



**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS**



**WESLEY ROSSI PIMENTA**

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE CONCRETO COM INSERÇÃO  
DE RESÍDUOS DE ISOLADORES ELÉTRICOS**

**VOLTA REDONDA**

**2022**

**WESLEY ROSSI PIMENTA**

**PRODUÇÃO E CARATERIZAÇÃO DE CONCRETO COM INSERÇÃO  
DE RESÍDUOS DE ISOLADORES ELÉTRICOS**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Materiais do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, como requisito obrigatório para obtenção do título de Mestre em Materiais, na área de concentração de processamento e caracterização de materiais compósitos e linha de pesquisa em materiais cerâmicos.

Orientador: Prof. Dr. Cirlene Fourquet Bandeira

VOLTA REDONDA

2022

### **FICHA CATALOGRÁFICA**

Bibliotecária: Alice Tacão Wagner - CRB 7/RJ 4316

P644p Pimenta, Wesley Rossi

Produção e caracterização de concreto com inserção de resíduos de isoladores elétricos. / Wesley Rossi Pimenta. - Volta Redonda: UniFOA, 2022. 146 p. II

Orientador (a): Profa. Dra. Cirlene Fourquet Bandeira

Dissertação (Mestrado) – UniFOA / Mestrado Profissional em Materiais, 2022

1. Materiais - dissertação. 2. Reciclagem. 3. Ensaios mecânicos. 4. Agregado graúdo. I. Bandeira, Cirlene Fourquet. II. Centro Universitário de Volta Redonda. III. Título.

CDD – 620.1



FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS




**WESLEY ROSSI PIMENTA**

Produção e caracterização de concreto com inserção de resíduos de isoladores elétricos.

Orientador: Profª. Drª. Cirlene Fourquet Bandeira

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO  
TÍTULO DE  
"MESTRE EM MATERIAIS"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE MESTRADO  
PROFISSIONAL EM MATERIAIS

  
Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago  
Coordenador

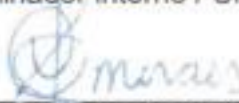
**BANCA EXAMINADORA:**

  
\_\_\_\_\_

Profª. Drª. Cirlene Fourquet Bandeira  
Presidente / UniFOA

  
\_\_\_\_\_

Prof. Dr. Sergio Roberto Montoro  
Examinador interno / UniFOA

  
\_\_\_\_\_

Profª. Drª. Elisângela de Jesus Candido Moraes  
Examinador externo / USP

Fevereiro de 2022.

## DEDICATÓRIA

Dedico à Deus, familiares e amigos!

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus pela vida e oportunidade que me foi concedida. Agradeço aos meus pais Edson Pimenta e Maria Luiza Rossi Pimenta por todo incentivo, motivação e o esforço investido na minha educação. Agradeço à família que sempre esteve ao meu lado durante o meu percurso acadêmico. Sou grato pela confiança depositada em mim pela Dr.<sup>a</sup> Cirlene Bandeira e Dr. Ricardo Cabral, e pela disponibilidade e orientação do meu trabalho. Obrigado por me manter motivado durante todo o processo.

Por último, quero agradecer também à UniFoa e todos os Mestres, Doutores e Técnicos pela disponibilidade e ensinamentos.

## EPÍGRAFE

O que sabemos é uma gota; o que ignoramos é um oceano.

Sir. Isaac Newton

PIMENTA, W, R. **PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE CONCRETOS COM INSERÇÃO DE RESÍDUOS DE ISOLADORES ELÉTRICOS**. 2022. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – Fundação Oswaldo Aranha, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2022.

## RESUMO

Os isoladores elétricos de porcelana, são componentes muito utilizados na indústria eletroeletrônica. No entanto, os mesmos geram um elevado passivo ambiental por seu descarte, na maioria das vezes, incorreto. Entretanto, estes resíduos podem ser reutilizados, especialmente no setor de construção civil em substituição dos agregados graúdos em concreto de forma a movimentar a economia de reciclagem, diminuindo os custos e seu descarte. Entretanto, a estética dos produtos finais deve ser levada em conta. Em decorrência disso, a utilização de Cimento Portland Branco vem ganhando espaço com abertura de novos horizontes no setor de engenharia. Sendo assim, o trabalho teve como objetivo realizar a inserção destes isoladores em substituição ao agregado graúdo nas proporções de 0% (referência); 12,5%; 25%; 50% em concreto a base de cimento branco estrutural e a verificação da performance dos mesmos. Com isso, pôde ser observado uma melhora nos resultados dos corpos de prova com máxima adição de isoladores de porcelana no ensaio de resistência a compressão simples, indicando 33,31% de melhora em relação ao concreto referência. Em contrapartida pôde ser observado uma perda de desempenho do índice de vazios e absorção de água dos mesmos. No entanto, todos os concretos se apresentaram com bom desempenho para determinadas aplicações, indicando que a inserção desse porcelanato no concreto, pode de fato melhorar suas características físicas, sendo uma alternativa para o cenário atual, onde a reciclagem é primordial.

**Palavras-chave:** Reciclagem; Ensaio mecânico; Agregado Graúdo; Passivo ambiental; Baixo custo.



PIMENTA, W, R. PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF CONCRETE WITH INSERTION OF WASTE FROM ELECTRICAL INSULATORS. 2022. Dissertation (Professional Master's in Materials) – Oswaldo Aranha Foundation, Volta Redonda University Center, Volta Redonda, 2022.

### **ABSTRACT**

Electrical porcelain insulators are widely used components in the electrical and electronics industry. However, it generates a high environmental liability due to its disposal, most of the time, incorrectly. However, these residues can be reused, especially in the civil construction sector, replacing the coarse aggregates in concrete in order to move the recycling economy, reducing costs and its disposal. However, the aesthetics of the final products must be taken into account. As a result, the use of White Portland Cement has been gaining ground with the opening of new horizons in the engineering sector. Therefore, the aim of this work was to insert these insulators to replace the coarse aggregate in the proportions of 0% (reference); 12.5%; 25%; 50% in concrete on the basis of structural white cement and verification of their performance. Thus, an improvement in the results of the specimens with maximum addition of porcelain insulators in the simple compression strength test could be observed, indicating a 33.31% improvement in relation to the reference concrete. On the other hand, a loss of void index performance and water absorption could be observed. However, all concretes presented good performance for certain applications, indicating that the insertion of this porcelain in the concrete can in fact improve its physical characteristics, being an alternative for the current scenario, where recycling is essential.

**Keywords:** Recycling; Mechanical tests; Large Aggregate; Environmental liability; Low cost.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Triângulo das composições das porcelanas.....	36
<b>Figura 2.</b> Fases presentes em isoladores elétricos de porcelana.....	47
<b>Figura 3.</b> Micrografia evidenciando os microconstituintes de uma porcelana C110 com ataque químico. ....	48
<b>Figura 4.</b> Micrografia evidenciando os microconstituintes de uma porcelana C120. ....	48
<b>Figura 5.</b> Micrografia evidenciando os microconstituintes de uma porcelana C130. ....	49
<b>Figura 6.</b> Resistência mecânica a compressão .....	51
<b>Figura 7.</b> Isoladores Elétricos de Porcelana em transporte .....	64
<b>Figura 8.</b> Brita utilizada na pesquisa.....	65
<b>Figura 9.</b> Areia utilizada na pesquisa.....	65
<b>Figura 10.</b> Cimento CPB utilizado na pesquisa .....	66
<b>Figura 12.</b> Corpos de prova desenvolvidos .....	70
<b>Figura 13.</b> Estufa Odontobrás modelo 1.5.....	71
<b>Figura 14.</b> Agitador de peneira SOLOTEST .....	71
<b>Figura 15.</b> Agulha de Le Chatelier .....	73
<b>Figura 16.</b> Aparelho de Vicat.....	74
<b>Figura 17.</b> Ensaio de Abatimento .....	75
<b>Figura 18.</b> Microscópio de varredura eletrônica, HITACHI, modelo TM 3000.....	75
<b>Figura 19.</b> Difratorômetro, SHIMADZU, modelo XRD-6100.....	76
<b>Figura 20.</b> Prensa EMIC para ensaio de compressão Uniaxial .....	77
<b>Figura 21.</b> Balança Welmy para pesagem dos CP's.....	78
<b>Figura 22.</b> Isoladores Elétricos de Porcelana triturados .....	81
<b>Figura 23.</b> Isoladores Elétricos de Porcelana separados.....	82
<b>Figura 24.</b> MEV Isolador Análise junção da face porosa e vitrificada. a) Ampliação de 25X. b) Ampliação de 100X. c) Ampliação de 200X. d) Ampliação de 500X. e) Ampliação de 1000X. f) Ampliação de 2000X. ....	85
<b>Figura 25.</b> Difratorograma do Isolador elétrico utilizada para confecção do concreto ..	86
<b>Figura 26.</b> MEV brita região de quebra. a) Ampliação de 25X. b) Ampliação de 100X. c) Ampliação de 200X. d) Ampliação de 500X. e) Ampliação de 1000X. f) Ampliação de 2000X.....	90
<b>Figura 27.</b> Difratorograma da Brita utilizada para confecção do concreto .....	91

<b>Figura 28.</b> MEV da areia. a) Ampliação de 25X. b) Ampliação de 100X. c) Ampliação de 200X. d) Ampliação de 500X. e) Ampliação de 1000X. f) Ampliação de 2000X...	94
<b>Figura 29.</b> Difratoograma da areia utilizada para confecção do concreto.....	95
<b>Figura 30.</b> MEV Cimento CP-B. a) Ampliação de 25X. b) Ampliação de 100X. c) Ampliação de 200X. d) Ampliação de 500X. e) Ampliação de 1000X. f) Ampliação de 2000X.....	98
<b>Figura 31.</b> Difratoograma do CP- B utilizada para confecção do concreto .....	99
<b>Figura 32.</b> Ensaio de abatimento no concreto Referência.....	100
<b>Figura 33.</b> MEV CP Ref. com ampliação de 25x a 2000x. a) Ampliação de 25X. b) Ampliação de 50X. c) Ampliação de 100X. d) Ampliação de 200X. e) Ampliação de 500X. f) Ampliação de 1000X. g) Ampliação de 1500X. h) Ampliação de 2000X....	101
<b>Figura 33.</b> MEV CP Ref. com ampliação de 25x a 2000x. a) Ampliação de 25X. b) Ampliação de 50X. c) Ampliação de 100X. d) Ampliação de 200X. e) Ampliação de 500X. f) Ampliação de 1000X. g) Ampliação de 1500X. h) Ampliação de 2000X....	102
<b>Figura 34.</b> MEV CP AG 12,5 com ampliação de 25x a 2000x. a) Ampliação de 25X. b) Ampliação de 50X. c) Ampliação de 100X. d) Ampliação de 200X. e) Ampliação de 500X. f) Ampliação de 1000X. g) Ampliação de 1500X. h) Ampliação de 2000X....	103
<b>Figura 34.</b> MEV CP AG 12,5 com ampliação de 25x a 2000x. a) Ampliação de 25X. b) Ampliação de 50X. c) Ampliação de 100X. d) Ampliação de 200X. e) Ampliação de 500X. f) Ampliação de 1000X. g) Ampliação de 1500X. h) Ampliação de 2000X....	104
<b>Figura 35.</b> MEV CP AG 25 com ampliação de 25x a 2000x. a) Ampliação de 25X. b) Ampliação de 50X. c) Ampliação de 100X. d) Ampliação de 200X. e) Ampliação de 500X. f) Ampliação de 1000X. g) Ampliação de 1500X. h) Ampliação de 2000X....	105
<b>Figura 35.</b> MEV CP AG 25 com ampliação de 25x a 2000x. a) Ampliação de 25X. b) Ampliação de 50X. c) Ampliação de 100X. d) Ampliação de 200X. e) Ampliação de 500X. f) Ampliação de 1000X. g) Ampliação de 1500X. h) Ampliação de 2000X....	106
<b>Figura 36.</b> MEV CP AG 50 com ampliação de 25x a 2000x. a) Ampliação de 25X. b) Ampliação de 50X. c) Ampliação de 100X. d) Ampliação de 200X. e) Ampliação de 500X. f) Ampliação de 1000X. g) Ampliação de 1500X. h) Ampliação de 2000X....	107
<b>Figura 36.</b> MEV CP AG 50 com ampliação de 25x a 2000x. a) Ampliação de 25X. b) Ampliação de 50X. c) Ampliação de 100X. d) Ampliação de 200X. e) Ampliação de 500X. f) Ampliação de 1000X. g) Ampliação de 1500X. h) Ampliação de 2000X....	108
<b>Figura 37.</b> Difratoograma do Concreto Referência.....	109

<b>Figura 38.</b> Difratoograma do Concreto AG 50 .....	110
<b>Figura 39.</b> Concreto Referência.....	136
<b>Figura 40.</b> Concreto AG 12,5.....	137
<b>Figura 41.</b> Concreto AG25.....	139
<b>Figura 42.</b> Concreto AG50.....	140

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b>	Tipos de cimento Portland (ASTM 150) indicando composição, resistência a compressão e as principais características.....	40
<b>Tabela 2.</b>	Granulometria da areia (mm) referência .....	42
<b>Tabela 3.</b>	Granulometria da brita (mm) referência .....	42
<b>Tabela 4.</b>	Descrição das siglas e componentes do concreto .....	43
<b>Tabela 5.</b>	Fator X em função da resistência .....	44
<b>Tabela 6.</b>	Relação Y para concreto vibrado, em função máxima do agregado....	45
<b>Tabela 7.</b>	Composição química das matérias primas e isolador elétrico .....	47
<b>Tabela 8.</b>	Características de dosagem para confecção dos concretos CII-F 32 e CPV-ARI RS em ensaios mecânicos.....	50
<b>Tabela 9.</b>	Características de dosagem para confecção dos concretos.....	56
<b>Tabela 10.</b>	Respostas do ensaio de índice de absorção em dosagens de substituição	59
<b>Tabela 11.</b>	Respostas do ensaio de índice de absorção em dosagens de substituição	59
<b>Tabela 12.</b>	Características físicas do cimento CP-B.....	66
<b>Tabela 13.</b>	Quantidade de materiais para traço 1: 2: 2,5: 0,50 em kg .....	69
<b>Tabela 14.</b>	Dosagem utilizada na pesquisa .....	69
<b>Tabela 15.</b>	Granulometria Isolador elétrico de porcelana .....	82
<b>Tabela 16.</b>	Características físicas do no Agregado Graúdo artificial.....	84
<b>Tabela 17.</b>	Granulometria da Brita.....	87
<b>Tabela 18.</b>	Características físicas do no Agregado Graúdo natural.....	89
<b>Tabela 19.</b>	Granulometria da areia. ....	92
<b>Tabela 20.</b>	Características físicas do no Agregado miúdo natural.....	93
<b>Tabela 21.</b>	Expansibilidade de Le Chatelier.....	96
<b>Tabela 22.</b>	Ensaio de início e fim de pega na pasta .....	96
<b>Tabela 23.</b>	Ensaio de abatimento nos CP's de concreto .....	100
<b>Tabela 24.</b>	Resultados ensaio compressão concreto Referência.....	111
<b>Tabela 25.</b>	Resultados ensaio compressão concreto AG12,5. ....	113
<b>Tabela 26.</b>	Resultados ensaio compressão concreto AG25. ....	115
<b>Tabela 27.</b>	Resultados ensaio compressão concreto AG50 .....	117

<b>Tabela 28.</b>	Análise ANOVA entre amostras individuais Resistência a compressão	119
<b>Tabela 29.</b>	Análise de variância ANOVA em média das substituições Resistência a compressão	120
<b>Tabela 30.</b>	Avaliação dos concretos para ensaio de resistência a compressão ..	122
<b>Tabela 31.</b>	Classificação do índice de vazios .....	123
<b>Tabela 32.</b>	Resultados, comparação e classificação do índice de vazios.....	123
<b>Tabela 33.</b>	Análise de variância ANOVA no Índice de vazios.....	125
<b>Tabela 34.</b>	Avaliação do índice de vazios do concreto .....	126
<b>Tabela 35.</b>	Ensaio de índice de absorção e capilaridade concreto Referência....	127
<b>Tabela 36.</b>	Ensaio de índice de absorção e capilaridade concreto AG12,5.....	129
<b>Tabela 37.</b>	Ensaio de índice de absorção e capilaridade concreto AG25.....	130
<b>Tabela 38.</b>	Ensaio de índice de absorção e capilaridade concreto AG50.....	132
<b>Tabela 39.</b>	Análise de variância ANOVA no índice de absorção .....	134
<b>Tabela 40.</b>	Avaliação do índice de absorção de água no concreto.....	135

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1.</b>	Resistência mecânica por tração por compressão diametral.....	50
<b>Gráfico 2.</b>	Resistência mecânica por tração na flexão.....	51
<b>Gráfico 3.</b>	Resistência mecânica a tração por compressão diametral .....	52
<b>Gráfico 4.</b>	Resistência mecânica a tração na flexão.....	53
<b>Gráfico 5.</b>	Resistência mecânica a compressão.....	53
<b>Gráfico 6.</b>	Resistência mecânica à tração por compressão diametral .....	54
<b>Gráfico 7.</b>	Resistencia mecânica a compressão simples.....	55
<b>Gráfico 8.</b>	Resistencia mecânica à compressão simples.....	56
<b>Gráfico 9.</b>	Resistência mecânica a tração por compressão diametral .....	57
<b>Gráfico 10.</b>	Resistência mecânica a compressão simples .....	58
<b>Gráfico 11.</b>	Curva Granulométrica do agregado graúdo artificial .....	83
<b>Gráfico 12.</b>	Curva Granulométrica Brita .....	88
<b>Gráfico 13.</b>	Curva granulométrica agregado miúdo .....	92
<b>Gráfico 14.</b>	Período de início e fim de pega da pasta CP-B.....	97
<b>Gráfico 15.</b>	Resultados Resistencia a compressão Referência .....	112
<b>Gráfico 16.</b>	Resultados Resistencia a compressão AG12,5. ....	114
<b>Gráfico 17.</b>	Resultados Resistencia a compressão AG25. ....	116
<b>Gráfico 18.</b>	Resultados Resistencia a compressão AG50 .....	118
<b>Gráfico 19.</b>	Resultados Resistencia a compressão concreto.....	120
<b>Gráfico 20.</b>	Interpolação e extrapolação dos dados de resistência a compressão ao 28º dia de cura .....	121
<b>Gráfico 21.</b>	Ensaio de índices de vazio CP's .....	124
<b>Gráfico 22.</b>	Tendência CP's índice de vazios .....	125
<b>Gráfico 23.</b>	Resposta do índice de absorção do concreto Referência .....	128
<b>Gráfico 24.</b>	Resposta do índice de absorção do concreto AG12,5 .....	129
<b>Gráfico 25.</b>	Resposta do índice de absorção do concreto AG25 .....	131
<b>Gráfico 26.</b>	Resposta do índice de absorção do concreto AG50 .....	133
<b>Gráfico 27.</b>	Tendência CP's índice de absorção .....	134

## LISTA DE EQUAÇÕES

<b>Equação 1.</b> Determinação agregado graúdo.....	42
<b>Equação 2.</b> Determinação agregado miúdo.....	42
<b>Equação 3.</b> Determinação consumo de cimento.....	42
<b>Equação 4.</b> Determinação consumo de cimento ajustada .....	42
<b>Equação 5.</b> Massa Específica do agregado graúdo seco.....	68
<b>Equação 6.</b> Massa Específica do agregado graúdo saturado.....	68
<b>Equação 7.</b> Massa Específica Aparente do agregado graúdo.....	68
<b>Equação 8.</b> Índice de absorção do agregado graúdo.....	68
<b>Equação 9.</b> Índice de vazios.....	71
<b>Equação 10.</b> Índice de Absorção.....	71
<b>Equação 11.</b> Absorção de água por capilaridade.....	72
<b>Equação 12.</b> Equação genérica do método ANOVA.....	60



## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
MeMat	Mestrado Profissional em Materiais;
NM	Normas do Mercosul;
PNRS	Plano Nacional de Resíduos Sólidos;
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico;
ABCERAM	Associação Brasileira de Cerâmicas;
FCM	Resistencia média do concreto a compressão;
FCK	Resistencia característica do concreto a compressão;
FC	Resistencia do concreto;
NBR	Normas Técnica brasileira;
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CP	Corpo de prova;
CP-B	Cimento Portland Branco;
Mc	Massa específica do cimento;
Mx	Massa específica da água;
Ma	Massa específica da areia;
Mb	Massa específica da brita;
X	Água;
A	Areia;
B	Brita;
CAD	Concreto de alto desempenho;
C110	Porcelana C110;
Q	Quartzo;

P	Mulita primária;
S	Mulita secundaria
C120	Porcelana C120;
C130	Porcelana C130;
B	Alumina;
C	Porosidade da microestrutura;
A1	Mulita Primária;
A2	Fase Vítrea;
CP-II-F	Cimento Portland II;
CPV-ARI RS	Cimento Portland V;
CP IV 32	Cimento Portland IV;
AD	Adição agregado;
AM	Agregado miúdo;
AG	Agregado graúdo;
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente;
$M_{sat}$	Massa do CP com saturação de água por 24h;
$M_{sc}$	Massa do CP seco;
$M_i$	Massa do corpo de prova saturado, imerso em água;
$D_{sc}$	Massa Específica do agregado graúdo seco;
$D_{sat}$	Massa Específica do agregado graúdo saturado;
$D$	Massa Específica Aparente do agregado graúdo;
$A_{ag}$	Índice de absorção do agregado graúdo.
$C$	Absorção de água por capilaridade em (g/cm <sup>2</sup> );

$A$	Massa do CP que permanece em contato com uma das faces com a água durante 24h em (g);
$M_{sc}$	Massa do CP seco (g);
$S$	Área da seção transversal em (cm <sup>2</sup> );
$\mu$	Média geral;
$\alpha_i$	Influência da variável independente substituição do resíduo;
$\beta_j$	Influência da variável independente idade do ensaio;
$\alpha\beta_{ij}$	Influência da interação das variáveis independentes;
$\epsilon_{ij}$	Medida do erro experimental, onde $\epsilon_{ij} \rightarrow N(0, \sigma)$ .

