wastes management.** Waste Management, v. 24, n. 10, p. 989–997, 2004.

WHITBURN, S.; VAN DAMME, M.; KAISER, J. W.; VAN DER WERF, G. R.; TURQUETY, S.; HURTMANS, D.; CLARISSE, L.; CLERBAUX, C.; COHEUR, P. F. **Ammonia emissions in tropical biomass burning regions: Comparison between satellite-derived emissions and bottom-up fire inventories.** Atmospheric Environment, v. 121, p. 42–54, 2015.

WILBURN, F. **Handbook of Thermal Analysis of Construction Materials.** 2002, 702 pp., Ottawa, Ontario, Canadá. Hardcover, v. 406.

WU, H.; WANG, J.; DUAN, H.; OUYANG, L.; HUANG, W.; ZUO, J. **An innovative approach to managing demolition waste via GIS (geographic information system): A case study in Shenzhen city, China.** Elsevier Ltd, 2016. v. 112

YAYA, A; E. K. Tiburu; M. E. Vickers; J. K. Efavi; O. A. Boateng; K. M. Knowles.

et al. **Characterisation and identification of local kaolin clay from Ghana: A potential material for electroporcelain insulator fabrication.** *Applied Clay Science*, v. 150, n. March, p. 125–130, 2017.

YOST, P. A.; HALSTEAD, J. M. **A Methodology for Quantifying the Volume of Construction Waste.** *Waste Management & Research*, v. 14, n. 5, p. 453–461, 1996.

ZHENG, L.; WU, H.; ZHANG, H.; DUAN, H.; WANG, J.; JIANG, W.; DONG, B.; LIU, G.; ZUO, J.; SONG, Q. **Characterizing the generation and flows of construction and demolition waste in China.** *Construction and Building Materials*, v. 136, p. 405–413, 2017.

ZUO, R. F.; DU, G. X.; YANG, W. G.; LIAO, L. B.; LI, Z. **Mineralogical and chemical characteristics of a powder and purified quartz from Yunnan Province.** *Open Geosciences*, v. 8, n. 1, p. 606–611, 2016.



## 8 APÊNDICES

Análise de variância ANOVA.

Ref	5%	Anova: fator único						
30,75435000	27,71325000							
30,54588750	27,38216250	RESUMO						
30,36195000		<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
29,88984375		Referência	4	121,552	30,38801	0,135993		
			5%	2	55,09541	27,54771	0,054809	
7 Dias								
		ANOVA						
		<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
		Entre grupos	10,75642	1	10,75642	92,97048	0,000647	7,708647
		Dentro dos grupos	0,462789	4	0,115697			
		Total	11,21921	5				

Ref	10%	Anova: fator único						
30,75435000	24,95418750							
30,54588750	25,02776250	RESUMO						
30,36195000		<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
29,88984375		Referência	4	121,552	30,38801	0,135993		
			10%	2	49,98195	24,99098	0,002707	
7 Dias								
		ANOVA						
		<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
		Entre grupos	38,83728	1	38,83728	378,2677	4,12E-05	7,708647
		Dentro dos grupos	0,410686	4	0,102671			
		Total	39,24797	5				

Ref	20%	Anova: fator único						
30,75435000	18,65126250							
30,54588750	18,45506250	RESUMO						
		Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
29,88984375	18,44280000	Referência	4	121,552	30,38801	0,135993		
		20%	4	74,66636	18,66659	0,099381		
7 Dias								
ANOVA								
		Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
		Entre grupos	274,7832	1	274,7832	2334,862	5,27E-09	5,987378
		Dentro dos grupos	0,706123	6	0,117687			
		Total	275,4894	7				

5%	10%	Anova: fator único						
27,71325000	24,95418750							
27,38216250	25,02776250	RESUMO						
		Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
		5%	2	55,09541	27,54771	0,054809		
		10%	2	49,98195	24,99098	0,002707		
7 Dias								
ANOVA								
		Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
		Entre grupos	6,536875	1	6,536875	227,3059	0,004371	18,51282
		Dentro dos grupos	0,057516	2	0,028758			
		Total	6,594391	3				