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>25</b>
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	25
1.2. OBJETIVOS.....	26
<b>1.2.1. Objetivo geral</b> .....	<b>26</b>
<b>1.2.2. Objetivos específicos</b> .....	<b>26</b>
1.3. JUSTIFICATIVA.....	27
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>28</b>
2.1. ESTRUTURAS DOS CORPOS CERÂMICOS .....	28
<b>2.1.1. Composição dos corpos cerâmicos</b> .....	<b>29</b>
2.1.1.1. QUARTZO.....	29
2.1.1.2. CAULIM.....	29
2.1.1.3. FELDSPATO.....	30
2.1.1.4. ARGILA.....	30
2.1.2. Propriedades das cerâmicas .....	31
2.1.2.1. PROPRIEDADES ELÉTRICAS.....	31
2.1.2.2. PROPRIEDADES TÉRMICAS .....	32
2.1.2.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS .....	32
2.1.2.4. FRATURA FRÁGIL DAS CERÂMICAS.....	33
2.1.2.5. PROPRIEDADES ESPECÍFICAS DAS CERÂMICAS BRANCAS .....	34
2.1.3. Isoladores elétricos e processo produtivo .....	34
2.1.3.1. COMPOSIÇÃO QUÍMICA .....	35
2.1.3.2. PROCESSO DE FABRICAÇÃO .....	36
2.1.4. Setor cerâmico.....	38
2.2. CONCRETO.....	38
2.2.1. Propriedades do concreto .....	38
2.2.2. Matéria prima e constituintes do concreto.....	39

2.2.2.1.	CIMENTO PORTLAND .....	40
2.2.2.1.1.	CIMENTO PORTLAND BRANCO .....	40
2.2.2.2.	AGREGADOS MIÚDOS.....	41
2.2.2.3.	AGREGADO GRAÚDO.....	42
2.2.2.4.	ÁGUA.....	43
2.2.2.5.	ADITIVOS.....	43
2.2.3.	Composição do Concreto .....	43
2.2.3.1.	TRAÇO.....	43
2.2.3.2.	CONSUMO DE CIMENTO .....	45
2.2.3.3.	CLASSIFICAÇÃO DO CONCRETO .....	46
2.3.	ESTUDOS DA LITERATURA .....	46
2.3.1.	Modelo Físico-Químico .....	46
2.3.2.	Propriedades mecânicas.....	49
2.3.3.	Absorção por água .....	58
2.4.	ANÁLISE DE VARIANCIA (ANOVA) .....	60
2.5.	GESTÃO DE RESÍDUO .....	60
2.5.1.	Normas e regulamentos .....	61
2.5.2.	Reciclagem.....	62
3.	MATERIAIS E MÉTODOS .....	64
3.1.	MATERIAIS .....	64
3.1.1.	Resíduos das porcelanas como agregado graúdo .....	64
3.1.2.	Agregado Graúdo natural .....	65
3.1.3.	Agregado Miúdo natural.....	65
3.1.4.	Cimento .....	66
3.2.	MÉTODOS .....	67
3.2.1.	Produção do concreto.....	68
3.2.2.	Métodos Experimentais.....	70
3.2.2.1.	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS .....	71

3.2.2.2.	MASSA ESPECIFICA E ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS AGREGADOS GRAÚDOS .....	72
3.2.2.3.	EXPANSIBILIDADE DE LE CHATELIER .....	73
3.2.2.4.	TEMPO DE INÍCIO E FIM DE PEGA .....	73
3.2.2.5.	ENSAIO DE ABATIMENTO .....	74
3.2.2.6.	MICROSCOPIA DE VARREDURA ELETRÔNICA (MEV).....	75
3.2.2.7.	DIFRAÇÃO DE RAIO X .....	76
3.2.2.8.	ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL .....	76
3.2.2.9.	ÍNDICE DE VAZIOS .....	77
3.2.2.10.	ÍNDICE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA E CAPILARIDADE.....	78
3.2.2.1.	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS .....	79
3.2.2.2.	MÉTODO DE AVALIAÇÃO DOS CONCRETOS .....	80
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	81
4.1.	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS .....	81
4.1.1.	Agregado Graúdo sintético (Isolador Elétrico de Porcelana) .....	81
4.1.1.1.	GRANULOMÉTRIA DO AGREGADO .....	82
4.1.1.2.	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS GERAIS.....	83
4.1.1.3.	MEV .....	84
4.1.1.4.	DRX.....	86
4.1.2.	Agregado Graúdo (Brita).....	86
4.1.2.1.	GRANULOMETRIA DO AGREGADO .....	87
4.1.2.2.	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS GERAIS.....	88
4.1.2.3.	MEV .....	89
4.1.2.4.	DRX.....	91
4.1.3.	Agregado miúdo (Areia) .....	91
4.1.3.1.	GRANULOMETRIA DO AGREGADO .....	91

4.1.3.2.	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS GERAIS.....	93
4.1.3.3.	MEV.....	93
4.1.3.4.	DRX.....	95
4.1.4.	Cimento CP-B.....	95
4.1.4.1.	EXPANSIBILIDADE DE LE CHATELIER.....	95
4.1.4.2.	INÍCIO E FIM DE PEGA.....	96
4.1.4.3.	MEV.....	97
4.1.4.4.	DRX.....	99
4.2.	RESULTADOS DO CONCRETO.....	100
4.2.1.	Ensaio de abatimento.....	100
4.2.2.	MEV.....	101
4.2.2.1.	ANÁLISE NO CONCRETO REFERÊNCIA.....	101
4.2.2.2.	ANÁLISE DO CONCRETO AG 12,5.....	103
4.2.2.3.	ANÁLISE DO CONCRETO AG 25.....	105
4.2.2.4.	ANÁLISE DO CONCRETO AG 50.....	106
4.2.3.	Difração de Raio X.....	108
4.2.3.1.	ANÁLISE DO DRX DO CONCRETO REFERÊNCIA.....	109
4.2.3.2.	ANALISE DO DRX DO CONCRETO AG 50.....	109
4.2.4.	Resultado da resistência a compressão Uniaxial do concreto.....	110
4.2.4.1.	ANÁLISE DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO.....	118
4.2.5.	Índice de vazios.....	123
4.2.5.1.	ANÁLISE DO ÍNDICE DE VAZIOS.....	124
4.2.6.	Índice de absorção e Capilaridade.....	126
4.2.6.1.	ABSORÇÃO CONCRETO REFERÊNCIA.....	127
4.2.6.2.	ABSORÇÃO CONCRETO AG 12,5.....	128
4.2.6.3.	ABSORÇÃO CONCRETO AG 25.....	130

4.2.6.4.	ABSORÇÃO CONCRETO AG 50.....	131
4.2.6.5.	ANÁLISE ESTATÍSTICA ÍNDICE DE ABSORÇÃO .....	133
4.2.7.	Método de avaliação do concreto .....	135
4.2.7.1.	CONCRETO REFERÊNCIA.....	135
4.2.7.2.	CONCRETO AG12,5.....	137
4.2.7.3.	CONCRETO AG25.....	138
4.2.7.4.	CONCRETO AG50.....	139
5.	CONCLUSÕES.....	141
6.	TRABALHOS FUTUROS .....	143
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	144



## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O sistema elétrico brasileiro é proporcional a grande extensão territorial do país, devido ao fato da eletricidade ser um bem trivial ao cidadão. Com base na ONS (Operador Nacional do Sistema), a capacidade instalada de geração é de 162,629 MW de potência, com 134,668.521 km de linhas de transmissão em extensão, que exhibe toda uma estrutura de geração, transmissão e distribuição, que necessariamente carece de uma constante manutenção, tão quanto, uma constante expansão para atender a necessidade do setor (ONS, 2018).

Adjunto a este crescimento ocorre o aumento dos resíduos que são compostos de uma considerável quantidade de material cerâmico, especialmente isoladores de porcelana. Somente no Brasil, é estimado um passivo de aproximadamente 25 mil toneladas por ano destes resíduos, oriundo da substituição de peças danificadas e obsoletas (FERRÃO; CAMPOS; PAULON, 2016).

Tratando quantitativamente, a Eletrobrás Furnas, possui nas unidades de armazenamento e coleta de Campinas, Tijuco Preto e Foz do Iguaçu, onde cerca de 71,5 toneladas de isoladores elétricos se estabelecem nos pátios aguardando descarte, sendo que a estimativa de geração desses materiais, gera em torno de 50 toneladas/ano. Já na concessionária de energia de Goiás (CELG), verifica-se um passivo médio de 100 toneladas de isoladores elétricos oriundos do estado, num período de 2 anos. Porém a estimativa média de descartes de isoladores no estado é de 20 a 25 toneladas/ano. No estado do Paraná, foi realizado uma projeção de 11 toneladas de resíduos de isoladores para 160 mil km de linhas de transmissão dentro do estado (VIEIRA, 2017).

As porcelanas, estão inseridas no setor elétrico com uma grande homogeneidade. Estas podem ser encontradas em hidrelétricas, linhas de transmissão e até mesmo em postes. Sendo que sua principal função é estabelecer uma condição de alta rigidez dielétrica associada a uma elevada impedância. Sendo que as características mecânicas e físicas destes materiais, são determinados de acordo com o sistema onde o mesmo deverá ser instalado (VIEIRA, 2017).

Este material, não possui uma metodologia de reciclagem ou reutilização, tratando assim esses componentes como rejeitos, que são sucata na natureza sem um controle efetivo (FERRÃO; CAMPOS; PAULON, 2016).

Com base nestes dados e na Política Nacional de Resíduos Sólidos, a esfera empresarial e governamental brasileira, tem tomado como objetivo a redução dos resíduos, recorrendo principalmente as técnicas de reciclagem e reutilização, para que assim possa ser agregado valor a um resíduo, sendo capaz de movimentar a economia, produzir empregos e consequentemente preservar o meio ambiente.

Uma das formas de reintrodução, no ciclo produtivo, destes resíduos é a aplicação dos isoladores elétricos, no setor das estruturas cimentícias. Pois se demonstra viável em diversos quesitos, tais como: ambiental, por reciclar um resíduo, que muitas das vezes seria descartado de forma totalmente incorreta; econômica, pelo fato de movimentar uma economia de reciclagem, distribuída em coleta, transporte e transformação, agregando valor a um resíduo (BERALDO; SHIROMA; FERREIRA, 2016).

## 1.2. OBJETIVOS

### **Objetivo geral**

Realizar produção de concreto a base de cimento branco, com inserção de isoladores elétricos de porcelana para avaliação da performance e viabilidade de aplicação dos mesmos.

### **Objetivos específicos**

Substituir os agregados convencionais, por agregado graúdo de isoladores de porcelana, em porcentagem de substituição em massas de 12,5%, 25% e 50%, e realizar comparação com os dados do concreto convencional denominado referência com os agregados comuns. Realizar a caracterização química e morfológica, verificando as propriedades mecânicas, absorção de água e índice de vazios, para análise de viabilidade de aplicação estrutural, de acordo com os parâmetros de um concreto convencionalmente utilizado.

### 1.3. JUSTIFICATIVA

A metodologia de reciclagem, se encaixa nesse cenário com uma proposta ideal, ou com o intuito de mitigar essa problemática. Agregar valor a um resíduo, capaz de movimentar um setor economicamente, estimulando a coleta e reduzindo subsequentemente um passivo ambiental, é primordial no setor ambiental e econômico. De fato, é essencial afirmar que a reciclagem é efetiva nessa perspectiva.

Imediatamente, a reciclagem desse resíduo impulsiona um outro setor, a produção do concreto, com a utilização de agregados oriundos de isoladores elétricos, que necessita ser sedimentada teoricamente, a partir de ensaios exclusivos, que serão demonstrados na pesquisa. Antecipadamente, existem literaturas descrevendo a utilização de resíduos cerâmicos, onde são expostos resultados satisfatórios. Entretanto, nenhum deles trabalha com Cimento Portland Branco que visa uma melhor qualidade da peça final e diminuição com gastos de acabamento.

A partir dos dados, pressupõe-se que a reciclagem dos isoladores elétricos, é importante para o setor ambiental, tanto quanto, viável economicamente. A aplicação como agregados no concreto, necessita de uma sedimentação teórica, tão quanto consolidação científica, para utilização no concreto com confiabilidade em aplicações estruturais. Porém, em termos de quantidade, fica trivial verificar, que há de fato resíduos para a aplicação destes no concreto com abundância. Dentre todos os fatores expostos, a utilização do resíduo de isoladores elétricos como agregado no concreto, a princípio, se torna uma alternativa viável.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. ESTRUTURAS DOS CORPOS CERÂMICOS

A microestrutura do material cerâmico, em geral, é polifásica, e a partir disso, é tomado que suas propriedades dependem intensamente dos percentuais das diversas fases, e também de sua distribuição e forma (LINO, 2006).

Estes, são compostos por elementos metálicos e não metálicos, composto por mais de um modelo atômico, muito embora a estrutura atômica possa acomodar distintas espécies de átomos, sendo que as ligações interatômicas são de fato, predominantemente iônica, com traços de ligações covalentes (LINO, 2006).

Os materiais cerâmicos que possuem produtividade mais intensa, como tijolos, pisos, porcelanas e refratários, recebem pouco beneficiamento. Já as cerâmicas eletrônicas e eletrotécnicas, ferramentas de corte, que são produtos de aplicação de pequena a média escala, recebem um beneficiamento mais intenso. Este beneficiamento, exibe-se de diversas maneiras, desde uma simples britagem, até mesmo a determinação da granulometria específica para sua aplicação, separação magnética para remoção das impurezas ferrosas e flotação quando se tem o intuito de separar grãos de tamanhos superiores e distintas densidades (CAMPOS, 2009).

Além disso, para existir a união perfeita entre as partículas, e determinação da granulometria, é necessário realizar o processo de peneiramento em todo o material. Já para determinação das cores das cerâmicas, estas são obtidas a partir a homogeneização de vários óxidos de metais, como cobalto, ferro, cromo etc. Em relação a plasticidade das cerâmicas, estas são verificadas após a homogeneização das argilas e matérias primas com a água, ligando basicamente a composição granulométrica e mineralógica dos compostos, tendo que uma menor granulometria melhorará a trabalhabilidade e plasticidade, pois desta maneira haverá um melhor acoplamento dos grãos (CAMPOS, 2009).

## Composição dos corpos cerâmicos

As cerâmicas são compostas por diversas matérias-primas, dentre elas estão o Quartzo, Caulim, Feldspato e Argila. Estas, em dosagens específicas conferem propriedades mecânicas, elétricas e térmicas ao material.

### Quartzo

O quartzo- $\alpha$ , ou a fase estável da sílica a temperatura ambiente, é um dos minerais em maior abundância na terra (GUZZO, 2008).

As principais propriedades físicas, e mais relevantes do quartzo é a piezeletricidade, elasticidade e as propriedades óticas. A hegemonia do ressonador oriundo do quartzo, é virtude da linearidade e estabilidade das suas propriedades elásticas em função da variável temperatura, onde sua constante elástica é minimamente afetada pela variação da temperatura. No ramo da óptica, seus benefícios estão atrelados a sua transmitância em um amplo espectro eletromagnético (GUZZO, 2008).

O quartzo é caracterizado como um dióxido de silício, com uma dureza superior ao feldspato. Devido suas características, o quartzo dificilmente é atacado pelas intemperes químicas, e não possui clivagem, por isso a razão principal de constituição da fração arenosa dos sedimentos e solos. Além disso, ele apresenta variedades cristalinas, tais como: quartzo hialino, Ametista, Ágata, dentre outras (CAMPOS, 2009).

### Caulim

O Caulim é uma rocha composta de material argiloso de granulometria fina, geralmente com a cor branca ou tendendo ao branco, com baixo teor de ferro. Devido suas variadas propriedades físicas e químicas, este é utilizado em uma gama de produtos, especialmente na confecção de refratários, cerâmicas e papeis comuns e revestidos (LUZ; *et al.*, 2008).

A formação do Caulim se dá por meio de ações de solução sobre rochas aluminosas, onde a mesma pode ser considerada uma espécie de argila. Suas ocorrências principais são: mantos, veios, depósitos de acamados e de substituição (CAMPOS, 2009).

Este, possui propriedades específicas, como: mineral inerte quimicamente em uma larga faixa de pH, dispersão fácil, uma baixa condutividade elétrica e térmica, pouca abrasividade e maciez. Com isso, possui uma competitividade em preço com os materiais alternativos (LUZ; *et al.*, 2008).

### Feldspato

O feldspato é um termo para denominação de um grupo de minerais constituídos de cálcio, sódio e aluminossilicatos de potássio. A indústria de cerâmicas e vidros, são de fato, as principais consumidoras de feldspato, onde estas demandam especificações químicas, físicas e uniformidade no suprimento deste (LUZ; COELHO, 2005).

Para a indústria de cerâmicas, os feldspatos de maior apreço são o sódico e potássico, pelo fato de possuírem temperaturas de fusão relativamente baixa, e assim utilizada como geradores de massa vítrea, nos vidrados e massas cerâmicas. Contudo, são dificilmente de serem encontrados puros, e em geral, podem estar associados a impurezas e se apresentam em misturas (LUZ; *et al.*, 2008).

Para indústria de fabricação de vidro, o álcalis contido no feldspato, vem com intuito de substituição parcial do carbonato de sódio e com isso executam a função de fundente. A alumina melhora a trabalhabilidade do vidro fundido, aumentando a resistência a corrosão química, juntamente com o aumento da dureza e durabilidade e atenua a desvitrificação (LUZ; COELHO, 2005).

### Argila

A argila é a principal matéria-prima das cerâmicos. Sendo um elemento terroso constituído naturalmente por argilominerais, e especialmente constituídos por silicatos de alumínio hidratado, podendo assim conter outros minerais como o feldspato, mica, hematita, pirita, sobretudo impurezas e materiais inorgânicos (CAMPOS, 2009).

O nome Argila é dado aos sedimentos que são formados somente por partículas de pequenas dimensões, com valores abaixo de 1/256 milímetros ou 4 micrômetros de diâmetro. O sedimento, deveria ser formado por apenas um mineral argiloso, mas comumente é constituído por um conjunto destes, sendo um predominante. O filossilicatos, ou, silicatos desenvolvem lâminas, com baixa dureza, boa clivagem em um sentido e com densidade relativamente baixa (BRANCO, 2014).

Os minerais argilosos possuem características importantes, pelo fato, da dimensão dos seus cristais que são extremamente pequenos. Então, isso exige métodos com maior efetividade para detecção dela, tais como: fluorescência de raio X, absorção atômica, difração de raio X e microscopia eletrônica de varredura (BRANCO, 2014).

A rochas argilosas possuem cores bastantes distintas, e isso, está atrelado principalmente a sua composição química. As impurezas inseridas na argila, interferem na porosidade da peça, sendo que estas podem desenvolver uma perda da sua resistência mecânica. Então, o conhecimento das impurezas presente é primordial nessa avaliação. Os ensaios de plasticidade e distribuição granulométrica, exibem a caracterização física das argilas que pode ser classificada em: estrutura laminar ou foliácea, que são usadas no desenvolvimento de produtos cerâmicos, e estruturas fibrosa (CAMPOS, 2009; BRANCO, 2014).

A plasticidade deste produto é dividida de duas maneiras: gordas, com maior deformação ao cozimento e mais plásticas. E as magras, com maior fragilidade e porosidade e possuem um excesso de sílica (CAMPOS, 2009).

### **Propriedades das cerâmicas**

Quando comparadas a outros materiais, as cerâmicas apresentam um elevado módulo de elasticidade. Com temperatura de fusão na faixa de 1000°C, no entanto, devido à baixa ductibilidade, estas apresentam uma resposta de elevada resistência a compressão, não se fraturando por deslizamentos. As principais matérias primas, são provenientes da própria natureza, sendo usada de forma intrínseca ou extrínseca (BORBA, 2010).

As cerâmicas possuem diversas propriedades relevantes, sendo elas, elétricas, térmicas, mecânicas e de fratura. Com isso, o tópico tem o objetivo de demonstrá-las e relacionar as mesmas.

#### **Propriedades elétricas**

As ligações iônicas e forte característica covalente, reduzem a mobilidade eletrônica, fazendo com que as cerâmicas se tornem bons isolantes elétricos, e por conta disso, estas possuem diversas aplicações. Dentre as diversas cerâmicas, as porcelanas Triaxiais compostas por argila, quartzo e feldspato, são as mais

empregadas como isoladores elétricos. As propriedades dielétricas e mecânicas das cerâmicas, estão atreladas a microestrutura desenvolvida durante o processamento. A temperatura, presença de impurezas, atmosfera e tempo de sinterização influenciam diretamente no desenvolvimento da microestrutura como consequência das reações químicas (CHINELATTO; SOUZA, 2004).

O isolador elétrico de porcelana de qualidade no setor elétrico, deverá possuir uma elevada rigidez dielétrica, alta resistividade elétrica, baixo fator de dissipação e uma constante dielétrica inferior. Todos esses requisitos, são de fato atendidos pelas cerâmicas, porém, a literatura expõe dados discrepantes quando traz relação entre a microestrutura e as propriedades das cerâmicas. No entanto, as discrepâncias podem ser avaliadas tomando como um importante parâmetro para o fator de perda e constante dielétrica, a constituição de cada uma fase, e não somente a relação entre suas quantidades. Devido a composição de cada fase, que está atrelada as matérias primas, que são intrínsecas de cada região, explica que não existe um nexos em relação ao comportamento geral da relação das propriedades dielétricas e microestrutura (CHINELATTO; SOUZA, 2004).

#### Propriedades térmicas

Em engenharia, um considerável problema é a transferência de energia térmica dos materiais. As cerâmicas, exibem uma baixa mobilidade eletrônica devido a mínima existência de elétrons livres, e por serem translúcidos a energia radiante.

A partir disso, consideram que as cerâmicas, geralmente, apresentam uma baixa capacidade de transportar o calor, sendo assim, considerados isolantes térmicos de natureza (ZANOTTO; JUNIOR, 1991).

#### Propriedades mecânicas

Os materiais cerâmicos em geral apresentam uma elevada resistência a abrasão, resistência a altas temperaturas e inércia química. Porém, não apresentam deformação plástica considerável, sua resistência ao impacto é reduzida, e associado a isso, oferecem uma baixa tenacidade (ZANOTTO; JUNIOR, 1991).

Estas são frágeis, e com isso, não detém ou detém minimamente a capacidade de deformação plástica. Então, são sensíveis a concentrações de tensões em defeitos já existentes. Devido à elevada sensibilidade aos defeitos existentes, os materiais



cerâmicos resistem de forma superior ao ensaio de flexão contrariamente ao ensaio de tração. A diversidade nos valores de resistência está atribuída a distribuição do tamanho e local dos defeitos (BORBA, 2010).

A maior parte dos cerâmicos apresentam uma fratura tipo frágil, com poucas ou nenhuma deformação plástica. Os materiais não cristalinos, ou seja, a fase vítrea, componente característica das cerâmicas, possuem fragilidade abaixo da temperatura de amolecimento. Com a temperatura ambiente, a fratura do tipo frágil ocorre por clivagem sobre os planos cristalográficos, ou seja, fratura intragranular. Já em altas temperaturas as cerâmicas possuem uma tendência a se fraturar na forma intergranular. Com isso, as fraturas se caracterizam de forma intragranular e intergranular de forma simultânea (ZANOTTO; JUNIOR, 1991).

A dinâmica nos valores de resistência das cerâmicas, está associada com o posicionamento dos defeitos e distribuição do tamanho, e com isso, pode ser analisada utilizando a técnica de estatística de Weibull, que permite relacionar a probabilidade de falha de uma área ou de um volume submetido a tensão de tração a dois parâmetros (ZANOTTO; JUNIOR, 1991).

As cerâmicas são sujeitas a um fenômeno de crescimento subcrítico de trincas. Este é descrito por um processo de corrosão quando possui uma carga aplicada, relacionando o crescimento estável das trincas já existentes, até que elas tomem um tamanho crítico, para que quando alcance um nível de carga aplicada, desencadeie-se uma fratura catastrófica (BORBA, 2010).

#### Fratura frágil das cerâmicas

A análise da mecânica de fratura, relaciona o estudo das tensões aplicadas e a resposta de deformação em trincas dinâmicas ou estacionárias em materiais. A velocidade com que ocorre a propagação das trincas e transformação da resistência mecânica em um determinado intervalo de tempo, objetiva da análise da mecânica de fratura, que, de certa forma, analisa as formas de separação das propriedades intrínsecas dos materiais, de forma a verificar a distribuição de falhas na estrutura (BORBA, 2010).

A região de tensão na ponta da trinca, poderá ser examinada pelo fator de intensidade de tensão nas cerâmicas, este é controlado pelo modo de tração. A

tenacidade a fratura, define a resistência do material instável à propagação de defeitos já existentes, sob uma determinada carga aplicada. Estes defeitos são desenvolvidos durante o processamento ou até mesmo após a manipulação e acabamento. Então, pode-se definir que para as cerâmicas, a resistência à fratura é limitada, pelo fato de já possuírem defeitos pré-existentes relacionado a uma baixa tenacidade a fratura (BORBA, 2010).

#### Propriedades específicas das cerâmicas brancas

As cerâmicas brancas, são formadas a partir de massas compostas por quartzo, caulínicas e fundentes, onde após a queima exibem cores claras. Estas são constituídas por materiais de corpo branco, e comumente recobertas por uma camada vítrea (CAVALCANTI, 2010).

Estas, exibem uma gama de produtos, como louças domésticas e sanitárias, azulejos, isoladores elétricos, dentre outros. Estas proporcionam uma cor clara quando queimadas à temperatura de 950°C. Quando a queima ocorre a 1250°C exibem uma coloração rósea, branca ou creme, sendo esta, a temperatura ideal para queima da cerâmica branca que evidenciam uma boa qualidade (CAVALCANTI, 2010).

Quanto a classificação das cerâmicas brancas, é tomada como referência o teor em peso de água absorvido pelo corpo. A porcelana é caracterizada quando a absorção é zero. O grês são materiais que possuem uma baixa absorção, em torno de 0,5% a 3%. Já a louça exibe uma maior porosidade, na maioria das vezes maior do que 3% (SOUZA, 2007).

A conformação das cerâmicas brancas, comumente é realizada por prensagem, colagem ou moldagem plástica, com uma temperatura acima de 1200°C geralmente para calcinação (CAVALCANTI, 2010).

#### **Isoladores elétricos e processo produtivo**

As porcelanas elétricas, em generalidade, são classificadas geralmente de materiais cerâmicos, do tipo porcelana, das quais as ligações químicas são predominantemente covalente e iônicas. Esta forte ligação proporciona aos materiais cerâmicos elevados valores de dureza, temperatura de fusão, resistência química, baixa temperatura de expansão e um elevado módulo de elasticidade. Estes, ao

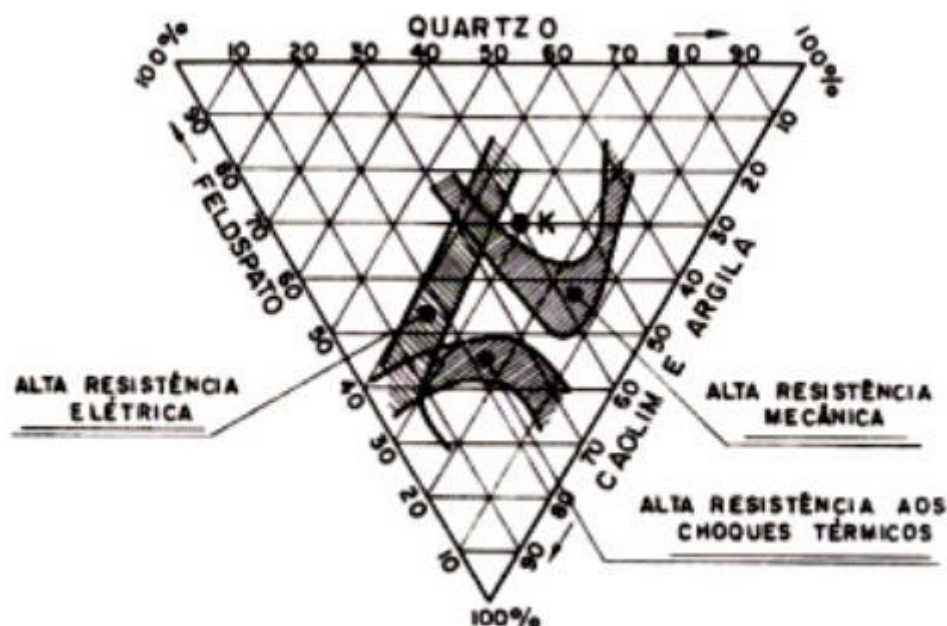
contrário dos metais, não possuem elétrons livres, desempenhando assim uma propriedade dielétrica e térmicas satisfatórias. As propriedades, estão diretamente relacionadas às propriedades intrínsecas das matérias primas aliadas as características, também processo de queima e obtenção do produto (VIEIRA, 2017).

Estas, também são classificados como cerâmicas brancas, pois possuem uma massa branca coberta por uma camada vítrea de esmalte. Essas porcelanas são constituídas por argilas, com baixo teor de ferro para não implicar em suas propriedades dielétricas, tendo que o feldspato, é responsável pela formação da massa vítrea. Sendo assim, estas apresentam um elevado ponto de fusão, sendo fabricada a frio, na forma plástica, e sofrendo o processo de queima com temperatura de até 2000°C (CAMPOS, 2009).

#### Composição química

Os isoladores elétricos de porcelanas, são formados fundamentalmente de 30% de feldspato, 30% de caulim + argila, e finalmente 40% de quartzo, denominando assim como isoladores de quartzo, sendo que os isoladores especiais, recebem uma adição de alumina em substituição parcial do quartzo. Também são incorporadas outras substâncias em percentuais bem reduzidos com intuito de melhorar as propriedades mecânicas e dielétricas do isolador, como hidróxido de ferro, silicato de magnésio, silicato de cálcio e alguns ácidos. O volume da matéria prima é dinâmico, devido a aplicabilidade do isolador elétrico, então, para modelar a quantidade de cada componente de acordo com as necessidades dielétricas, elétricas, térmicas e mecânicas que o material deverá suportar, são estabelecidas as porcentagens com base no triângulo de composição da porcelana conforme apresentado na Figura 1 (CAMPOS, 2009).

**Figura 1.** Triângulo das composições das porcelanas.



Fonte: (CAMPOS, 2009)

Com isso, elevando a quantidade de quartzo, o isolador terá maior resistência a temperatura, resistência mecânica, e conseqüentemente uma menor rigidez dielétrica. Já um aumento na quantidade de Feldspato, melhorará a resposta dielétrica, fatores de perdas, dentre outras. E aumentando a quantidade de caulim e argila, melhorará a resposta a choques térmicos e por conseguinte reduzirá sua propriedade de rigidez dielétrica (CAMPOS, 2009).

#### Processo de fabricação

Para a produção dos isoladores elétricos de porcelana, a massa cerâmica fica submetida a um processamento de elevadas temperaturas, onde se desenvolve uma mudança na composição química, conseqüentemente na estrutura cristalina do material e nos diversos arranjos de fase do material, desenvolvendo propriedades importantes para o material. As cerâmicas processadas, são constituídas de fase vítrea, e por uma fase cristalina que se exibem como cristais únicos ou conjuntos de vidros e cristais, contendo polímeros ou metais, suprimindo parcialmente ou totalmente a fase vítrea. Então, para o desenvolvimento das cerâmicas de isoladores elétricos, o processamento é subdividido em: preparação da matéria prima, processamento térmico, acabamento e esmaltação (VIEIRA, 2017).

O tratamento ou preparação da matéria prima, compreende em etapas que precedem a fabricação, que são: conformação, tratamento térmico e acabamento. Inicialmente, o tratamento compreende o processo de depuração, divisão, homogeneização e obtenção da umidade adequada. Com a depuração, são eliminadas as impurezas do material, tais como: nódulos de cal, grão duros e sais solúveis. Já a divisão, é a etapa que executa o processo de trituração e moagem, que visa facilitar as etapas seguintes. A homogeneização e umidificação são processos desenvolvidos na presença de água para executar uma mistura homogênea, e subsequentemente é retirada a água do sistema (VIEIRA, 2017).

A conformação é caracterizada pelos métodos de colagem ou fundição, prensagem, extrusão e torneamento. Para os isoladores elétricos de porcelana, utiliza-se o método de extrusão que pode ser descrito como introdução da massa cerâmica dentro de uma extrusora, onde é compactada e forçada por um eixo helicoidal ou pistão, através de um bocal com um formato. Como decorrência obtém uma coluna extrudada, com dimensões e formatos desejados. Logo após o processo de extrusão, os isoladores passam pelo torneamento, que são realizados em tornos manuais ou mecânicos, onde a peça toma seu formato final (ABCERAM, 2019).

No tratamento térmico a peça adquire suas propriedades finais. Neste processo as peças após a secagem, são demandadas a um tratamento térmico com altas temperaturas, em torno de 1300°C em fornos intermitentes ou contínuos. Nesse tratamento, diversos fenômenos podem ser verificados, como: novas fases cristalinas, perda de massa, soldagem dos grãos e formação da fase vítrea (VIEIRA, 2017).

O processamento de pós queima, polimento, furação, corte, dentre outros, podem receber o nome genérico de acabamento (CAMPOS, 2009).

A esmaltação é caracterizada pela mistura de matérias primas naturais, compostos vítreos ou produtos químicos aplicados a superfície da peça após a queima, formando uma camada vítrea, delgada e contínua. Assim essa camada, tem o intuito de melhorar as propriedades elétricas, mecânicas, tornando o produto impermeável, dentre outros fatores. O esmalte utilizado nas porcelanas é o esmalte cru, que é constituído da própria matéria prima em granulometria bastante fina, que é sobreposta na forma de suspensão na superfície da peça cerâmica (ABCERAM, 2019).

## **Setor cerâmico**

De acordo com Associação Brasileira de Cerâmicas (ABCERAM, 2019), a matéria prima no território nacional, conjugada com fontes de energia renováveis e tecnologias dedicadas, fizeram com que o setor pudesse melhorar a qualidade do produto e processo, em múltiplos segmentos cerâmicos, atingindo assim uma qualidade de renome no setor nacional e internacional.

As regiões que mais se desenvolvem no segmento, são o Sul e Sudeste do país, pelo fato da maior atividade industrial e agropecuária aliadas a matéria prima em abundância nessas regiões (ABCEREM, 2019).

Cerca de 290 mil pessoas, no Brasil, são empregadas pela indústria cerâmicas. Gerando assim, aproximadamente cerca de 900 mil empregos diretos e indiretos no país. Movimentando a economia, com um faturamento por ano de cerca de 18 bilhões de reais (SINDICER, 2019).

## **2.2. CONCRETO**

De acordo com COUTO; *et al.*, (2013) o concreto é como um dos principais compostos utilizados no ramo da Engenharia Civil, este é caracterizado como uma mistura utilizada para construções, e é composto por: agregados, cimento e água, podendo ser adicionado de outros aditivos. Quando realizado a mistura desses compostos, estes formam uma liga que poderá ser moldada, podendo ser utilizada em diversas aplicações, tomando diversas formas. As preparações podem ser realizadas de forma manual ou em betoneiras, ou mesmo em centrais dosadoras, usinas centrais de concreto, que fazem com que o concreto seja classificado como concreto pré-misturado ou usinado, possuindo subsequentemente vantagem e desvantagem.

### **Propriedades do concreto**

A resistência a compressão, é de fato a característica mais importante de um concreto. Esta deve relacionar a quantidade de corpos de provas ensaiados para que possa plotar a curva estatística de Gauss para resistência a compressão. Na curva de Gauss pode ser verificado valores de extrema importância: o ( $F_{cm}$ ) que é a média aritmética dos valores de resistência a compressão ( $F_c$ ) dos corpos de prova, e assim

determinado os valores de ( $F_{ck}$ ) que é caracterizado como resistência característica. A norma NBR 8953 relaciona a classe de resistência em função do  $F_{ck}$  (LIBÂNIO; CASSIANE; SANDRO, 2004).

As deformações do concreto podem ser procedentes de condições ambientais, tão quanto cargas externas. Dentre as condições ambientais, estão: retração, deformação motivada por variação de umidade e temperatura ambiente. Já para condição de cargas externas estão: deformação imediata, deformação lenta, fluência e deformação lenta recuperável (ALMEIDA, 2002).

A retração é interpretada como a diminuição do volume do concreto do fim da cura até atingir um estado de equilíbrio com as condições ambientais. Para as dimensões geralmente utilizadas, um quarto da retração ocorre ao 7º dia, um terço ao 14º dia, e um meio em 1 mês e três quartos em 6 meses (BASTOS, 2019).

A mudança de temperatura do ambiente não se transmite de forma instantânea no concreto, mas tem uma ação prolongada sobre a variação da temperatura deste, sendo de magnitude menor quando mais distante da superfície exposta ao ar estiver. O coeficiente de dilatação térmica para o concreto armado, com base na NBR 6118, é equivalente a  $10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  (ALMEIDA, 2002).

Quando observada uma deformação instantânea, oriundo de uma carga é aplicada, denomina-se como deformação imediata. Já a deformação lenta é caracterizada como elevação de deformação quando a solicitação é mantida, com a manutenção da carga ao longo do tempo (ALMEIDA, 2002).

O concreto não apresenta um comportamento linear quando submetido a tensões de certa magnitude. Esse fenômeno é verificado devido microfissuração progressiva que tende a ocorrer entre o agregado graúdo e pasta de cimento (ARAÚJO, 2000).

### **Matéria prima e constituintes do concreto**

Empregado usualmente nas estruturas, o concreto, é constituído basicamente de quatro materiais: cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água. O cimento forma a pasta que preenche maior parte dos espaços vazios entre os agregados. Já os agregados são considerados materiais inertes. Os agregados constituem cerca de

60% a 80% do concreto, tendo como principal fator o econômico devido ao agregado possuir um valor inferior a pasta (ANDOLFATO, 2002).

### Cimento Portland

Caracterizados com um material adequado para conectar os agregados, de maneira a formar um corpo sólido, os cimentos Portland são cimentos hidráulicos, caracterizado pela pulverização de clínquer, que é formado em essência por silicatos de cálcio hidratado, com acréscimo de sulfatos de cálcio, dentre outros compostos (ANDOLFATO, 2002).

Alterando a composição do cimento pode-se obter diversos tipos, com distintas características. As especificações da *American Society for Testing and Materials* (ASTM C 150) diferenciam os 5 tipos de cimento Portland, conforme Tabela 1 (ANDOLFATO, 2002).

**Tabela 1.** Tipos de cimento Portland (ASTM 150) indicando composição, resistência a compressão e as principais características.

Tipo'	Característica predominante	Composição (%)				Resistência à compressão (em relação à resistência do cimento tipo I)			
		1	2	3	4	1 dia	7 dias	28 dias	3 meses
I	Tipo de uso corrente Moderado calor de hidratação/	50	24	11	8	1	1	1	1
II	Moderada resistência a sulfatos	42	33	5	13	0,75	0,85	0,90	1
III	Elevada resistência inicial	60	13	9	8	1,90	1,20	1,10	1
IV	Baixo calor de hidratação	26	50	5	12	0,55	0,55	0,75	1
V	Elevada resistência a sulfato	40	40	4	9	0,65	0,75	0,85	1

Sendo: 1 – Silicato tricálcio; 2 – Silicato dicálcio; 3 – Aluminato tricálcio; 4 –  $(CaO)_4(Al_2O_3)(Fe_2O_3)$

Fonte: (ANDOLFATO, 2002)

### Cimento Portland Branco

Dentre todas as virtudes do concreto, a estética teve de ser incrementada com o objetivo do bom manuseio, textura, cor e porção. A produção do concreto com Cimento Portland Branco (CP-B) exibe uma proposta moderna e atual, abrindo novos



horizontes dentro do ramo da Engenharia Civil e diminuindo a necessidade de acabamento da peça final (KIRCHHEIM, 2003).

O CP-B é regulamentado pela NBR 12989, podendo ser classificado em dois tipos: estrutural e não estrutural. O estrutural é aplicado em concretos com o objetivo arquitetônico, exibindo classes de resistência de 25 a 40 MPa, conforme os demais cimentos (KIRCHHEIM, 2003).

O CP-B é desenvolvido pela pulverização de um clínquer de cimento Portland Branco. Pela redução do teor de ferro do clínquer, obtém-se cores mais claras. As quantidades de óxidos de ferro e manganês deste, devem ser inferiores a 0,5% em massa. São obtidas essas condições utilizando argila e rochas carbonatas sem ferro como matéria prima. Devido ao processo de moagem e maior valor agregado a matéria prima, o CP-B é aproximadamente três vezes mais caro que o cimento convencional. Estes são compostos essencialmente de silicato tricálcico, silicato dicálcico, aluminato tricálcico e ferro aluminato tetracálcico. Além destes podem ser encontrados em menores proporções, óxido de sódio e potássio, cálcio livre, potássio, dentre outros (KIRCHHEIM, 2003).

A quantidade de ar incorporado, resistência, retração, trabalhabilidade e velocidade de hidratação são afetados pela finura dos aglomerantes. A maior retração e fissuração podem estar associadas a pasta de cimento com elevada finura. No entanto, estes reduzem a exsudação. Neste, é necessário o aumento da quantidade de gesso para retardamento da reação. Um aumento na quantidade de água na mistura é necessário para melhorar a trabalhabilidade do concreto (KIRCHHEIM, 2003).

#### Agregados miúdos

Os agregados miúdos são oriundos de rochas sedimentares que se fragmentaram até a granulometria solicitada. Estes são comumente encontrado em leitos de rios, tendo seu acúmulo por século. Sua principal função no concreto, é preencher os espaços vazios entre o agregado graúdo, contribuindo para a resistência mecânica do compósito (COSTA, 2016).

As classificações da areia podem ser divididas de acordo com seu módulo de finura, que é a soma das porcentagens acumuladas nas peneiras de série normal,

dividida por 100. Estas são analisadas em areia grossa, média e fina de acordo com seu valor de finura executada na análise granulométrica. Os valores demonstrados na Tabela 2 são indicados pela NBR-7211, com valores aproximados, tendo que esta define as características para o agregado no concreto (ANDOLFATO, 2002).

**Tabela 2.** Granulometria da areia (mm) referência

<b>Areia</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
<b>Areia Grossa</b>	3,35	4,05
<b>Areia Média</b>	2,40	3,35
<b>Areia Fina</b>	1,97	2,40
<b>Areia muito fina</b>	<1,97	1,97

Fonte: (Adaptado, ANDOLFATO, 2002)

#### Agregado graúdo

Os agregados graúdos são oriundos de rochas fragmentadas, que são beneficiadas pelo processo de moagem em diversas granulometrias. A brita tem o principal objetivo de conferir resistência e solidez ao concreto, tendo que quanto maior o diâmetro da brita, melhor a resistência do concreto (COSTA, 2016).