5%	20%	Anova: fator único						
27,71325000	18,65126250							
27,38216250	18,45506250	RESUMO						
		Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
	19,11723750	5%	2	55,09541	27,54771	0,054809		
	18,44280000	20%	4	74,66636	18,66659	0,099381		
7 Dias								
ANOVA								
		Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
		Entre grupos	105,1656	1	105,1656	1191,836	4,2E-06	7,708647
		Dentro dos grupos	0,352953	4	0,088238			
		Total	105,5186	5				

10%	20%	Anova: fator único						
24,95418750	18,65126250							
25,02776250	18,45506250	RESUMO						
	19,11723750	<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
	18,44280000		10%	2	49,98195	24,99098	0,002707	
			20%	4	74,66636	18,66659	0,099381	
7 Dias								
		ANOVA						
		<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
		Entre grupos	53,33045	1	53,33045	709,0623	1,18E-05	7,708647
		Dentro dos grupos	0,300851	4	0,075213			
		Total	53,6313	5				

Ref	5%	Anova: fator único						
38,11185000	33,91807500							
38,29578750	33,75866250	RESUMO						
		<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
		Referência		2	76,40764	38,20382	0,016917	
			5%	2	67,67674	33,83837	0,012706	
28 Dias								
		ANOVA						
		<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
		Entre grupos	19,05715	1	19,05715	1286,66	0,000776	18,51282
		Dentro dos grupos	0,029623	2	0,014811			
		Total	19,08678	3				

Ref	10%	Anova: fator único						
38,11185000	30,61946250							
38,29578750	30,71756250	RESUMO						
		<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
		Referência		2	76,40764	38,20382	0,016917	
			10%	2	61,33703	30,66851	0,004812	
28 Dias								
		ANOVA						
		<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
		Entre grupos	56,78084	1	56,78084	5226,439	0,000191	18,51282
		Dentro dos grupos	0,021728	2	0,010864			
		Total	56,80257	3				

Ref	20%	Anova: fator único						
38,11185000	25,91066250							
38,29578750	25,50600000	RESUMO						
		Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
28 Dias	Ref		2	76,40764	38,20382	0,016917		
		0,2	2	51,41666	25,70833	0,081876		
ANOVA								
		Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
		Entre grupos	156,1372	1	156,1372	3160,916	0,000316	18,51282
		Dentro dos grupos	0,098792	2	0,049396			
		Total	156,236	3				

5%	10%	Anova: fator único						
33,91807500	30,61946250							
33,75866250	30,71756250	RESUMO						
		Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
28 Dias	5%		2	67,67674	33,83837	0,012706		
	10%		2	61,33703	30,66851	0,004812		
ANOVA								
		Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
		Entre grupos	10,04799	1	10,04799	1147,163	0,000871	18,51282
		Dentro dos grupos	0,017518	2	0,008759			
		Total	10,06551	3				

5%	20%	Anova: fator único						
33,91807500	25,91066250							
33,75866250	25,50600000	RESUMO						
		Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
28 Dias	5%		2	67,67674	33,83837	0,012706		
	20%		2	51,41666	25,70833	0,081876		
ANOVA								
		Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
		Entre grupos	66,09751	1	66,09751	1397,676	0,000715	18,51282
		Dentro dos grupos	0,094582	2	0,047291			
		Total	66,19209	3				

10%	20%	Anova: fator único						
30,61946250	25,91066250							
30,71756250	25,50600000	RESUMO						
		Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
28 Dias		10%	2	61,33703	30,66851	0,004812		
		20%	2	51,41666	25,70833	0,081876		
ANOVA								
		Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
		Entre grupos	24,6034	1	24,6034	567,6331	0,001757	18,51282
		Dentro dos grupos	0,086688	2	0,043344			
		Total	24,69009	3				

Ref	5%	Anova: fator único						
37,11858750	34,56798750							
37,56003750	34,81323750	RESUMO						
36,87333750	34,77645000							
		Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
63 Dias		Referência	3	111,552	37,18399	0,121097		
		5%	3	104,1577	34,71923	0,017493		
ANOVA								
		Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
		Entre grupos	9,112581	1	9,112581	131,5042	0,00033	7,708647
		Dentro dos grupos	0,27718	4	0,069295			
		Total	9,389761	5				

Ref	10%	Anova: fator único						
37,11858750	33,93033750							
37,56003750	33,25590000	RESUMO						
36,87333750								
		Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
63 Dias		Referência	3	111,552	37,18399	0,121097		
		10%	2	67,18624	33,59312	0,227433		
ANOVA								
		Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
		Entre grupos	15,47321	1	15,47321	98,84356	0,002165	10,12796
		Dentro dos grupos	0,469627	3	0,156542			
		Total	15,94283	4				