Os agregados graúdos são classificados segundo o tamanho das partículas componentes. A Tabela 3 classifica a brita de acordo com os valores máximo e mínimo da granulometria, classificando de brita 0 a brita 5, tendo que a brita mais comum no concreto é a brita 1 (ANDOLFATO, 2002).

**Tabela 3.** Granulometria da brita (mm) referência

<b>Brita</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
<b>Brita 0</b>	4,8	9,5
<b>Brita 1</b>	9,5	19
<b>Brita 2</b>	19	25
<b>Brita 3</b>	25	50
<b>Brita 4</b>	50	76
<b>Brita 5</b>	76	100

Fonte: (Adaptado, ANDOLFATO, 2002)

### Água

A água para composição do concreto deverá ser, preferencialmente potável, não contendo resíduos industriais ou substâncias orgânicas. Experiências afirmam que diversos sais minerais não prejudicam o concreto, quando em pequenas concentrações (ANDOLFATO, 2002).

### Aditivos

Os aditivos são materiais incorporados aos ingredientes comuns do concreto no período da mistura, para obter propriedades desejáveis, como: redução de calor de hidratação, controle do aumento da resistência, controle do tempo de pega, aumento da plasticidade, dentre outros (COSTA, 2016).

### Composição do Concreto

O traço do concreto, é um processo semiempírico que tem o objetivo de definir as dosagens dos materiais a serem empregadas no compósito, tendo que os cálculos são oriundos de relações experimentais, de maneira a atender a resistência requisitada e a plasticidade do concreto fresco.

### Traço

O traço é o estudo que fornece as quantidades teóricas de materiais de acordo com a técnica de dosagem. A referência do traço do concreto é dada por um saco de cimento de 50Kg. A descrição das siglas para os componentes constituintes do concreto é dada conforme descreve Tabela 4:

**Tabela 4.** Descrição das siglas e componentes do concreto

Sigla	Componente
1	Cimento
X	Água
A	Areia
B	Brita

Fonte: (ANDOLFATO, 2002)

A resistência do concreto está diretamente relacionada com a fração de água imposta. O fator X é determinado de acordo com a resistência média aos 28 dias, conforme dados experimentais médios de cimentos. Sendo assim, com relação entre o peso de água e peso dos sólidos, é possível determinar a relação água/sólidos, em função da resistência média para o 28º dia de cura, conforme Tabela 5 descreve: (ANDOLFATO, 2002).

**Tabela 5.** Fator X em função da resistência

Fator água / cimento = (X) para cimento Portland tipo I	Resistência média aos 28 dias ( $f_{cm}$ )	
	$kgf/cm^2$	$MPa$
0,37	450	45
0,40	400	40
0,45	350	35
0,50	300	30
0,55	250	25
0,60	220	22
0,65	200	20
0,70	175	17,5
0,75	150	15
0,80	130	13
0,90	100	10

Fonte: (ANDOLFATO, 2002)

O valor de Y compõe um dado experimental que está diretamente relacionado com o diâmetro máximo do agregado e da consistência desejada, tendo que existe outros fatores influenciam na determinação, como forma do grão, granulometria, tipo de agregado, dentre outros. Sendo assim, a Tabela 6 relaciona o diâmetro máximo do agregado com os valores de Y, adotando valores aproximados, e aplicáveis para agregados usuais (ANDOLFATO, 2002).

**Tabela 6.** Relação Y para concreto vibrado, em função máxima do agregado.

Diâmetro máximo do agregado $d_{max}$	Concreto sem aditivo	Concreto com aditivo
19 mm	9%	8%
25 mm	8,5%	7,5%

Fonte: (Adaptado, ANDOLFATO, R. P, 2002)

Sendo assim, pode se determinar as massas dos agregados em função de X e Y sem os compostos aditivos conformes equações 1 e 2, sendo que B e A são brita e areia, respectivamente (ANDOLFATO, 2002).

$$B = 0,5 \frac{X}{Y} \quad (1)$$

$$A = 0,5 \frac{X}{Y} - 1 \quad (2)$$

#### Consumo de cimento

O cálculo do consumo de cimento C dado em  $kg.m^{-3}$  pode ser verificado pela Equação 3, onde lado esquerdo da equação corresponde ao volume de 1000 litros subtraído por 1,5% de volume em ar correspondente ao volume incorporado a mistura. No lado direito da equação é representado o volume de cada material, tendo que  $m_c$  é a massa específica do cimento,  $m_x$  massa específica da água,  $m_a$  massa específica da areia,  $m_b$  massa específica da brita (COSTA, 2016).

$$1000 - 1,5\% = C \left( \frac{1}{m_c} + \frac{X}{m_x} + \frac{A}{m_a} + \frac{B}{m_b} \right) \quad (3)$$

Modelando de acordo com a massa específica de cada material, pode-se obter a equação 4 (COSTA, 2016):

$$C = \frac{985}{0,32 + X + 0,384 \cdot A + 0,364 \cdot B} \quad (4)$$

### Classificação do concreto

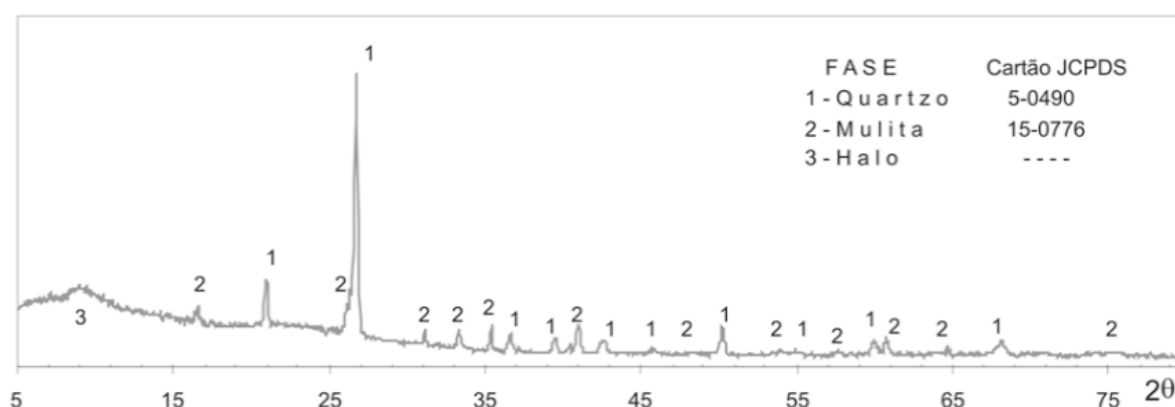
A mistura do cimento, água conjugado com o agregado miúdo, resulta na argamassa. Já o concreto simples, é formado por agregado graúdo e miúdo, cimento e água. O concreto armado é a associação do concreto simples com uma armadura, geralmente constituída de barras de aço. O concreto protendido, partes da armadura possui tensões previamente aplicadas. O concreto de alto desempenho (CAD), apresenta características superiores ao concreto tradicional, principalmente para aplicações referentes ao comportamento estrutural, durabilidade, estética, adensamento.

## 2.3. ESTUDOS DA LITERATURA

A reciclagem, atualmente, do ponto de vista econômico, social e ambiental é uma das ferramentas essenciais para direcionar um resíduo a uma nova rota de utilização. Os resíduos das cerâmicas de isoladores elétricos se exibem em abundância na sociedade, e existe a necessidade de desenvolvimento de rotas de reciclagem para esse caso. A inserção das cerâmicas no concreto necessita de uma sedimentação teórica para comprovação de bom rendimento. Com isso, o objetivo do capítulo é descrever os modelos físicos, químicos e mecânicos do compósito, de maneira a introduzir os dados para pesquisa.

### **Modelo Físico-Químico**

De acordo com Alarcon et al (2004) para os isoladores elétricos de porcelana comerciais, o difratograma de raio X, exibe a presença de mulita ( $Al_6Si_2O_{13}$ ), quartzo e de fase vítrea conforme Figura 2:

**Figura 2.** Fases presentes em isoladores elétricos de porcelana

Fonte: (SOUZA; DAS NEVES; ALARCON, 2004)

A composição dos isoladores elétricos e das matérias primas poderão ser verificadas na Tabela 7, conforme descrição do fabricante dos isoladores elétricos (FERREIRA; RIBAS; SOUZA; BRAGANÇA, 2018).

**Tabela 7.** Composição química das matérias primas e isolador elétrico

(%) Massa	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	$MgO$	$CaO$	$Na_2O$	$K_2O$	$P_2O_5$
<b>Feldspato</b>	66,0	19,4	0,07	0,10	0,06	2,50	11,4	0,42
<b>Isolador</b>	70,0	24,0	0	0	0	1,0	5,0	0
<b>Caulim</b>	57,0	29,8	0,78	0,1	<0,05	<0,05	0,67	0,06
<b>Alumina (almatis)</b>	0	99,8	0	0	0	0	0	0
<b>Quartzo</b>	99,8	0,12	0,08	0	0	0,03	0,06	0,02

Fonte: (FERREIRA; RIBAS; DE SOUZA; BRAGANÇA, 2018)

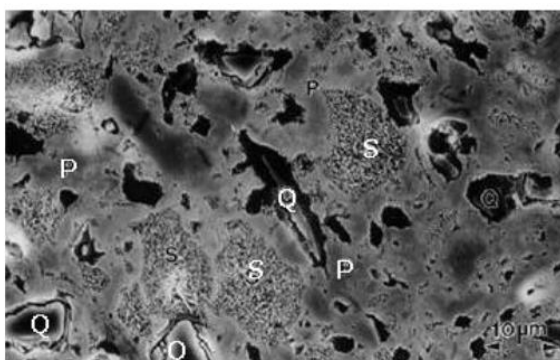
Os isoladores elétricos de porcelana que exibem qualidade no material, demonstram valores de massa específica na faixa de  $2,2 \text{ g.cm}^{-3}$  a  $2,5 \text{ g.cm}^{-3}$ , e resistência a compressão, na faixa de 50 MPa a 140 MPa (BONETTI, 2009).

A microestrutura das porcelanas é definida primordialmente pela presença das fases cristalinas, onde é possível verificar o contorno de partículas refratárias, nas quais as mesmas são envoltas por uma matriz vítrea. A forma, tamanho, distribuição

incluindo a porosidade e as fases cristalinas, são parâmetros triviais da microestrutura do material, que de fato, afetam suas propriedades (BONETTI, 2009).

A microestrutura característica de uma porcelana C110, pode ser verificada na Figura 3. As fases presentes são o quartzo, mulita e a fase vítrea. O quartzo (Q) confere o reforço estrutural. A mulita desenvolvida com base nos componentes plásticos, denomina-se mulita primária (P), e a que se forma com base no feldspato, é caracterizada por mulita secundária (S).

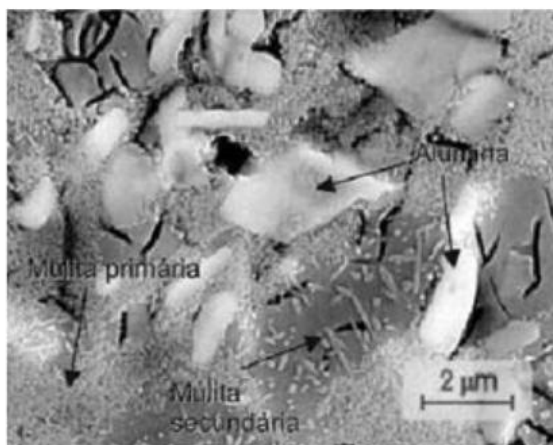
**Figura 3.** Micrografia evidenciando os microconstituintes de uma porcelana C110 com ataque químico.



Fonte: (BONETTI, 2009)

Já na Figura 4, poderá ser verificada a microestrutura característica de uma porcelana C120, na qual pode se verificar a presença de partículas de mulita primária, secundária e alumina.

**Figura 4.** Micrografia evidenciando os microconstituintes de uma porcelana C120.

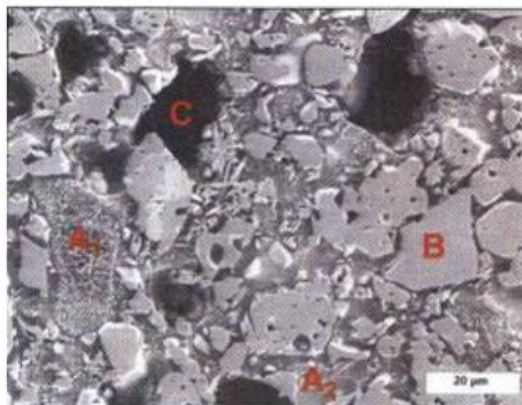


Fonte: (BONETTI, 2009)



Na Figura 5, pode ser verificada a microestrutura de uma porcelana C130, fabricada com base na Bauxita, onde a letra (B) representa a alumina, a letra (C) representa as porosidades presentes na microestrutura, que acabam sendo responsáveis pelas falhas presentes nas porcelanas aluminosas. Já ( $A_1$ ), representa a mulita primária e ( $A_2$ ), a fase vítrea (BONETTI, 2009).

**Figura 5.** Micrografia evidenciando os microconstituintes de uma porcelana C130.



Fonte: (BONETTI, 2009)

### **Propriedades mecânicas**

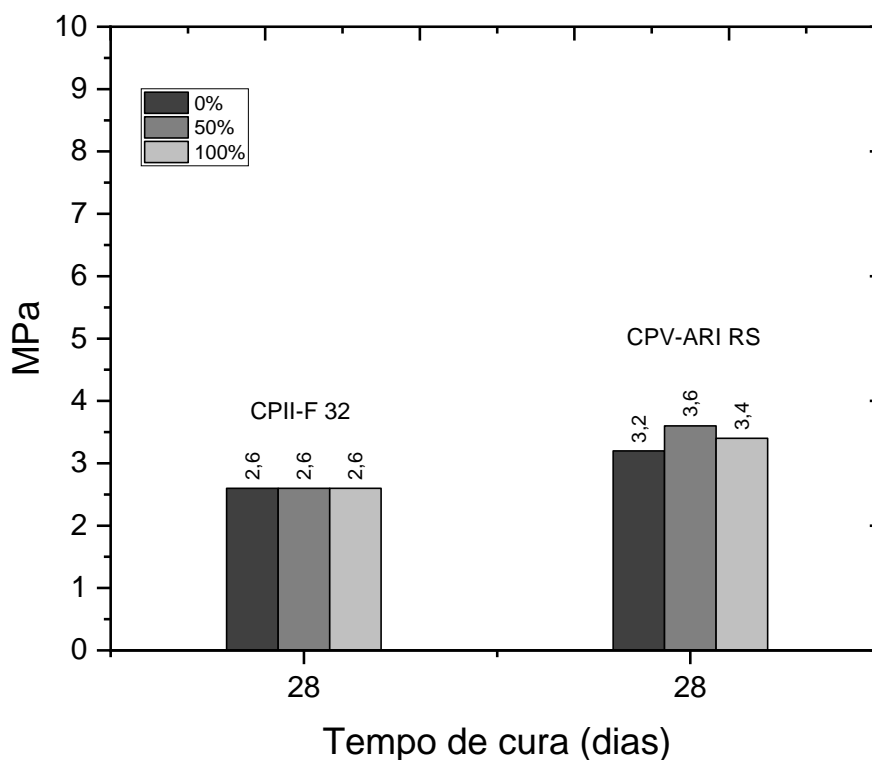
Com base nos resultados de Portella et al (2006), onde foi utilizado isoladores elétricos de porcelana como agregados graúdo e miúdo no concreto, com substituição de 0% dos agregados naturais, 50% dos agregados miúdos e graúdos naturais e 100% dos agregados naturais. Sendo que para cada traço, foram utilizados cimentos distintos CII-F 32 e CPV-ARI RS respectivamente, conforme descreve Tabela 8. Com isso, foram realizados os ensaios de tração a compressão diametral e flexão, sendo encontrados resultados superiores aos corpos ensaiados com o cimento CPV-ARI RS, justificando que a melhor resposta do cimento está associada a finura do mesmo, juntamente a inibição dos ataques de sulfato devido ao uso do cimento especial, pelo fato, das dosagens com agregados cerâmicos exibirem muitos finos contaminantes. Os resultados referentes a tração por compressão diametral e tração aos corpos aos 28 dias, são demonstrados no Gráfico 1 e 2.

**Tabela 8.** Características de dosagem para confecção dos concretos CII-F 32 e CPV-ARI RS em ensaios mecânicos

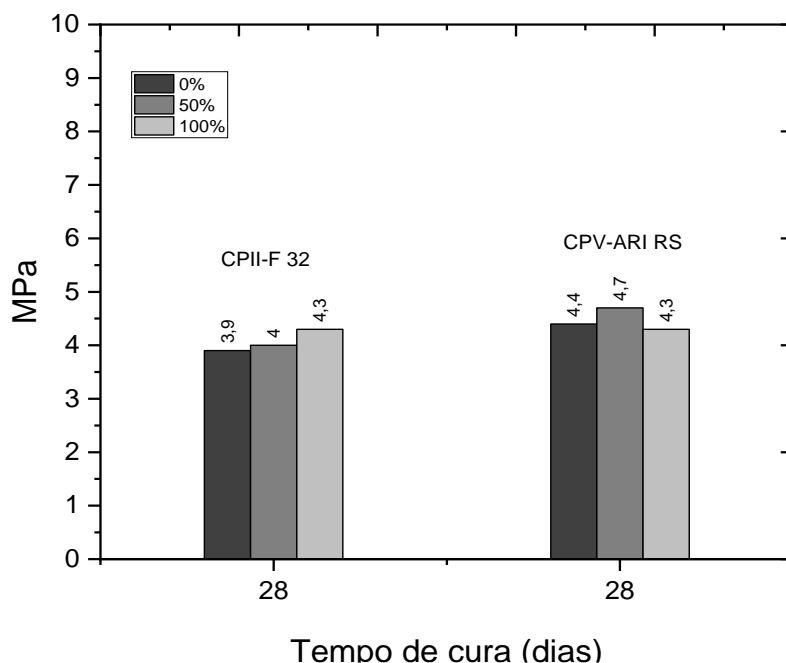
Dosagem	CII-F 32			CPV-ARI RS		
	0%	50%	100%	0%	50%	100%
<b>Agregados artificiais</b>						
<b>Cimento (kg/m<sup>3</sup>)</b>	360	347	344	358	343	342
<b>Areia natural (kg/m<sup>3</sup>)</b>	728	351	695	724	347	691
<b>Areia artificial (kg/m<sup>3</sup>)</b>	0	351	0	0	347	0
<b>Brita natural (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1073	518	0	1067	512	0
<b>Brita artificial (kg/m<sup>3</sup>)</b>	0	518	1026	0	512	1020
<b>Água (kg/m<sup>3</sup>)</b>	184	177	176	183	175	175

Autor: (PORTELLA, JOUKOSKI, FRANCK, DERKSEN, 2006)

**Gráfico 1.** Resistência mecânica por tração por compressão diametral

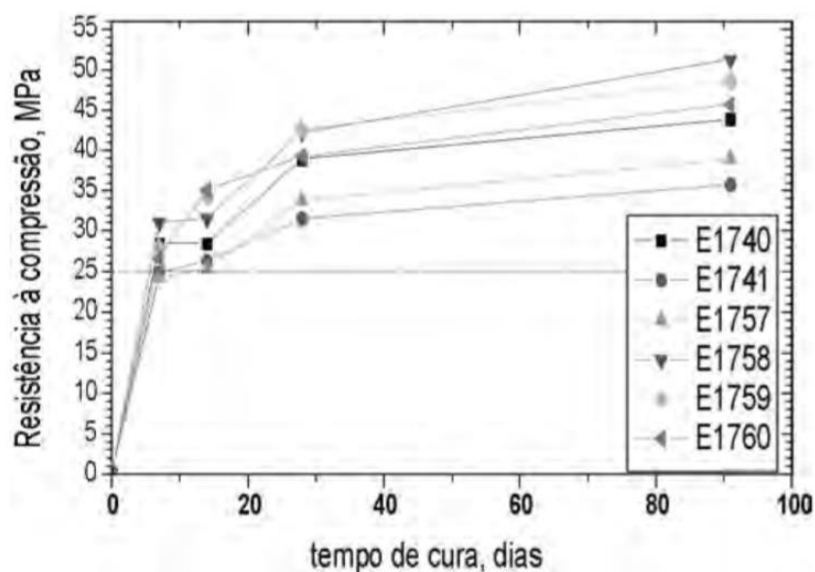


Fonte: (PORTELLA, et al., 2006)

**Gráfico 2.** Resistência mecânica por tração na flexão

Fonte: (PORTELLA, et al., 2006)

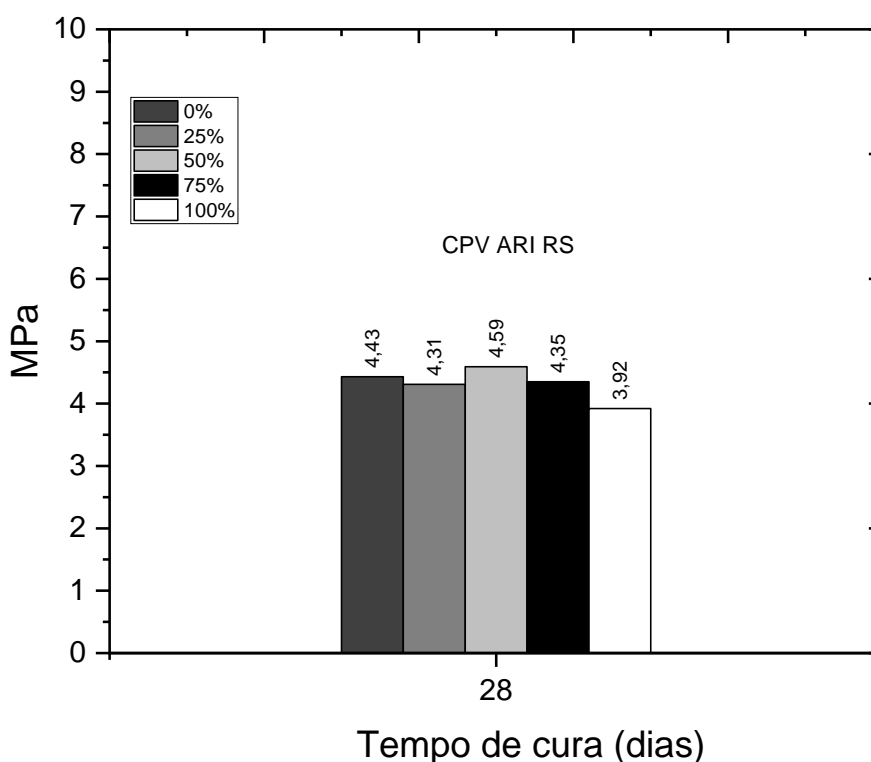
Para a resistência a compressão simples, é demonstrado a curva de desempenho dos concretos para cura até 91<sup>o</sup> dias, conforme demonstra Figura 6. É observável que os valores com a utilização do CPV-ARI RS atingiram maiores respostas de resistência, no entanto, os concretos com resíduo exibiram um menor consumo de cimento, sendo que o concreto referência demonstrou resistência superior a 10%, podendo ser igualada na condição dos consumos.