Ref	20%	Anova: fator único					
37,11858750	25,73898750						
37,56003750	25,11360000	RESUMO					
36,87333750	25,45695000	<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>	
	25,15038750	Referência	3	111,552	37,18399	0,121097	
		20%	4	101,4599	25,36498	0,085861	
63 Dias		ANOVA					
		<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>
		Entre grupos	239,4667	1	239,4667	2395,74	6,73E-08
		Dentro dos grupos	0,499776	5	0,099955		6,607891
		Total	239,9665	6			

5%	10%	Anova: fator único					
34,56798750	33,93033750						
34,81323750	33,25590000	RESUMO					
34,77645000		<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>	
		5%	3	104,1577	34,71923	0,017493	
		10%	2	67,18624	33,59312	0,227433	
63 Dias		ANOVA					
		<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>
		Entre grupos	1,521738	1	1,521738	17,39668	0,025089
		Dentro dos grupos	0,262419	3	0,087473		10,12796
		Total	1,784157	4			

5%	20%	Anova: fator único					
34,56798750	25,73898750						
34,81323750	25,11360000	RESUMO					
34,77645000	25,45695000	<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>	
	25,15038750	0,05	3	104,1577	34,71923	0,017493	
		0,2	4	101,4599	25,36498	0,085861	
63 Dias		ANOVA					
		<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>
		Entre grupos	150,0032	1	150,0032	2563,564	5,68E-08
		Dentro dos grupos	0,292568	5	0,058514		6,607891
		Total	150,2958	6			

10%	20%	Anova: fator único						
33,93033750	25,73898750							
33,25590000	25,11360000	RESUMO						
	25,45695000	<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
	25,15038750		0,1	2 67,18624	33,59312	0,227433		
			0,2	4 101,4599	25,36498	0,085861		
63 Dias								
ANOVA								
		<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
		Entre grupos	90,26966	1	90,26966	744,4692	1,07E-05	7,708647
		Dentro dos grupos	0,485015	4	0,121254			
		Total	90,75468	5				

Ref	5%	Anova: fator único						
41,04258750	37,89112500							
41,38593750	38,06280000	RESUMO						
	37,43741250	<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
		Referência		2 82,42853	41,21426	0,058945		
			5%	3 113,3913	37,79711	0,104406		
91 Dias								
ANOVA								
		<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
		Entre grupos	14,0123	1	14,0123	156,9965	0,001096	10,12796
		Dentro dos grupos	0,267757	3	0,089252			
		Total	14,28005	4				

Ref	10%	Anova: fator único						
41,04258750	35,29147500							
41,38593750	34,97878125	RESUMO						
		<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
		Referência		2 82,42853	41,21426	0,058945		
			10%	2 70,27026	35,13513	0,048889		
91 Dias								
ANOVA								
		<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
		Entre grupos	36,95587	1	36,95587	685,426	0,001456	18,51282
		Dentro dos grupos	0,107833	2	0,053917			
		Total	37,06371	3				

Ref	20%	Anova: fator único					
41,04258750	30,66851250						
41,38593750	30,38647500	RESUMO					
	30,79113750	<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>	
91 Dias		Referência		2 82,42853	41,21426	0,058945	
		20%		3 91,84613	30,61538	0,043056	
ANOVA							
		<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i> <i>F crítico</i>
		Entre grupos	134,8037	1	134,8037	2787,968	1,5E-05 10,12796
		Dentro dos grupos	0,145056	3	0,048352		
		Total	134,9488	4			

5%	10%	Anova: fator único					
37,89112500	35,29147500						
38,06280000	34,97878125	RESUMO					
37,43741250		<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>	
91 Dias		5%		3 113,3913	37,79711	0,104406	
		10%		2 70,27026	35,13513	0,048889	
ANOVA							
		<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i> <i>F crítico</i>
		Entre grupos	8,503393	1	8,503393	98,99139	0,00216 10,12796
		Dentro dos grupos	0,257701	3	0,0859		
		Total	8,761094	4			