**Figura 6.** Resistência mecânica a compressão

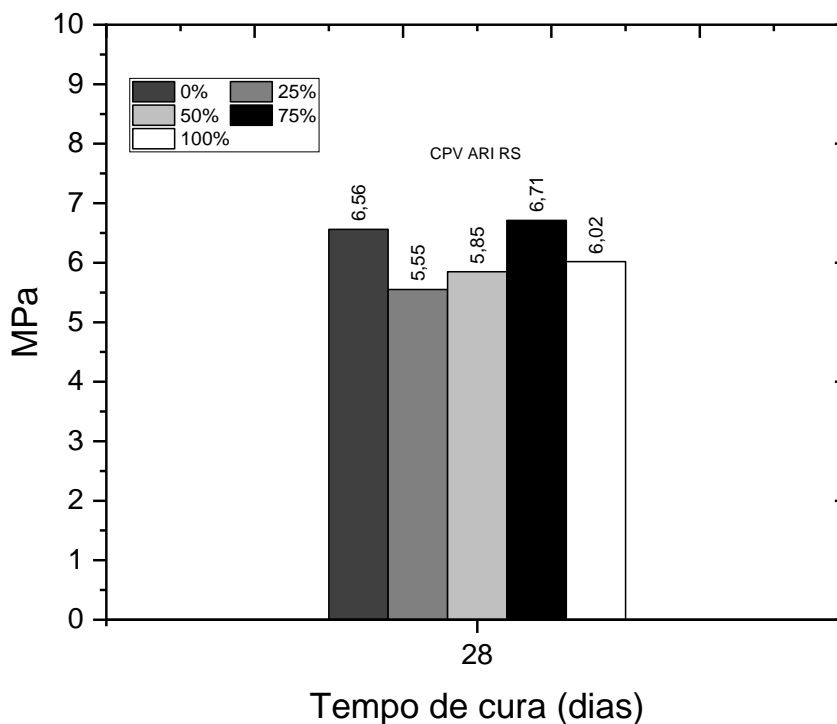
Fonte: (PORTELLA, et al., 2006)

De acordo com os resultados de Campos (2009), foram desenvolvidos corpos de prova com agregados oriundos de isoladores elétricos em substituição de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%, com traço 1: 2: 1,5: 1,5: 0,47 (cimento: areia: brita 0: brita 1: água), sendo utilizado cimento CPV ARI. A nomenclatura para as devidas substituições se dá da seguinte forma: AG25 – Substituição de agregado graúdo em 25%, AG50 - Substituição de agregado graúdo em 50%, e assim sucessivamente. Com isso, para o ensaio de compressão diametral ao 28º dia de cura, pode ser observado que os valores ficaram inferiores ao valor de referência com exceção para o AG50 que exibiu a maior resistência a tração por compressão diametral. Já para o ensaio de flexão pôde ser observado no 28º dia de cura, que os valores de substituição de 25%, 50% e 100% ficaram inferiores ao valor de referência, já para os valores de substituição de 75% houve um aumento superior a referência. Conforme mostra Gráfico 3 e 4:

**Gráfico 3.** Resistência mecânica a tração por compressão diametral

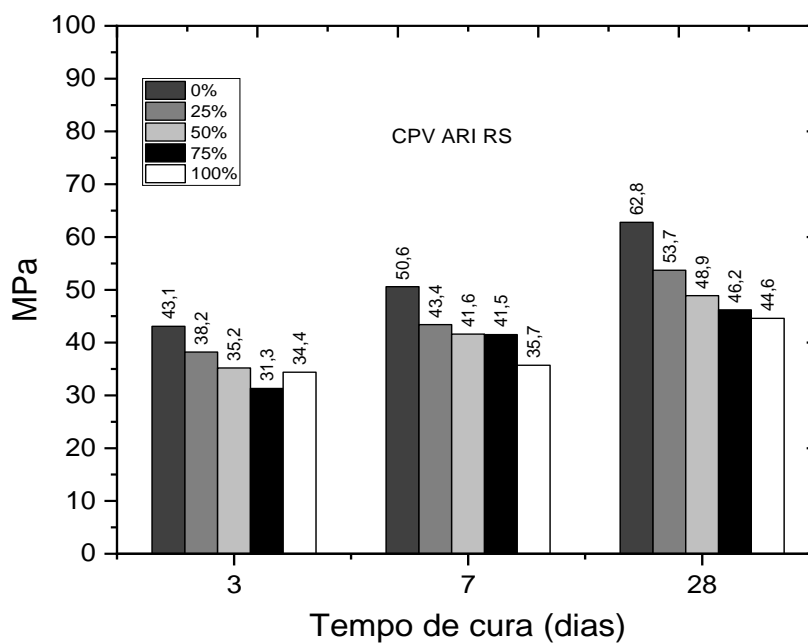


Fonte: (CAMPOS, 2009)

**Gráfico 4. Resistência mecânica a tração na flexão**

Fonte: (CAMPOS, 2009)

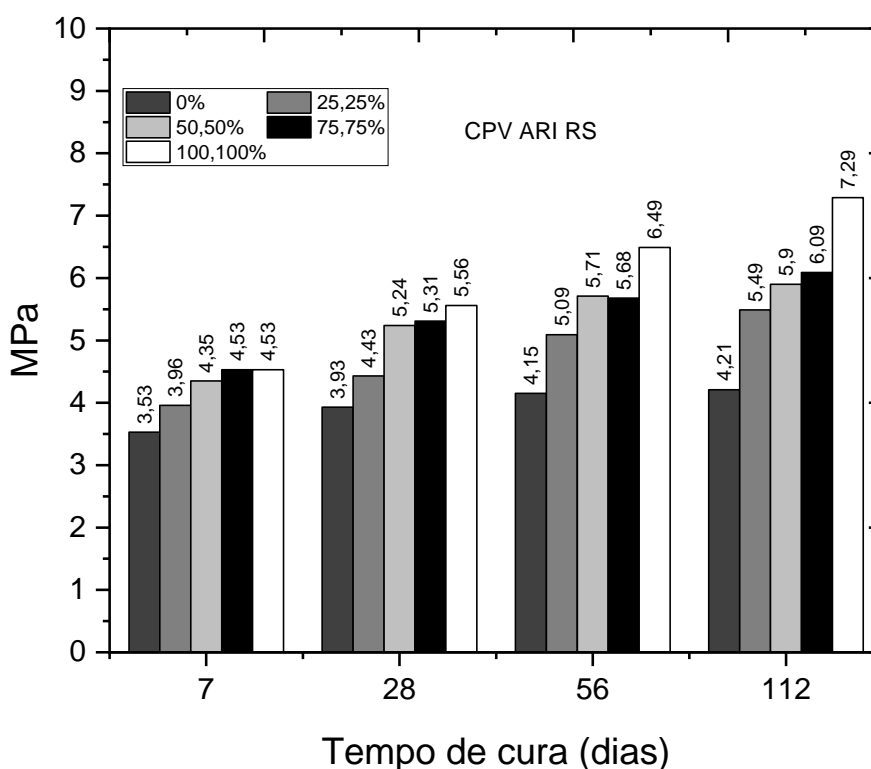
Já para o ensaio a compressão simples em cura úmida, pôde ser verificado que os valores de substituição de 25%, 50%, 75% e 100%, ficaram inferiores aos valores de referência para o 3<sup>o</sup>, 7<sup>o</sup> e 28<sup>o</sup> dia de cura, conforme demonstra Gráfico 5:

**Gráfico 5. Resistência mecânica a compressão**

Fonte: (CAMPOS, 2009)

Com base em Campos e Paulon (2015), onde foram utilizados agregados oriundos das cerâmicas de isoladores elétricos de porcelana em substituição dos agregados graúdos e miúdos naturais em 25%, 50%, 75% e 100%, com uso do cimento CPV ARI, e aditivo superplastificante, com traço equivalente à 1:2:3:0.40:0.0064 (cimento: agregado miúdo: agregado graúdo: água: aditivo superplastificante). Pôde ser verificado, que a partir do 7º dia de cura, já se pode constatar resultados satisfatórios, no ensaio de resistência a tração por compressão diametral, com a substituição dos agregados graúdos e miúdos de cerâmica no concreto. A melhora se torna constante de acordo com o tempo de cura e aumento da substituição por agregados oriundos da cerâmica conforme indicado no Gráfico 6. A justificativa para as respostas satisfatórias, está na substituição combinada dos agregados de porcelana miúdo e graúdo, que exibiu uma maior resistência devido a sua controlada distribuição.

**Gráfico 6.** Resistência mecânica à tração por compressão diametral

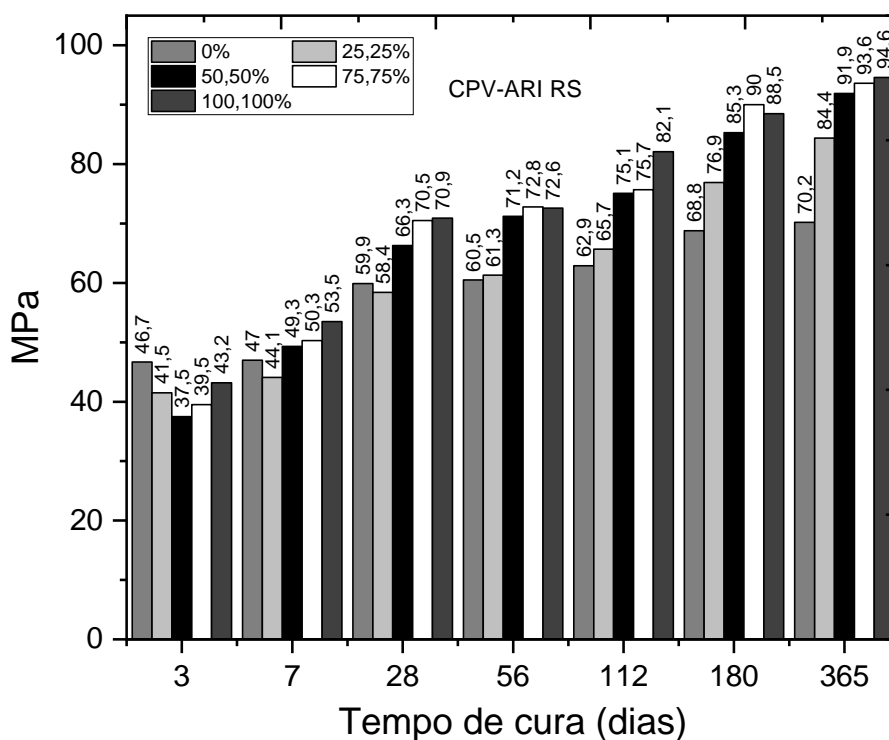


Fonte: (CAMPOS; PAULON, 2015)

Já nos ensaios de resistência compressão simples, pôde ser observado nos 3 dias iniciais de cura, as resistências dos corpos de prova oriundos de agregados artificiais, sendo inferiores ao corpo de prova referência. Porém, a partir do 7º dia de

cura, pôde ser observado o aumento da resistência a compressão associado a substituição dos agregados no concreto conforme Gráfico 7 exhibe. A justificativa se dá devido a melhor distribuição granulométrica dos agregados artificiais, que entregam ao concreto um melhor adensamento, associado a ausência de material orgânico e a baixa capacidade de absorção de água.

**Gráfico 7.** Resistencia mecânica a compressão simples



Fonte: (CAMPOS; PAULON, 2015)

Com base em Vieira (2017), foram moldados os corpos de prova, estabelecendo uma relação de água e cimento de 0,55, utilizando o cimento CPIV 32, aditivo superplastificante, brita natural, brita sintética oriundo do resíduo de isoladores elétricos, areia natural, com o traço, conforme demonstra Tabela 9. As substituições foram realizadas em 0% dos agregados graúdos naturais, 45% dos agregados graúdos naturais e 100% dos agregados graúdos naturais. O Gráfico 8, demonstra os valores médios, verificados no ensaio a resistência a compressão para as distintas dosagens. Expondo que inicialmente o concreto referência exhibe um melhor resultado nos dias iniciais, a justificativa a esse fenômeno, está associada a duas características: forma do agregado e região esmaltada. A forma do agregado, dificulta uma superior compacidade da estrutura granular, ocasionando uma região distante

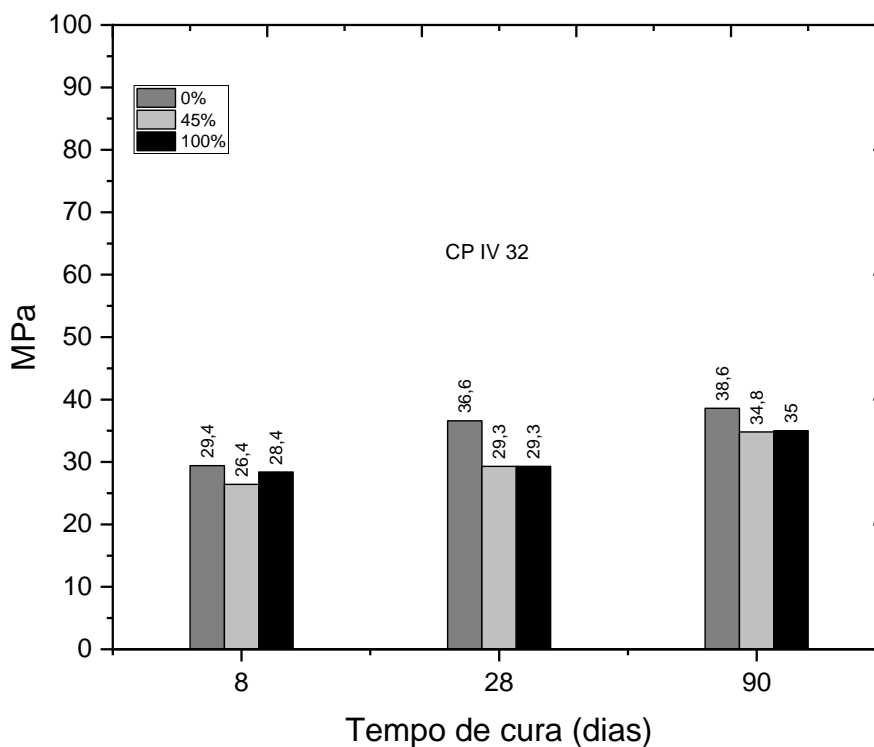
entre os grãos dos agregados e cimento, exibindo uma zona de transição com uma maior fragilidade. A região esmaltada, está associada a redução de pontos de ancoragem dos produtos de hidratação do cimento na parte superior do resíduo.

**Tabela 9.** Características de dosagem para confecção dos concretos

Dosagem	CPIV 32		
	0%	45%	100%
Agregados artificiais			
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	314	326	363
Areia natural (kg/m <sup>3</sup> )	715	712	653
Areia artificial (kg/m <sup>3</sup> )	0	0	0
Brita natural (kg/m <sup>3</sup> )	1123	595	0
Brita artificial (kg/m <sup>3</sup> )	0	486	992
Água (kg/m <sup>3</sup> )	173	179	200
Superplastificante (kg/m <sup>3</sup> )	0,942	0	1,089

Fonte: (VIEIRA, 2017)

**Gráfico 8.** Resistencia mecânica à compressão simples

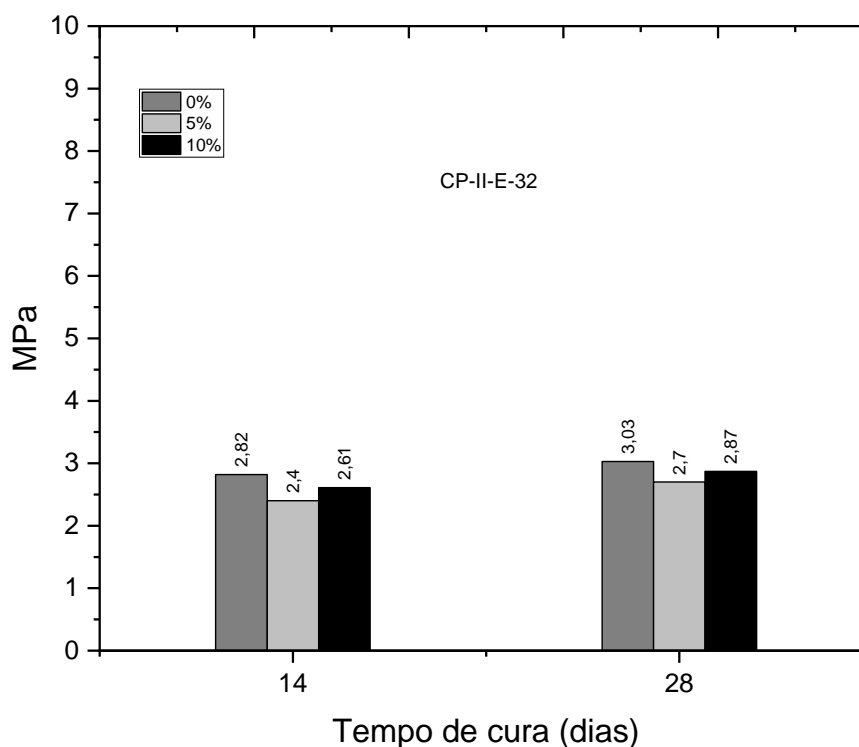


Fonte: (VIEIRA, 2017)



Com base em Ribeiro et al (2019), foram moldados 24 corpos de prova com areia média, brita com granulometria equivalente a 1, cimento CII E 32, isoladores elétricos de porcelana triturado, com granulometria equivalente a brita 1, e aditivo plastificante Cemix 2000. Com isso, foram realizadas a substituição do agregado oriundo dos isoladores elétricos de porcelana em 5% e 10%, em massa, com o traço equivalente a 1: 1,48: 2,46: 0,5. A representação dos teores de substituição é equivalente a REF – 0% de substituição de agregados de isoladores de porcelana, 5RP- 5% de substituição de agregados de isoladores de porcelana e 10RP- 10% de substituição de agregados de isoladores de porcelana. Neste, os corpos de prova são submetidos ao ensaio resistência a tração por compressão diametral e resistência a compressão ao 14º e 28º dia de cura. No ensaio de tração por compressão diametral, os valores de resistência foram superiores no 28º dia de cura para todas as amostras. Visto que, para a substituição de 5% e 10% dos agregados oriundos dos isoladores elétricos, para cura de 28 dias, houve uma diminuição dos valores de resistência em função da amostra referência. Conforme demonstra Gráfico 9.

**Gráfico 9.** Resistência mecânica a tração por compressão diametral

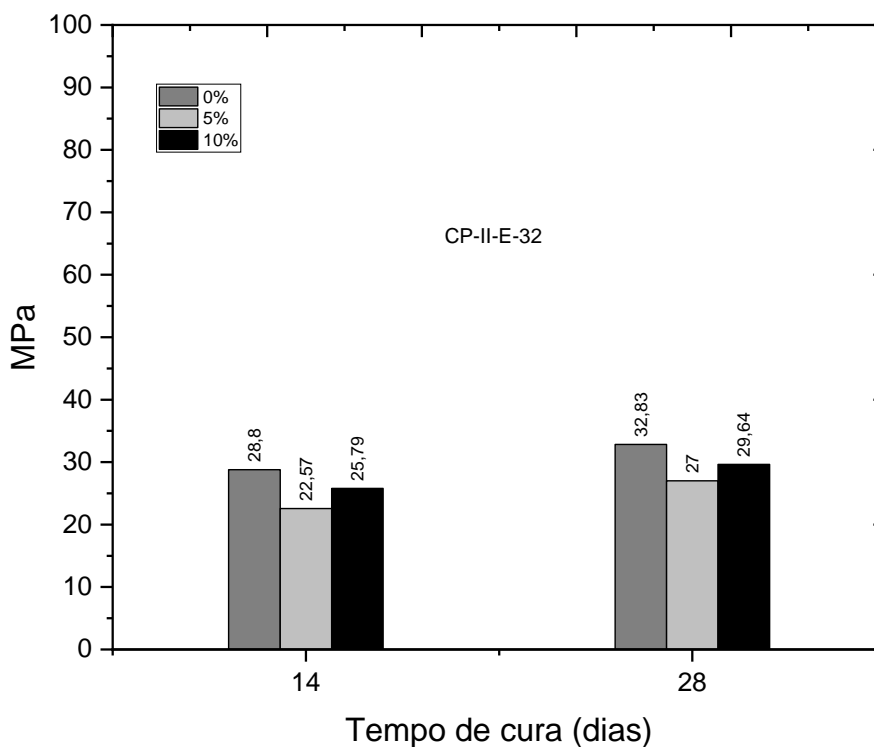


Fonte: (RIBEIRO, et al., 2019)

Já para os ensaios de compressão simples, pôde ser observado que os valores de resistência a compressão para a substituição de 5% e 10% dos agregados oriundos

dos isoladores elétricos, foram inferiores ao valor referência, com 0% de substituição, conforme demonstra Gráfico 10. No entanto, isso é justificado por uma maior inclusão de ar aprisionado, quando realizado a substituição do agregado, juntamente com a má aderência entre a pasta do cimento e o agregado oriundo dos isoladores elétricos.