5%	20%	Anova: fator único					
37,89112500	30,66851250						
38,06280000	30,38647500	RESUMO					
37,43741250	30,79113750	<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>	
91 Dias		5%		3 113,3913	37,79711	0,104406	
		20%		3 91,84613	30,61538	0,043056	
ANOVA							
		<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i> <i>F crítico</i>
		Entre grupos	77,36603	1	77,36603	1049,303	5,41E-06 7,708647
		Dentro dos grupos	0,294924	4	0,073731		
		Total	77,66095	5			



10%	20%	Anova: fator único						
35,29147500	30,66851250							
34,97878125	30,38647500	RESUMO						
	30,79113750	<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
		10%	2	70,27026	35,13513	0,048889		
		20%	3	91,84613	30,61538	0,043056		
91 Dias								
		ANOVA						
		<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
		Entre grupos	24,5138	1	24,5138	544,7514	0,000172	10,12796
		Dentro dos grupos	0,135	3	0,045			
		Total	24,6488	4				

7 Dias	28 Dias	Anova: fator único						
30,75435000	38,11185000							
30,54588750	38,29578750	RESUMO						
30,36195000		<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
29,88984375		7 Dias	4	121,552	30,38801	0,135993		
		28 Dias	2	76,40764	38,20382	0,016917		
Referência								
		ANOVA						
		<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
		Entre grupos	81,4492	1	81,4492	766,7692	1,01E-05	7,708647
		Dentro dos grupos	0,424896	4	0,106224			
		Total	81,8741	5				

7 Dias	63 Dias	Anova: fator único						
30,75435000	37,11858750							
30,54588750	37,56003750	RESUMO						
30,36195000	36,87333750	<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
29,88984375		7 Dias	4	121,552	30,38801	0,135993		
		63 Dias	3	111,552	37,18399	0,121097		
Referência								
		ANOVA						
		<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
		Entre grupos	79,17487	1	79,17487	608,8752	2,04E-06	6,607891
		Dentro dos grupos	0,650173	5	0,130035			
		Total	79,82504	6				

7 Dias	91 Dias	Anova: fator único						
30,75435000	41,04258750							
30,54588750	41,38593750	RESUMO						
30,36195000		<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
29,88984375		7 Dias	4	121,552	30,38801	0,135993		
		91 Dias	2	82,42853	41,21426	0,058945		
Referência								
ANOVA								
		<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
		Entre grupos	156,2771	1	156,2771	1338,78	3,33E-06	7,708647
		Dentro dos grupos	0,466924	4	0,116731			
		Total	156,744	5				

28 Dias	63 Dias	Anova: fator único						
38,11185000	37,11858750							
38,29578750	37,56003750	RESUMO						
36,87333750		<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
		28 Dias	2	76,40764	38,20382	0,016917		
		63 Dias	3	111,552	37,18399	0,121097		
Referência								
ANOVA								
		<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
		Entre grupos	1,248067	1	1,248067	14,4502	0,031975	10,12796
		Dentro dos grupos	0,259111	3	0,08637			
		Total	1,507178	4				

28 Dias	91 Dias	Anova: fator único						
38,11185000	41,04258750							
38,29578750	41,38593750	RESUMO						
		<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
		28 Dias	2	76,40764	38,20382	0,016917		
		91 Dias	2	82,42853	41,21426	0,058945		
Referência								
ANOVA								
		<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
		Entre grupos	9,062772	1	9,062772	238,9306	0,004159	18,51282
		Dentro dos grupos	0,075861	2	0,037931			
		Total	9,138633	3				

63 Dias	91 Dias	Anova: fator único					
37,11858750	41,04258750						
37,56003750	41,38593750	RESUMO					
36,87333750		<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>	
		63 Dias	3	111,552	37,18399	0,121097	
		91 Dias	2	82,42853	41,21426	0,058945	
Referência		ANOVA					
		<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>
		Entre grupos	19,49174	1	19,49174	194,1803	0,0008
		Dentro dos grupos	0,301139	3	0,10038		
		Total	19,79288	4			

7 Dias	28 Dias	Anova: fator único					
27,71325000	33,91807500						
27,38216250	33,75866250	RESUMO					
		<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>	
		7 Dias	2	55,09541	27,54771	0,054809	
		28 Dias	2	67,67674	33,83837	0,012706	
5%		ANOVA					
		<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>
		Entre grupos	39,57243	1	39,57243	1172,245	0,000852
		Dentro dos grupos	0,067516	2	0,033758		
		Total	39,63995	3			