**Gráfico 10.** Resistência mecânica a compressão simples



Fonte: (RIBEIRO, et al., 2019)

### Absorção por água

De acordo com Vieira (2017), a definição de condução de líquidos em sólidos porosos oriundos da tensão superficial atuando nos capilares é a absorção de água. No entanto foram desenvolvidos corpos de prova, estabelecendo uma relação de água e cimento de 0,55, utilizando o cimento CPIV 32, aditivo superplastificante, brita natural, brita sintética oriunda do resíduo de isoladores elétricos, areia natural, areia sintética oriunda dos resíduos de isoladores elétricos. A nomenclatura utilizada para identificar os percentuais de substituição, foi definida referenciando a quantidade de resíduo substituído, onde AD em adição, AM agregado miúdo e AG agregado graúdo. Sendo assim, os valores obtidos pelo ensaio, determina a quantidade em percentual de absorção de água realizados em corpos cilíndricos, tendo que quanto maior a

substituição de agregado oriundo de isoladores, se eleva o valor de absorção de água, conforme descreve Tabela 10.

**Tabela 10.** Respostas do ensaio de índice de absorção em dosagens de substituição

Concreto	Absorção (%)			Desvio Padrão (GPa)		
	8 dias	28 dias	91 dias	8 dias	28 dias	91 dias
0%	5,96	6,29	6,13	0,11	0,11	0,32
45%	6,07	7,05	6,90	0,02	0,20	0,07
100%	7,64	7,24	7,24	0,12	0,18	0,19

Fonte: (VIEIRA, 2017)

De acordo com os resultados de Campos (2009), foram desenvolvidos corpos de prova com agregados oriundos de isoladores elétricos em substituição de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%, com traço 1: 2: 1,5: 1,5: 0,47 (cimento: areia: brita 0: brita 1: água), sendo utilizado cimento CPV ARI. A nomenclatura para as devidas substituições se dá da seguinte forma: AG 25 – Substituição de agregado graúdo em 25, AG 50 - Substituição de agregado graúdo em 50, e assim sucessivamente. Para o ensaio de índice de absorção pôde ser verificado, que as substituições em 50% e 75% exibem um valor superior a referência, conforme demonstra Tabela 11.

**Tabela 11.** Respostas do ensaio de índice de absorção em dosagens de substituição

Ensaio	Idade	Traço				
		0%	25%	50%	75%	100%
Quantidade de água absorvida	28 dias	30,4	24,5	35,1	35,6	22,3

Fonte: (CAMPOS, 2009)

## 2.4. ANÁLISE DE VARIANCIA (ANOVA)

A ferramenta de análise de variância (ANOVA), tem o objetivo de realizar comparação entre vários estratos de interesse ou vários grupos de dados. Esta análise estatística, permite avaliar a existência de diferenças significativas entre os grupos de dados. (PAESE, CATEN, RIBEIRO, 2001).

A ANOVA é um modelo estatístico que avalia se o valor médio de duas ou mais populações são distintas ou equivalentes, através de duas hipóteses, descrita como alternativa e a nula. Na hipótese alternativa, o valor médio dessa população é distinto, significando que um dos tratamentos avaliados apresentou diferença dos demais. Já na hipótese nula, o valor médio dessas populações é equivalente, tendo que estatisticamente, os tratamentos são iguais, não foram significantes (ROCHA, JUNIOR, 2018).

Tendo o modelo estatístico genérico para esta, é dado conforme Equação 12 (VIEIRA, 2017):

$$x_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha\beta_{ij} + \epsilon_i \quad (12)$$

Onde

$\mu$  = média geral;

$\alpha_i$  = influência da variável independente substituição do resíduo;

$\beta_j$  = influência da variável independente idade do ensaio;

$\alpha\beta_{ij}$  = influência da interação das variáveis independentes;

$\epsilon_{ij}$  = medida do erro experimental, onde  $\epsilon_{ij} \rightarrow N(0, \sigma)$ .

## 2.5. GESTÃO DE RESÍDUO

Os resíduos sólidos se destacam, uma vez que sua dispersão é inferior aos resíduos líquidos e gasosos. De fato, os resíduos sólidos exibem uma característica bastante importante, uma significativa parte destes se encontram nas próprias

residências dos grandes centros urbanos. Isso faz com que haja uma mínima contribuição para reduzir o descarte incorreto (JUNIOR, TAGLIAFERRO, 2022).

O conhecimento sobre o meio ambiente, as suas implicações, até mesmo o volume dos resíduos sendo descartados, definiram uma nova qualificação para a problemática, e assim, sucessivamente um aumento da consciência ambiental (LAVNITCKI; BAUM; BEEGATO, 2018).

Os resíduos eram encarados como restos do processo produtivo, responsáveis pela geração de diversos problemas ambientais. No entanto, as medidas de tratativa dos resíduos sólidos, fez com que, estimulassem o setor, pelo fato de o resíduo possui um valor agregado, pelo reaproveitamento no próprio processo produtivo (JUNIOR, TAGLIAFERRO, 2022).

O Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), exhibe instrumentos para gerenciamento dos resíduos sólidos. Esta atribui responsabilidade aos geradores e poder público, além das ferramentas para propiciar um consumo adequado e sustentável, e como instrumento principal a reciclagem, reutilização e práticas de destinação adequada dos resíduos (LAVNITCKI; BAUM; BEEGATO, 2018).

O PNRS coloca o Brasil entre os principais países desenvolvidos, em patamar de igualdade. Diversos problemas, são enfrentados devido à falta de infraestrutura e fiscalização (LAVNITCKI; BAUM; BEEGATO, 2018).

### **Normas e regulamentos**

No Brasil, o PNRS, publicado em agosto de 2012, conduz o país a implementação de gestão ambiental efetiva dos resíduos sólidos. O PNRS, de fato, procura alcançar o cenário ideal em relação aos resíduos sólidos, trabalhando sob seus objetivos principais de reduzir, reutilizar, não gerar, reciclar, tratar e finalmente destinar os resíduos sólidos de forma correta, dentro dos padrões de sustentabilidade (LAVNITCKI; BAUM; BEEGATO, 2018).

O PNRS, orienta as empresas e geradores dos resíduos, que estes destinem o resíduo de forma correta, gerenciando, direcionando preferencialmente a não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento ou descarte adequado (JUNIOR, TAGLIAFERRO, 2022).

O propósito principal do PNRS, diante da crescente produção de resíduos sólidos, é incitar a coleta seletiva, reciclagem e o reaproveitamento de todo possível resíduo (LAVNITCKI; BAUM; BEEGATO, 2018).

O resíduo no setor da construção civil é gerenciado pela resolução CONAMA nº. 307/02, que tem como objetivo principal minimizar ou extinguir os impactos ambientais incitados pelos resíduos da área civil, determinando critérios, diretrizes e procedimentos (MATOS; ALENCAR, 2019).

Os resíduos da construção civil, demonstram a necessidade de implementação de medidas de gerenciamento, devido ao seu volumoso desperdício, principalmente nas etapas que integram o processo. De fato, a minimização é o ponto primordial para o gerenciamento ser efetivo. Atualmente, o incentivo de implementação de práticas inovadoras é primordial. O uso de reciclagem dos próprios produtos e reuso, surgem como portas para o processo de gerenciamento dos resíduos (MATOS; ALENCAR, 2019).

### **Reciclagem**

A Política Nacional de Resíduos Sólidos, guia os geradores e empresas, para que estes destinem o resíduo de forma correta. Devido a produção crescente de resíduos sólidos, a PNRS estimula a coleta seletiva, a reciclagem e reaproveitamento, sendo que, o que não é possível ser reaproveitado, poderá ser denominado como rejeito (LAVNITCKI; BAUM; BEEGATO, 2018).

É primordial no processo de reciclagem e reutilização, o procedimento de coleta seletiva. De 2010 a 2015 houve um aumento no índice de coleta seletiva no Brasil de 1,8%, sendo que o índice de coleta é superior ao índice de destinação adequada. Isso exhibe, uma deficiência no setor, e por conseguinte mostra um crescente no setor da coleta seletiva que é primordial inicialmente (JUNIOR, TAGLIAFERRO, 2022).

Adjunto ao aproveitamento dos resíduos sólidos, a logística reversa, atrelada ao PNRS exhibe um instrumento de gestão, incentivando o ciclo de vida do produto, e utilizando o reaproveitamento de suas energias (LAVNITCKI; BAUM; BEEGATO, 2018).

Tratando de reciclagem no Brasil, somente o plástico, papel e alumínio, se demonstram participativos no panorama de reutilização. Contudo, o Brasil apresenta

um caminho para um aumento dos produtos reciclados. Há demanda de integração dos cidadãos, poder público e empresas, além de programas que consistam em atender distintos tipos de resíduos (LAVNITCKI; BAUM; BEEGATO, 2018).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, será descrito os materiais utilizados na pesquisa, juntamente com o descritivo experimental para confecção dos corpos de prova e a metodologia empregada nos ensaios.

#### 3.1. MATERIAIS

Para produção e fabricação do concreto, serão descritos os materiais que são utilizados, bem como a obtenção dos mesmos.

Foi fixada a granulometria para o agregado graúdo natural e sintético próximo a brita 1, dentro das faixas 9,5 mm a 19 mm, para o agregado miúdo, areia fina equivalente a 1,97 mm a 2,40 mm, e cimento CPB.

#### **Resíduos das porcelanas como agregado graúdo**

Como material referência da pesquisa, os resíduos de isoladores elétricos de porcelana foram coletados aproximadamente 110 kg, na empresa Comercial BRASMERO, no município de Volta Redonda - RJ e processados no laboratório do UNIFOA, conforme demonstra Figura 7.

**Figura 7.** Isoladores Elétricos de Porcelana em transporte



Fonte: Autor, 2021



### **Agregado Graúdo natural**

O agregado graúdo natural utilizado, foi a brita 1 com limites dimensionais de próximos a 9,5 mm a 19 mm, cedidas pelo UniFoa aproximadamente 140 kg, oriundas da região Sul Fluminense, exibindo características contínua e bem graduada, conforme demonstra Figura 8.

**Figura 8.** Brita utilizada na pesquisa.



Fonte: Autor, 2021

### **Agregado Miúdo natural**

Foi utilizado 150 kg de areia comum, cedida pelo UniFoa, proveniente de Rios da região Sul Fluminense, com granulométrica de areia fina, conforme demonstra Figura 9.

**Figura 9.** Areia utilizada na pesquisa

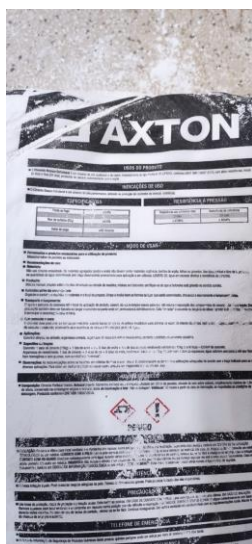


Fonte: Autor, 2021

## Cimento

Neste trabalho, foi utilizado o Cimento Portland Branco (CPB), com objetivo de verificar suas propriedades, aliados com a substituição do agregado graúdo. Conforme demonstra Figura 10.

**Figura 10.** Cimento CPB utilizado na pesquisa



Fonte: Autor, 2021

O cimento adquirido, exibe baixos teores de óxido de ferro e manganês, cuja sua caracterização física e química pode ser verificada conforme demonstra o Datasheet na Tabela 12, com dados do fabricante.

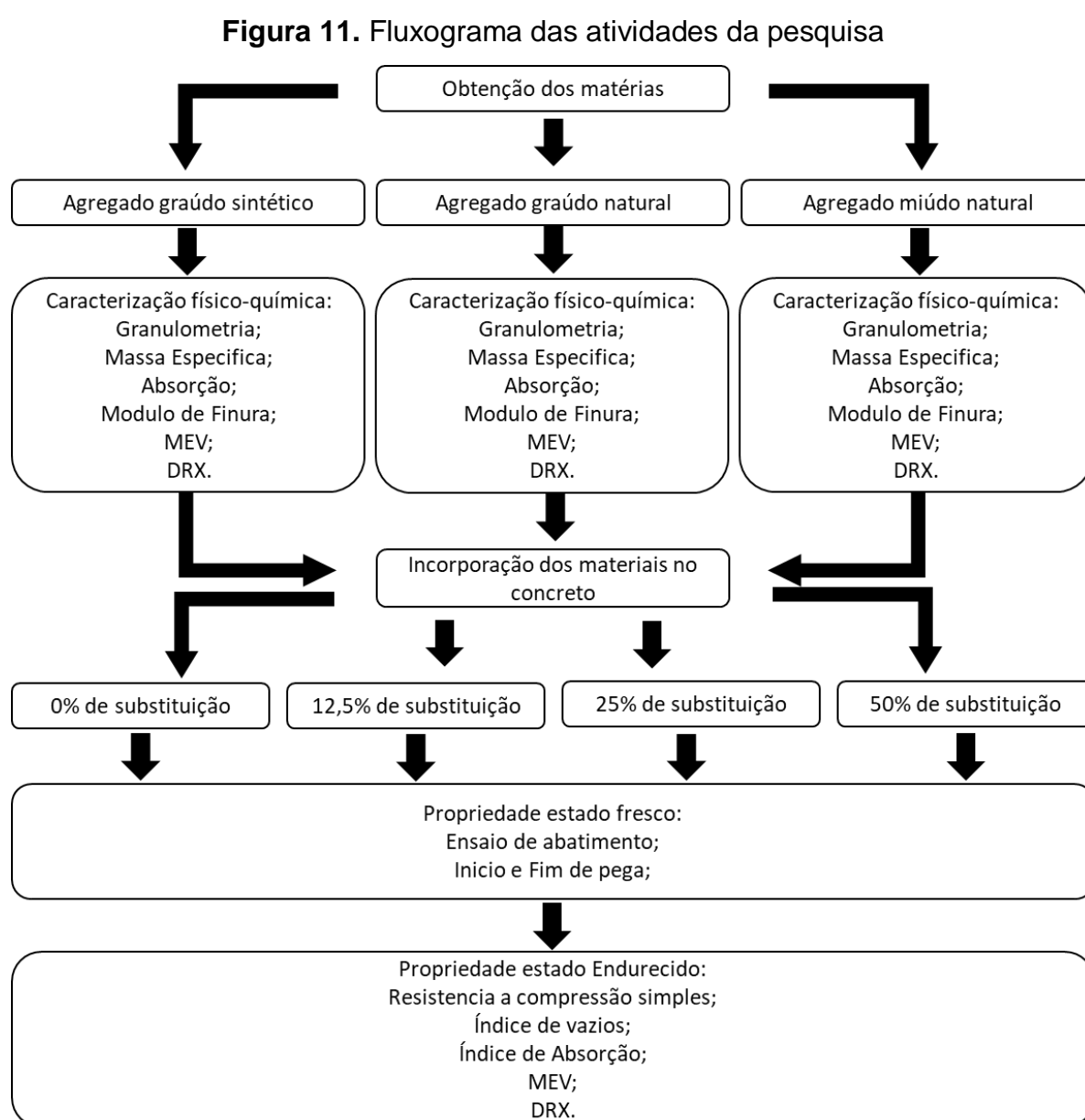
**Tabela 12.** Características físicas do cimento CP-B

Ensaio	Fabricante
Perda ao Fogo	≤5,0%
Teor de sulfatos (SO <sub>2</sub> )	≤4,0%
Tempo Pega (min)	Início ≥45 min
	2 dias >37MPa
Resistência à Compressão (MPa)	28 dias ≥60MPa

Fonte: (Adaptado Datasheet, 2021)

### 3.2. MÉTODOS

A Figura 11, mostra o Fluxograma das atividades realizadas, descrevendo as devidas caracterizações tanto para os materiais empregados, quanto para o concreto com a incorporação dos isoladores elétricos em suas devidas substituições. Foram realizados os ensaios físicos e químicos, para caracterizar os materiais utilizados e avaliar o comportamento do concreto produzido com as devidas substituições.



Fonte: Autor, 2021

Inicialmente foi realizada a obtenção dos materiais, sendo: agregado miúdo natural, agregado graúdo natural e agregado graúdo sintético triturado e adequado a granulometria solicitada para o experimento. Logo após, foi realizada a caracterização física e química destes.

A variável independente do experimento é caracterizada como agregado graúdo sintético em percentual de substituição. Os resíduos de isoladores foram processados, caracterizados e incorporados na mistura como substituição parcial do agregado graúdo no concreto, em substituições de 0%, 12,5%, 25%, 50%, Referência, AG12,5, AG25, AG50 respectivamente.

Os corpos de provas (CP's) foram avaliados em períodos de cura de 7<sup>o</sup>, 14<sup>o</sup>, 21<sup>o</sup> e 28<sup>o</sup> dias, sendo armazenados em câmara úmida sob solução saturada de hidróxido de cálcio com temperatura em aproximadamente 25°C. Foram realizadas as análises no estado fresco, e estado endurecido para todos os períodos de cura do concreto.

Sendo assim, foram produzidos 27 corpos de prova para cada substituição, totalizando 108 CP's. Os percentuais de substituição, impostos, tomam como base a literatura, e análises estatísticas.

### **Produção do concreto**

A determinação das proporções de materiais utilizados para confecção de concreto, foi tomada como base nas Equações 1 e 2, descrita para o cimento Portland I, devido à falta de dados na literatura para o CP-B. A mesma foi utilizada com objetivo de nortear a pesquisa. Então, foi definida a resistência média ao 28<sup>o</sup> dia ( $F_{cm}$ ) para 30 Mpa, e definindo um fator água/cimento de 0,50, conforme recomendação do fabricante. Com a granulometria definida em aproximadamente 19 mm do diâmetro máximo do agregado, verificou-se na Tabela 6, valor equivalente a 9%, e com isso, foram aplicados os dados na Equação 1 e 2 (ANDOLFATO, 2002):

$$B = 0,5 \frac{0,50}{0,09} \cong 2,50 \quad (1)$$

$$A = 0,5 \frac{0,50}{0,09} - 1 \cong 2,00 \quad (2)$$

Sendo assim, a determinação do traço foi definida em 1: 2: 2,5: 0,50 (Cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água) respectivamente. O consumo de cimento pode ser determinado pela Equação 4, também baseada no cimento Portland I conforme descreve abaixo (COSTA, 2016):

$$C = \frac{985}{0,32 + 0,50 + 0,384 \cdot 2 + 0,364 \cdot 2,5} = 394,32 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (4)$$

O volume de materiais para uma moldagem de 1 m<sup>3</sup> de concreto, podem ser verificadas na Tabela 13:

**Tabela 13.** Quantidade de materiais para traço 1: 2: 2,5: 0,50 em kg

Materiais	Cimento	Areia	Brita 1	Água
Quantidade (Kg)	394,32	788,63	985,79	197,16

Fonte: Autor, 2021

Na pesquisa não foram utilizados aditivos, pelo fato de demonstrar somente a contribuição dos isoladores elétricos de porcelanas em substituição no concreto, evitando assim resultados distorcidos em função de outra variável.

A nomenclatura adotada para identificação dos concretos, foi baseada na substituição do agregado graúdo, AG. A Tabela 14, representa os traços em substituição em  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  conforme proposta da pesquisa:

**Tabela 14.** Dosagem utilizada na pesquisa

Traço	Substituição do agregado graúdo $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$				Água
	Cimento	Agregado miúdo	Agregado graúdo Natural	Agregado graúdo Porcelana	
Ref.	394,32	788,63	985,79	0	197,16
AG 12,5	394,32	788,63	862,57	123,22	197,16
AG 25	394,32	788,63	739,34	246,45	197,16
AG 50	394,32	788,63	492,89	492,89	197,16

Fonte: Autor, 2021

Para confecção dos corpos de prova, foram realizadas as dosagens baseadas em massa, adicionando as determinadas porções de materiais em uma Betoneira Menegotti à 30 Rpm no laboratório do UniFOA, para mistura do concreto.

Os moldes dos corpos de prova foram preparados com uma fina camada de óleo mineral em sua face interna.

Os moldes foram preenchidos com o concreto e utilizado uma haste de adensamento de aço, cilíndrica, com os extremos em forma semiesférica. Foram efetuados 12 golpes manuais em 2 camadas, conforme descreve a NBR 5738.

Os corpos de prova, foram confeccionados em moldes com diâmetro de 10 cm por 20 cm de altura, e desmoldado após 24 horas, tendo sido armazenado em local com temperatura controlada em aproximadamente 25°C, conforme Figura 12. Logo após, os CP's foram imersos em câmara úmida com solução saturada de hidróxido de cálcio com temperatura controlada em aproximadamente 25°C. Estes foram curados, e ensaiados com idade de 7, 14, 21 e 28 dias. Os corpos de prova com a geometria descrita acima possuem uma área igual a 78,5 cm<sup>2</sup> e volume equivalente a 1570 cm<sup>3</sup>.