7 Dias	63 Dias	Anova: fator único					
27,71325000	34,56798750						
27,38216250	34,81323750	RESUMO					
	34,77645000	<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>	
		7 Dias	2	55,09541	27,54771	0,054809	
		63 Dias	3	104,1577	34,71923	0,017493	
5%		ANOVA					
		<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>
		Entre grupos	61,71682	1	61,71682	2061,917	2,35E-05
		Dentro dos grupos	0,089795	3	0,029932		
		Total	61,80661	4			

7 Dias	91 Dias	Anova: fator único					
27,71325000	37,89112500						
27,38216250	38,06280000	RESUMO					
	37,43741250	<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>	
		7 Dias	2	55,09541	27,54771	0,054809	
		91 Dias	3	113,3913	37,79711	0,104406	
5%		ANOVA					
		<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>
		Entre grupos	126,0604	1	126,0604	1434,56	4,05E-05
		Dentro dos grupos	0,263622	3	0,087874		10,12796
		Total	126,324	4			

28 Dias	63 Dias	Anova: fator único					
33,91807500	34,56798750						
33,75866250	34,81323750	RESUMO					
	34,77645000	<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>	
		28 Dias	2	67,67674	33,83837	0,012706	
		63 Dias	3	104,1577	34,71923	0,017493	
5%		ANOVA					
		<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>
		Entre grupos	0,931089	1	0,931089	58,56889	0,004633
		Dentro dos grupos	0,047692	3	0,015897		10,12796
		Total	0,978781	4			

28 Dias	91 Dias	Anova: fator único					
33,91807500	37,89112500						
33,75866250	38,06280000	RESUMO					
	37,43741250	<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>	
		28 Dias	2	67,67674	33,83837	0,012706	
		91 Dias	3	113,3913	37,79711	0,104406	
5%		ANOVA					
		<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>
		Entre grupos	18,80598	1	18,80598	254,6873	0,000535
		Dentro dos grupos	0,221518	3	0,073839		10,12796
		Total	19,0275	4			

63 Dias	91 Dias	Anova: fator único					
34,56798750	37,89112500						
34,81323750	38,06280000	RESUMO					
34,77645000	37,43741250	Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância	
5%	63 Dias		3	104,1577	34,71923	0,017493	
	91 Dias		3	113,3913	37,79711	0,104406	
ANOVA							
Fonte da variação		SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos		14,21009	1	14,21009	233,1451	0,000107	7,708647
Dentro dos grupos		0,243798	4	0,06095			
Total		14,45389	5				

7 Dias	28 Dias	Anova: fator único					
24,95418750	30,61946250						
25,02776250	30,71756250	RESUMO					
	Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
10%	7 Dias	2	49,98195	24,99098	0,002707		
	28 Dias	2	61,33703	30,66851	0,004812		
ANOVA							
Fonte da variação		SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos		32,23443	1	32,23443	8574,76	0,000117	18,51282
Dentro dos grupos		0,007518	2	0,003759			
Total		32,24195	3				

7 Dias	63 Dias	Anova: fator único					
24,95418750	33,93033750						
25,02776250	33,25590000	RESUMO					
	Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
10%	7 Dias	2	49,98195	24,99098	0,002707		
	63 Dias	2	67,18624	33,59312	0,227433		
ANOVA							
Fonte da variação		SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos		73,99688	1	73,99688	643,0608	0,001551	18,51282
Dentro dos grupos		0,23014	2	0,11507			
Total		74,22702	3				

7 Dias	91 Dias	Anova: fator único						
24,95418750	35,29147500							
25,02776250	34,97878125	RESUMO						
		Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
10%		7 Dias	2	49,98195	24,99098	0,002707		
		91 Dias	2	70,27026	35,13513	0,048889		
		ANOVA						
		Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
		Entre grupos	102,9038	1	102,9038	3988,882	0,000251	18,51282
		Dentro dos grupos	0,051595	2	0,025798			
		Total	102,9554	3				

28 Dias	63 Dias	Anova: fator único						
30,61946250	33,93033750							
30,71756250	33,25590000	RESUMO						
		Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
10%		28 Dias	2	61,33703	30,66851	0,004812		
		63 Dias	2	67,18624	33,59312	0,227433		
		ANOVA						
		Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
		Entre grupos	8,553322	1	8,553322	73,65782	0,013306	18,51282
		Dentro dos grupos	0,232245	2	0,116122			
		Total	8,785566	3				