**Figura 12.** Corpos de prova desenvolvidos



Fonte: Autor, 2021

### **Métodos Experimentais**

O tópico descreverá os métodos utilizados para análise das propriedades do material produzido, assim como nos materiais empregados na pesquisa. Conforme descrito anteriormente, os métodos são divididos por análises preliminares no agregado empregado, no concreto em estado fresco e estado endurecido.

### Análise Granulométrica dos Agregados

A análise granulométrica consiste em um método para análise das características físicas dos agregados utilizados na produção do concreto. Sendo assim, a análise foi realizada no agregado graúdo (brita natural e sintética) e no agregado miúdo (areia) baseado na NBR 7212. A granulometria do material foi realizada no laboratório UniFoa. Inicialmente, foi colocado os agregados na estufa Odontobrás modelo 1.5, por 24 horas à temperatura controlada de 105 °C, conforme demonstra Figura 13. Após retirado da estufa, foi aguardado os agregados chegarem à temperatura ambiente. Com isso, foram colocados os agregados em peneiras ordenadas de acordo com suas características, e inserido em um agitador de peneira da marca SOLOTEST parametrizado para frequência de 15Hz por um período de 10 minutos, conforme demonstra Figura 14. Após, foi medido a massa de cada peneira em uma balança da marca BEL MARK 5200 para pesagem dos agregados.

**Figura 13.** Estufa Odontobrás modelo 1.5



Fonte: Autor, 2021

**Figura 14.** Agitador de peneira SOLOTEST



Fonte: Autor, 2021

### Massa Específica e absorção de água dos agregados graúdos

O ensaio de massa específica e absorção dos agregados, foi baseado na NBR NM 53:2009. Sendo assim, foi coletado 3 kg de agregados graúdos, passado na peneira 4,75 mm e logo após colocado na estufa Odontobrás modelo 1.5, por 24 horas à temperatura controlada de 105 °C. Após retirado da estufa, foi aguardado os agregados chegarem à temperatura ambiente. Logo após, foram colocadas as amostras novamente na balança da marca BEL MARK 5200 para medição da massa. Foram colocadas as amostras submergidas em água na temperatura ambiente por 24 horas, e em seguida, foram realizadas as medições de massa com as amostras saturadas e medido sua massa submersa em água. Sendo assim, foram aplicadas as Equações 5, 6, 7 e 8.

$$D_{sc} = \frac{M_{sc}}{M_{sat} - M_i} 100 \quad (5)$$

$$D_{sat} = \frac{M_{sat}}{M_{sat} - M_i} \quad (6)$$

$$D = \frac{M_{sc}}{M_{sc} - M_i} \quad (7)$$

$$A_{ag} = \frac{M_{sat} - M_{sc}}{M_{sc}} 100 \quad (8)$$

Onde:

$M_{sat}$  Massa do CP com saturação de água por 24h;

$M_{sc}$  Massa do CP seco;

$M_i$  Massa do corpo de prova saturado, imerso em água;

$D_{sc}$  Massa Específica do agregado graúdo seco;

$D_{sat}$  Massa Específica do agregado graúdo saturado;

$D$  Massa Específica Aparente do agregado graúdo;

$A_{ag}$  Índice de absorção do agregado graúdo.



### Expansibilidade de Le Chatelier

O ensaio de expansibilidade de Le Chatelier tem o objetivo de verificar a expansibilidade da pasta. O ensaio foi baseado na NBR 11582, e realizado somente para cura a frio. Sendo assim, o ensaio foi realizado no laboratório UniFoa, utilizando uma agulha de Le Chatelier conforme demonstra Figura 15, com dimensões de 30 mm de diâmetro e altura, juntamente com paquímetro de precisão. Foi feito a pasta padrão e moldado os CP's, garantindo a referência zero da agulha de Le Chatelier, as primeiras 24h foram em temperatura controlada a aproximadamente 25°C, após esse período, os corpos de prova (agulha de Le Chatelier) foram imersos câmara úmida com solução aquosa com temperatura a aproximadamente 25°C, e após 6 dias foram retiradas as amostras e realizadas as medições de expansibilidade com paquímetro de precisão.

**Figura 15.** Agulha de Le Chatelier



Fonte: Autor, 2021

### Tempo de início e fim de pega

O fenômeno de pega do cimento, é dado pela evolução das propriedades mecânicas da pasta no começo do processo de endurecimento. E pode ser definido como momento na qual a pasta adquire uma consistência que faz com que a torne difícil para trabalho.

Com isso, foi utilizado o aparelho de Vicat no laboratório UniFoa, conforme demonstra a Figura 16, com temperatura controlada a aproximadamente 25°C. Após a adição da água para formação da pasta, já iniciou a cronometragem para avaliação do início e fim de cura. Foi preparado a pasta padrão em um molde específico do aparelho, e calibrado o mesmo para referenciar a aresta superior do molde. Logo após, foi realizado a penetração da agulha de Vicat no corpo de prova e verificado a

profundidade alcançada, o ensaio foi realizado com amostragem de 15 min para o tempo de início e fim de cura. Este, foi realizado baseado na NBR NM 6.

**Figura 16.** Aparelho de Vicat



Fonte: Autor, 2021

### Ensaio de abatimento

O ensaio de abatimento ou *Slump test*, consiste em um método para definir a consistência do concreto em seu estado fresco através da medida de seu assentamento.

O ensaio foi realizado empregando um molde de tronco de cone oco com diâmetro inferior da base de 200 mm, diâmetro superior da base 100 mm e altura de 300 mm, sob uma placa de aço metálica plana, no laboratório UniFoa, conforme demonstra Figura 17. Com isso, foi realizado a preparação do concreto para as devidas substituições, após a preparação do concreto, foi preenchido o molde de tronco de cone oco sob a placa de aço, e realizado o adensamento com uma haste metálica. Após, foi retirado o molde e colocado também sob a chapa de aço ao lado do CP e medido com uma trena com precisão de 1 mm a taxa de abatimento do concreto, o ensaio foi baseado na NBR NM 67.

**Figura 17.** Ensaio de Abatimento



Fonte: Autor, 2021

#### Microscopia de varredura eletrônica (MEV)

O microscópio de varredura eletrônica, é um instrumento frequentemente usado para observação da microestrutura de materiais sólidos. As amostras destinadas para análise foram obtidas em região de quebra e interesse, sendo realizada com o MEV operando a 5 kV, utilizando um detector de elétrons secundários, realizados no vácuo. O equipamento usado na pesquisa, foi o microscópio de varredura eletrônica da marca HITACHI referente ao modelo TM 3000, por meio do software Tapletop Microscope, no laboratório UniFoa, conforme demonstra Figura 18.

**Figura 18.** Microscópio de varredura eletrônica, HITACHI, modelo TM 3000



Fonte: Autor, 2021

## Difração de Raio X

A realização da difração de raios X, se apresenta de forma primordial, pois a mesma exige para verificação, as fases amorfas e estruturas cristalinas das amostras, em relação ao grau da disposição das estruturas identificadas, e deduzir um potencial de reatividade do material. As amostras foram analisadas no difratômetro da marca SHIMADZU referente ao modelo XRD-6100 no laboratório UniFoa conforme demonstra a Figura 19, com radiação “Cu-K $\alpha$ ”, com varredura entre 10° a 80°, com passo angular de 0,02° e dois segundos de varredura por ponto de contagem.

**Figura 19.** Difratômetro, SHIMADZU, modelo XRD-6100



Fonte: Autor, 2021

## Ensaio de Compressão Uniaxial

Os ensaios de compressão foram realizados com base na NBR 5739 (ABNT, 2007), nos corpos de prova com geometrias cilíndricas com dimensões entre 10 cm x 20 cm. Os ensaios foram realizados nas idades de 7, 14, 21 e 28 dias em 5 corpos de prova para cada substituição. Para os ensaios, foi utilizado a Máquina Universal de ensaios EMIC modelo 100 kN linha DL EMIC no laboratório UniFoa, conforme demonstra Figura 20. Os corpos de prova cilíndricos foram colocados e alinhados na prensa junto com 2 suportes Neopreme horizontais, com o objetivo de transferir a força das punções sobre o CP, evitando o desgaste das punções da prensa. Foi parametrizado para uma área de 78,54 cm<sup>2</sup> e também dados de data, tempo de cura

e nome dos CP's. Logo após, os corpos de prova foram submetidos as forças e coletados os resultados para cada substituição.

**Figura 20.** Prensa EMIC para ensaio de compressão Uniaxial



Fonte: Autor, 2021

### Índice de Vazios

O índice de vazios pode ser avaliado verificando a relação entre o volume dos poros permeáveis e o volume total, dada pela Equação 9.

$$I_{vz} = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} 100 \quad (9)$$

Onde:

$M_{sat}$  Massa do CP com saturação de água por 24h;

$M_{sc}$  Massa do CP seco;

$M_i$  Massa do corpo de prova saturado, imerso em água;

$I_{vz}$  Índice de vazios.

Inicialmente, foram colocadas 2 amostras em uma Estufa da Odontobrás modelo 1.5, com temperatura controlada a aproximadamente 105°C por 24 horas, e, foi aguardado o resfriamento à temperatura ambiente até alcançar 25°C. Após foi

realizada a medição das massas utilizando uma balança de precisão da marca Welmy, conforme demonstra Figura 21. Logo em seguida, foram imersos os corpos de prova em água a temperatura aproximadamente 25°C por 24h. Após, foi medido a massa do CP saturado com superfície seca e sua massa submersa em água com a balança de precisão, e aplicado a Equação 9 para determinação do índice de vazios. Todos os experimentos foram realizados laboratório do UniFoa.

**Figura 21.** Balança Welmy para pesagem dos CP's



Fonte: Autor, 2021

#### Índice de absorção de água e capilaridade

O índice de absorção, consiste em determinar o volume de água absorvida até a saturação do corpo de prova. Com isso, foi utilizado o método NBR 9778 (ABNT, 2005), em corpos cilíndricos 10 x 20 cm (Diâmetro x Altura) para 28 dias de cura. O método é caracterizado pela determinação da massa na condição seca e posteriormente na condição saturada, após a imersão em água. Conforme descreve Equação 10:

$$I_{abs} = \frac{M_{sat} - M_{sc}}{M_{sc}} 100 \quad (10)$$

Onde:

$M_{sat}$  Massa do CP com saturação de água;

$M_{sc}$  Massa do CP seco;

$I_{abs}$  Índice de Absorção;

Inicialmente, foram colocadas 2 amostras em uma Estufa da Odontobrás modelo 1.5 com temperatura controlada a aproximadamente 105°C por 24 horas, e, foi aguardado o resfriamento à temperatura ambiente até alcançar 25°C. Foi realizada a medição das massas utilizando uma balança de precisão da marca Welmy. Logo após, os corpos de prova foram submersos em 1/3 do CP de água para as primeiras 24h, 2/3 para as próximas 48h e totalmente submerso para as 72h com temperatura aproximadamente 25°C. Logo em seguida, foi medido a massa do CP saturado com superfície seca com a balança de precisão, e aplicado a Equação 10 para determinação do índice de absorção. Todos os experimentos foram realizados laboratório do UniFoa.

Foi realizado a análise do índice de capilaridade do concreto baseando na NBR 9779, de forma adaptada. Com isso, foi colocado 2 amostras em Estufa por 24 horas a temperatura de 105°C. Após o período de secagem, foi aguardado a temperatura alcançar um valor equivalente a 25°C. Foi marcado o CP, dividindo-o em 3 partes, e preenchido de água até a primeira marcação e aguardado 24h, após foi realizado sua medição de massa e assim sucessivamente para próximas medidas. Sendo o índice de capilaridade determinado pela Equação 11.

$$C = \frac{A - M_{sc}}{S} \quad (11)$$

Onde:

$C$  Absorção de água por capilaridade em (g/cm<sup>2</sup>);

$A$  Massa do CP que permanece em contato com uma das faces com a água durante 24h em (g);

$M_{sc}$  Massa do CP seco (g);

$S$  Área da seção transversal em (cm<sup>2</sup>);

### 3.2.1.1. Análise estatística dos resultados

A análise estatística se mostra primordial na pesquisa para verificação dos dados e comparação deles, indicando uma análise da performance do material. Dentre essas amostras, serão analisados de forma individual a resistência a compressão, índice de absorção e índice de vazios. Foi aplicado o método ANOVA

indicando a significância dos dados, e percentual para performance dos materiais. A Equação 12, expressa o modelo estatístico genérico.

$$x_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha\beta_{ij} + \epsilon_i \quad (12)$$

Onde

$\mu$  = média geral;

$\alpha_i$  = influência da variável independente substituição do resíduo;

$\beta_j$  = influência da variável independente idade do ensaio;

$\alpha\beta_{ij}$  = influência da interação das variáveis independentes;

$\epsilon_{ij}$  = medida do erro experimental, onde  $\epsilon_{ij} \rightarrow N(0, \sigma)$ .

#### Método de avaliação dos concretos

A avaliação do concreto designa em verificar suas características gerais em estado fresco e endurecido por meio de suas propriedades mecânicas, de durabilidade, características reológicas, análise microscópica, análise química, de acordo com os dados verificados anteriormente.



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão apresentados os dados coletados dos ensaios experimentais e discutidos os resultados obtidos. Inicialmente será descrito a caracterização dos componentes utilizados na produção do concreto, em termos de características químicas-física, e, posteriormente as propriedades do concreto em seu estado fresco e endurecido.

### 4.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS

#### **Agregado Graúdo sintético (Isolador Elétrico de Porcelana)**

A verificação das características dos isoladores elétricos de porcelana foi baseada em análises físicas e química do mesmo. Sendo assim, será descrito sua granulometria, características físicas, verificação microscópica, e análise química com DRX.

Inicialmente os isoladores elétricos de porcelana foram tratados no laboratório do UniFoa, lavados e quebrados manualmente conforme demonstra Figura 22 e 23.

**Figura 22.** Isoladores Elétricos de Porcelana triturados



Fonte: Autor, 2021

**Figura 23.** Isoladores Elétricos de Porcelana separados

Fonte: Autor, 2021

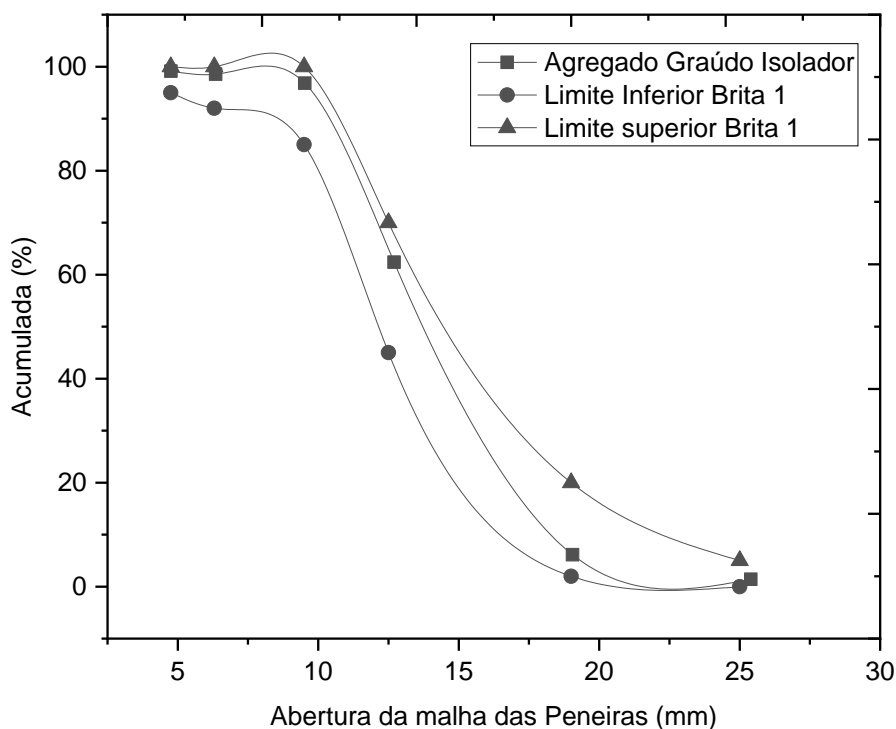
### Granulometria do Agregado

A análise granulométrica do teve como objetivo de identificar a distribuição granulométrica do isolador de porcelana, podendo ser demonstrado conforme Tabela 15 e Gráfico 11.

**Tabela 15.** Granulometria Isolador elétrico de porcelana

Malha (mm)	Peneira + Fundo (g)	Peneira + Material Retido (g)	Retida (g)	% Retido (%)	% Acumulada (%)
25,40	396	406	10	1,42	1,41
19,05	418	451	33	4,71	6,12
12,70	428	822	394	56,29	62,41
9,52	406	647	241	34,43	96,84
6,35	414	426	12	1,71	98,55
4,76	436	440	4	0,57	99,12
Fundo	398	404	6	0,86	-

Fonte: Autor, 2021

**Gráfico 11.** Curva Granulométrica do agregado gráúdo artificial

Fonte: Autor, 2021

A granulometria do isolador elétrico de porcelana, se apresenta de forma contínua, bem graduada e de forma alongado lamelar favorecendo a resistência, porém, solicita uma maior quantidade de pasta devido aos vazios. A característica lamelar do agregado também pode ser observada em Campos (2009), devido a geometria original dos isoladores elétricos de porcelana. Conforme demonstra Figura 23.

#### Características Físicas Gerais

O resultado da caracterização das amostras dos materiais na forma de agregado, podem ser representados na Tabela 16.

O isolador elétrico de porcelana apresenta uma baixa absorção de água e menor massa específica aparente em relação a brita natural, também observado a mesma resposta em Campos (2009) e Vieira (2017).

**Tabela 16.** Características físicas do no Agregado Graúdo artificial

Ensaio	Método de Ensaio	Amostra 1	Amostra 2	Resultado ( $\bar{x}$ )	Desvio padrão $\sigma$
Massa Específica Aparente ( $g. cm^{-3}$ )	NBR NM 53/2009	2,34	2,78	2,56	0,31
Massa Específica Agregado seco ( $g. cm^{-3}$ )	NBR NM 53/2009	2,26	2,54	2,40	0,20
Massa Específica Agregado Saturado ( $g. cm^{-3}$ )	NBR NM 53/2009	2,30	2,63	2,47	0,23
Absorção (%)	NBR NM 53/2009	1,33	3,46	2,40	1,51
Módulo de Finura (M.F)	NBR NM 248/2003	4,251	4,251	4,251	0,00
Massa Unitária ( $g. cm^{-3}$ )	NBR NM 45/2006	1,16	1,20	1,18	0,03

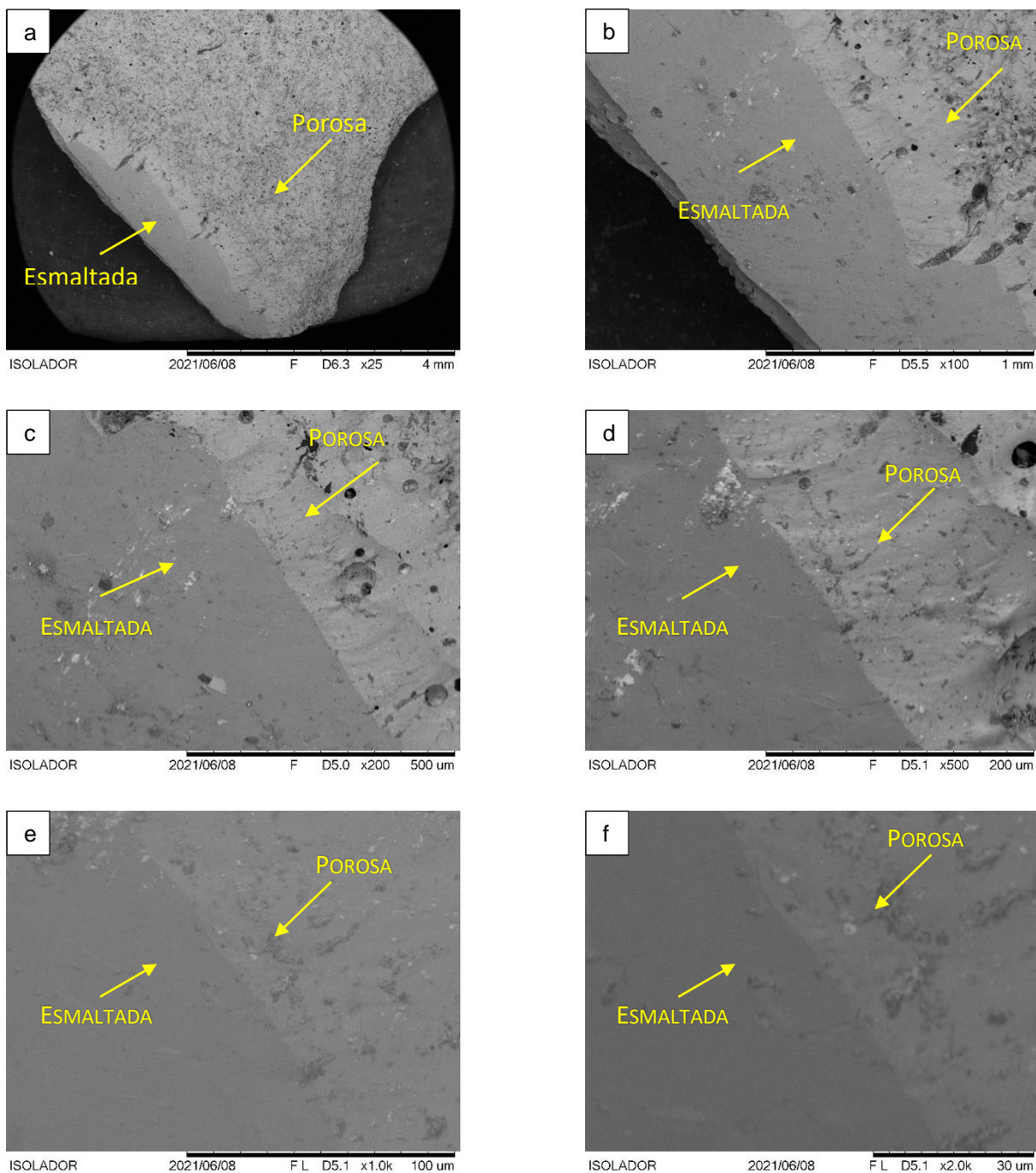
Fonte: Autor, 2021

O desvio associado a absorção de água pode estar relacionado ao processo de moagem, proporcionando microfissuras na estrutura dos corpos, e assim, fazendo com que ocorra uma maior absorção de água nas cerâmicas (CAMPOS, 2009).