28 Dias	91 Dias	Anova: fator único						
30,61946250	35,29147500							
30,71756250	34,97878125	RESUMO						
		Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
10%		28 Dias	2	61,33703	30,66851	0,004812		
		91 Dias	2	70,27026	35,13513	0,048889		
		ANOVA						
		Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
		Entre grupos	19,95066	1	19,95066	743,0343	0,001343	18,51282
		Dentro dos grupos	0,0537	2	0,02685			
		Total	20,00436	3				

63 Dias	91 Dias	Anova: fator único						
33,93033750	35,29147500							
33,25590000	34,97878125	RESUMO						
		Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
10%		63 Dias	2	67,18624	33,59312	0,227433		
		91 Dias	2	70,27026	35,13513	0,048889		
		ANOVA						
		Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
		Entre grupos	2,377793	1	2,377793	17,21033	0,053486	18,51282
		Dentro dos grupos	0,276322	2	0,138161			
		Total	2,654115	3				

7 Dias	28 Dias	Anova: fator único						
18,65126250	25,91066250							
18,45506250	25,50600000	RESUMO						
19,11723750		Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
18,44280000		7 Dias	4	74,66636	18,66659	0,099381		
		28 Dias	2	51,41666	25,70833	0,081876		
20%								
	ANOVA							
		Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
		Entre grupos	66,11481	1	66,11481	695,9091	1,23E-05	7,708647
		Dentro dos grupos	0,38002	4	0,095005			
		Total	66,49483	5				

7 Dias	63 Dias	Anova: fator único						
18,65126250	25,73898750							
18,45506250	25,11360000	RESUMO						
19,11723750	25,45695000	Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
18,44280000	25,15038750	7 Dias	4	74,66636	18,66659	0,099381		
		63 Dias	4	101,4599	25,36498	0,085861		
20%								
	ANOVA							
		Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
		Entre grupos	89,73687	1	89,73687	968,8612	7,3E-08	5,987378
		Dentro dos grupos	0,555726	6	0,092621			
		Total	90,2926	7				

7 Dias	91 Dias	Anova: fator único					
18,65126250	30,66851250						
18,45506250	30,38647500	RESUMO					
19,11723750	30,79113750	<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>	
18,44280000		7 Dias	4	74,66636	18,66659	0,099381	
		91 Dias	3	91,84613	30,61538	0,043056	
20%		ANOVA					
		<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>
		Entre grupos	244,7545	1	244,7545	3184,791	3,3E-08
		Dentro dos grupos	0,384255	5	0,076851		6,607891
		Total	245,1387	6			

28 Dias	63 Dias	Anova: fator único					
25,91066250	25,73898750						
25,50600000	25,11360000	RESUMO					
	25,45695000	<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>	
	25,15038750	28 Dias	2	51,41666	25,70833	0,081876	
		63 Dias	4	101,4599	25,36498	0,085861	
20%		ANOVA					
		<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>
		Entre grupos	0,157186	1	0,157186	1,852196	0,245158
		Dentro dos grupos	0,339458	4	0,084864		7,708647
		Total	0,496643	5			

28 Dias	91 Dias	Anova: fator único					
25,91066250	30,66851250						
25,50600000	30,38647500	RESUMO					
	30,79113750	<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>	
		28 Dias	2	51,41666	25,70833	0,081876	
		91 Dias	3	91,84613	30,61538	0,043056	
20%		ANOVA					
		<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>
		Entre grupos	28,89489	1	28,89489	516,0198	0,000187
		Dentro dos grupos	0,167987	3	0,055996		10,12796
		Total	29,06288	4			



63 Dias	91 Dias	Anova: fator único						
25,73898750	30,66851250							
25,11360000	30,38647500	RESUMO						
25,45695000	30,79113750	<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
25,15038750		63 Dias	4	101,4599	25,36498	0,085861		
		91 Dias	3	91,84613	30,61538	0,043056		
20%								
		ANOVA						
		<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
		Entre grupos	47,25709	1	47,25709	687,4894	1,51E-06	6,607891
		Dentro dos grupos	0,343693	5	0,068739			
		Total	47,60078	6				