#### MEV

As investigações com MEV, exibem as características da microestrutura do isolador elétrico de porcelana empregado no concreto, sendo possível verificar os aspectos gerais do material. A análise foi realizada em uma parte característica do isolador, que é a parte esmaltada em junção com a parte porosa, exibindo uma superfície lisa e vitrificada juntamente com uma área porosa, conforme demonstra Figura 24. As amostras utilizadas foram oriundas após a quebra dos mesmos.

**Figura 24.** MEV Isolador Análise junção da face porosa e vitrificada. a) Ampliação de 25X. b) Ampliação de 100X. c) Ampliação de 200X. d) Ampliação de 500X. e) Ampliação de 1000X. f) Ampliação de 2000X.



Fonte: Autor, 2021

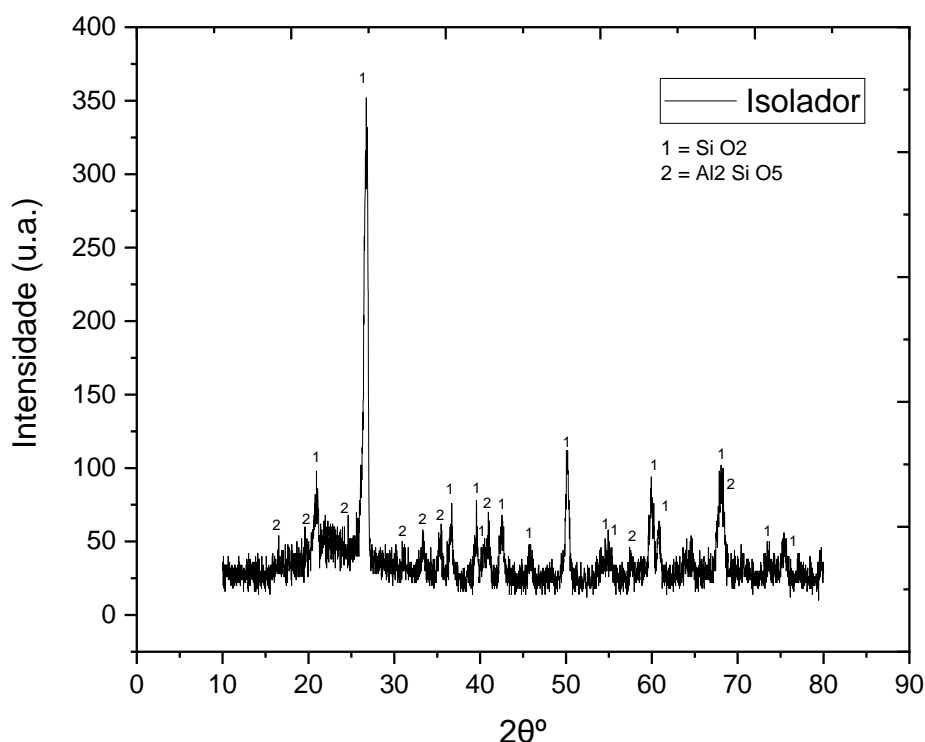
Conforme demonstra a Figura 24, pode ser observado a região de transição do material, provavelmente com a presença de Quartzos e Silicatos, exibindo duas regiões, uma com parte lisa oriunda da face esmaltada e outra com certa porosidade, havendo uma região intermediária de transição, induzindo assim uma região de

homogeneidade que remete a sua composição química e mineralógica (VIEIRA, 2017).

## DRX

A composição do Isolador Elétrico de Porcelana, exibe fortes características de Dióxido de silício, ocorrências de Silicato de alumínio, conforme representa Figura 25.

**Figura 25.** Difratoograma do Isolador elétrico utilizada para confecção do concreto



Fonte: Autor, 2021

Em geral, o isolador é composto por 2 elementos básicos: Quartzo ou Dióxido de Silício e Silicato de alumínio, também verificado em (SOUZA; NEVES; ALARCON, 2004).

## Agregado Graúdo (Brita)

A verificação das características da brita natural são baseadas em análises físicas e química da mesma. Sendo assim, será descrito sua granulometria, características físicas, verificação microscópica e análise química com DRX.

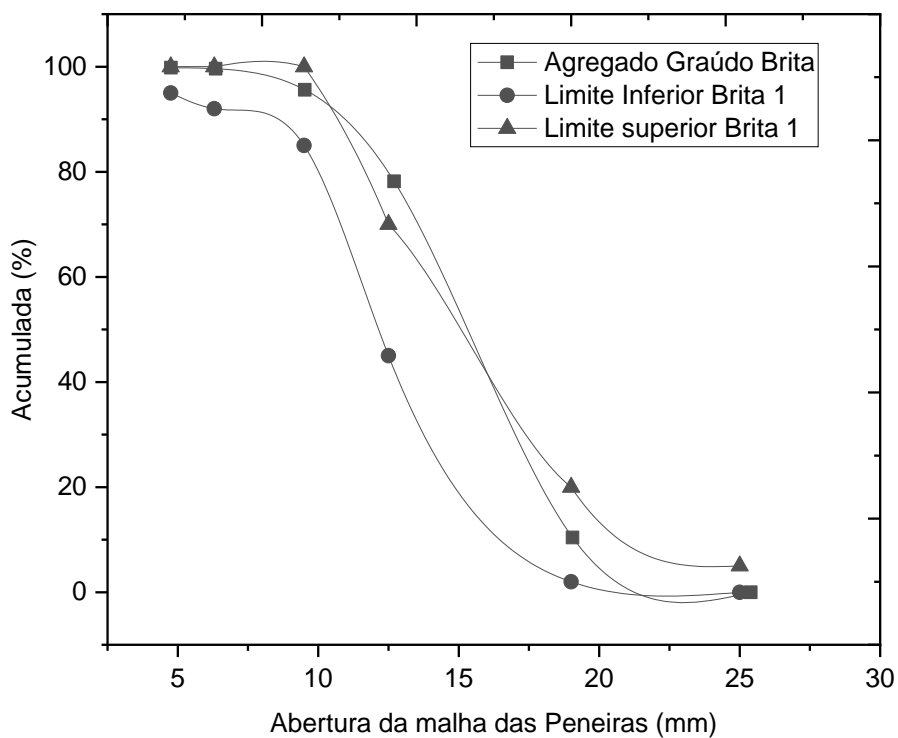
### Granulometria do Agregado

A análise granulométrica da brita foi realizada utilizando do mesmo procedimento e equipamentos já efetuados com o agregado graúdo anterior. O objetivo é identificar a distribuição granulométrica da brita conforme descreve Tabela 17 e Gráfico 12.

**Tabela 17.** Granulometria da Brita.

<b>Malha (mm)</b>	<b>Peneira + Fundo (g)</b>	<b>Peneira + Material Retido (g)</b>	<b>Retida (g)</b>	<b>% Retido (%)</b>	<b>% Acumulada (%)</b>
<b>25,40</b>	396	396	0	0	0
<b>19,05</b>	418	522	104	10,40	10,40
<b>12,70</b>	428	1106	678	67,80	78,20
<b>9,52</b>	406	580	174	17,40	95,60
<b>6,35</b>	414	454	40	4,00	99,60
<b>4,76</b>	436	438	2	0,20	99,80
<b>Fundo</b>	398	402	2	0,20	-

Fonte: Autor, 2021

**Gráfico 12. Curva Granulométrica Brita**

Fonte: Autor, 2021

A brita também exibe uma característica de forma contínua, bem graduada favorecendo a resistência, indicando uma possível boa homogeneidade associada ao isolador de porcelana, características também verificadas em Costa (2016).

#### Características Físicas Gerais

O resultado da caracterização das amostras do agregado graúdo, podem ser representados na Tabela 18.



**Tabela 18.** Características físicas do no Agregado Graúdo natural

<b>Ensaio</b>	<b>Método de Ensaio</b>	<b>Amostra 1</b>	<b>Amostra 2</b>	<b>Resultado (<math>\bar{x}</math>)</b>	<b>Desvio padrão <math>\sigma</math></b>
<b>Massa Específica Aparente (<math>g. cm^{-3}</math>)</b>	NBR NM 53/2009	2,62	2,97	2,80	0,25
<b>Massa Específica Agregado seco (<math>g. cm^{-3}</math>)</b>	NBR NM 53/2009	2,49	2,57	2,53	0,06
<b>Massa Específica Agregado Saturado (<math>g. cm^{-3}</math>)</b>	NBR NM 53/2009	2,54	2,71	2,63	0,12
<b>Absorção (%)</b>	NBR NM 53/2009	2,10	5,26	3,68	2,23
<b>Módulo de Finura (M.F)</b>	NBR NM 248/2003	3,836	3,836	3,836	0,00
<b>Massa Unitária (<math>g. cm^{-3}</math>)</b>	NBR NM 45/2006	1,35	1,40	1,38	0,04

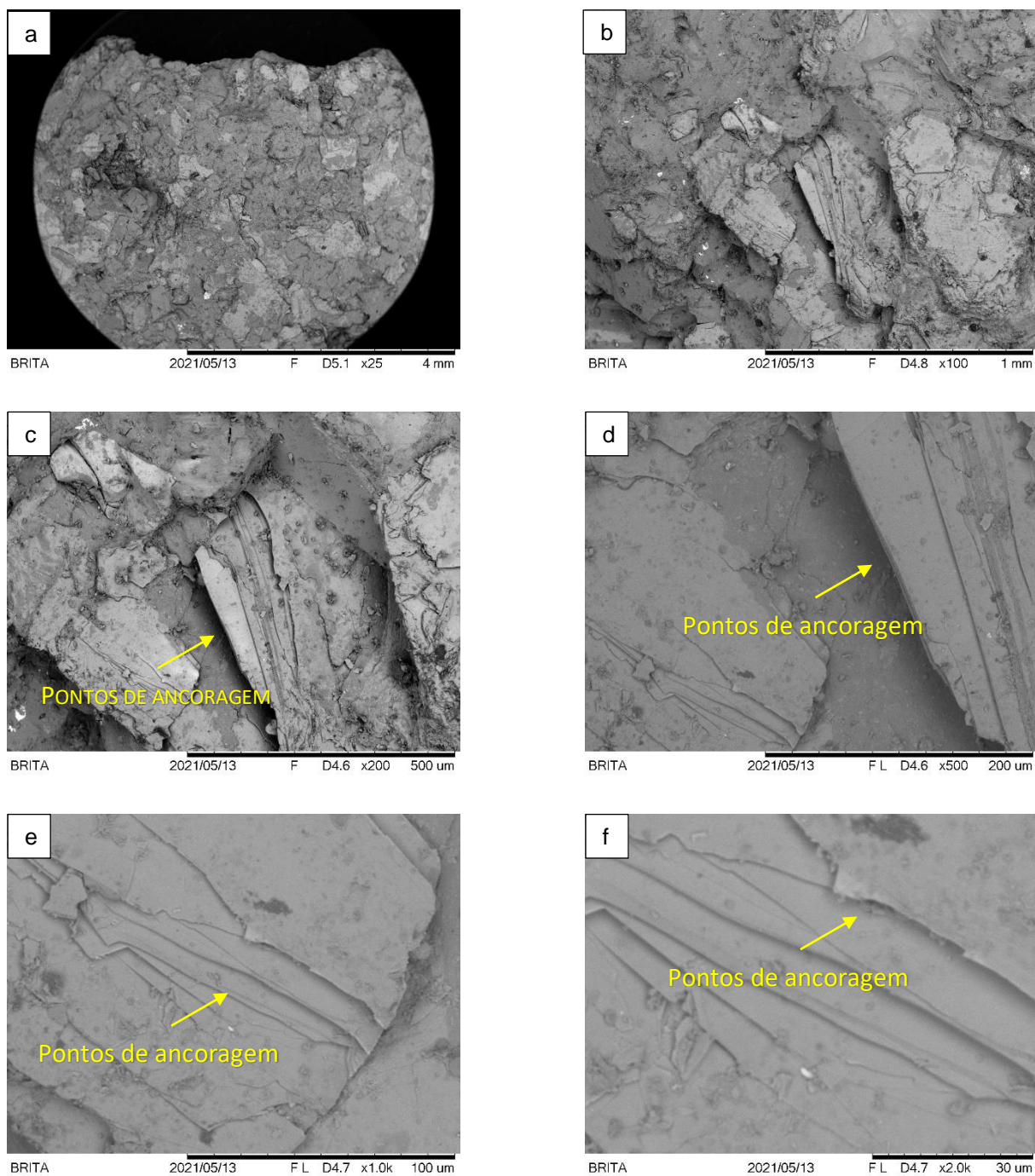
Fonte: Autor, 2021

O agregado graúdo natural, exibiu (conforme demonstra Tabela 18) um elevado índice de absorção de água e massa específica aparente em relação aos isoladores elétricos de porcelana, pela provável composição mineralógica. No entanto, há uma similaridade entre os agregados, também verificado por Campos (2009).

#### MEV

A análise com MEV, demonstra as características da microestrutura do agregado empregado no concreto, sendo possível verificar os aspectos gerais do material. A verificação foi realizada em uma parte característica da brita, conforme demonstra Figura 26. As amostras utilizadas foram oriundas da quebra dos mesmos.

**Figura 26.** MEV brita região de quebra. a) Ampliação de 25X. b) Ampliação de 100X. c) Ampliação de 200X. d) Ampliação de 500X. e) Ampliação de 1000X. f) Ampliação de 2000X.



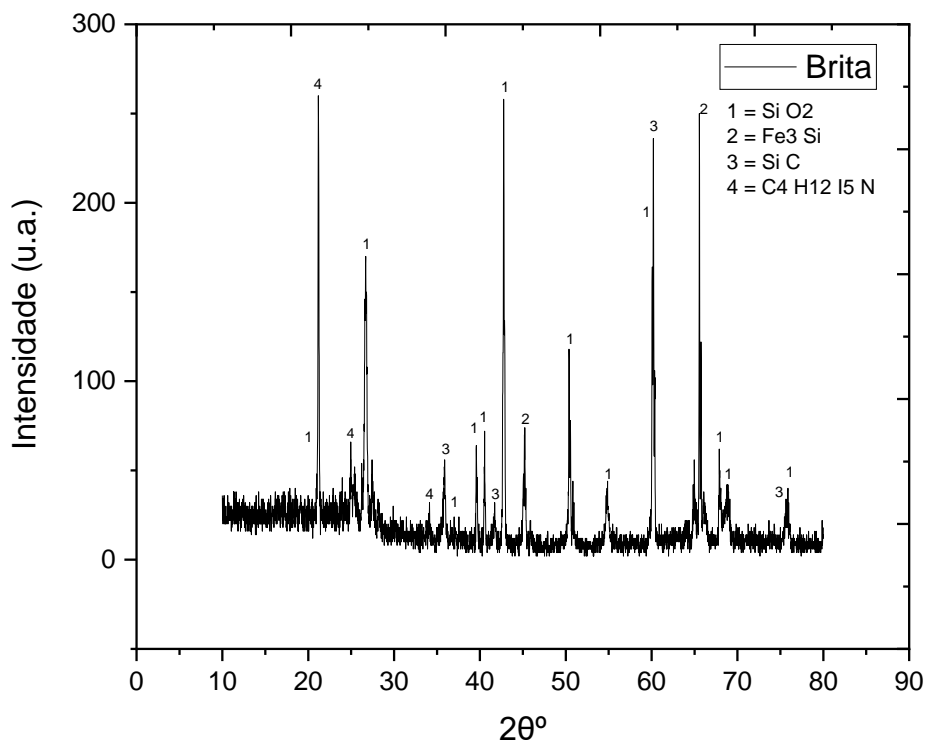
Fonte: Autor, 2021

O agregado graúdo natural, exibe com elevados pontos de ancoragem, apresentando forte indicação de boa resistência a compressão, características que também podem ser observadas em Costa (2016) e Vieira (2017).

## DRX

A composição da Brita granítica fornecida pelo UniFOA, exibe forte características de Dióxido de Silício, ocorrências de Ferrosilício e Carbetto de Silício, conforme representa Figura 27.

**Figura 27.** Difratoograma da Brita utilizada para confecção do concreto



Fonte: Autor, 2021

Em geral, o granito é composto por três elementos básicos, tendo o quartzo e feldspato como principais componentes, e subjacente os de menor ocorrência como fosfato, óxido de ferro, silicatos de ferro, grafita e carbono (COSTA, 2016).

### **Agregado miúdo (Areia)**

A verificação das características da areia são baseadas em análises físicas e química da mesma. Sendo assim, será descrito sua granulometria, características físicas gerais, verificação microscópica e análise química com DRX.

#### Granulometria do Agregado

A análise granulométrica da areia foi realizada utilizando do mesmo procedimento e equipamentos já efetuados com os agregados graúdos. O objetivo é

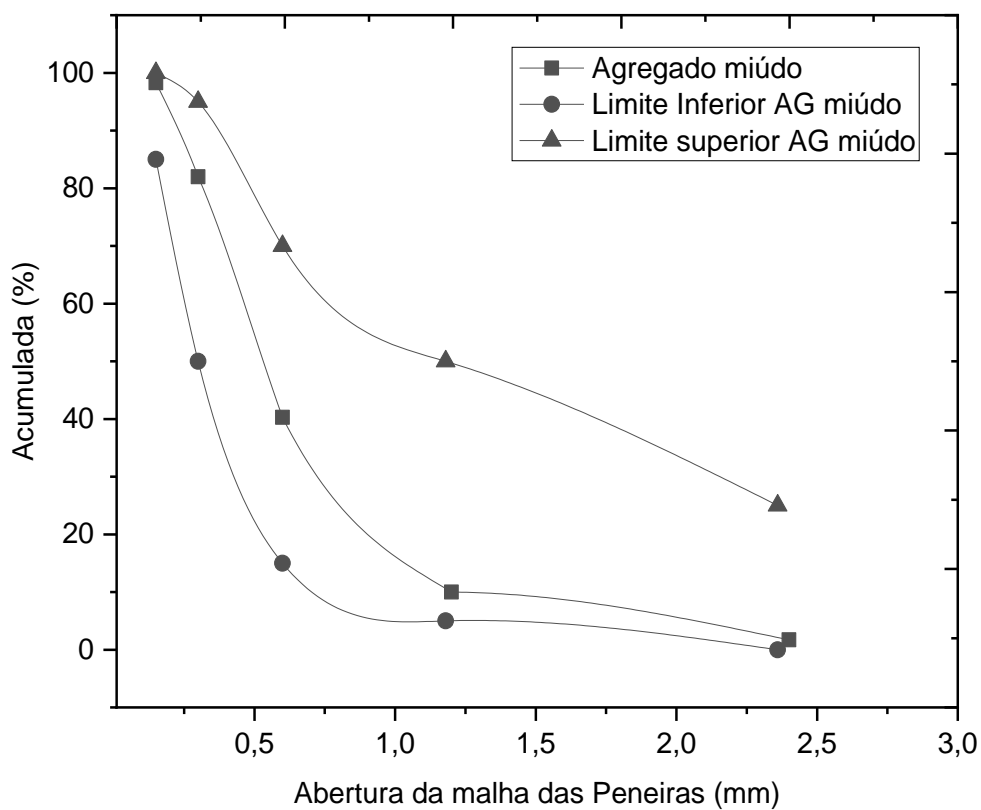
identificar a distribuição granulométrica da areia, conforme demonstra Tabela 19 e Gráfico 13.

**Tabela 19.** Granulometria da areia.

Malha (mm)	Peneira + Fundo (g)	Peneira + Material Retido (g)	Retida (g)	% Retido (%)	% Acumulada (%)
2,400	390	402	12	1,71	1,71
1,200	294	352	58	8,29	10,00
0,600	326	538	212	30,29	40,29
0,300	344	636	292	41,71	82,00
0,150	348	462	114	16,29	98,29
Fundo	414	426	12	1,71	-

Fonte: Autor, 2021

**Gráfico 13.** Curva granulométrica agregado miúdo



Fonte: Autor, 2021

Os agregados miúdos apresentaram dentro da zona ótima de finura, exibindo dentro dos limites inferior e superior a granulometria solicitada, indicando um possível bom preenchimento dos vazios do concreto, característica também verificada em Costa (2016).

#### Características Físicas Gerais

O resultado da caracterização das amostras dos materiais produzidos na forma de agregado e na forma de pó, podem ser representados na Tabela 20.

**Tabela 20.** Características físicas do no Agregado miúdo natural

Ensaio	Método de Ensaio	Amostra 1	Amostra 2	Resultado ( $\bar{x}$ )	Desvio padrão $\sigma$
<b>Dimensão Máxima Característica (mm)</b>	NBR NM 248/2003	2,40	2,40	2,400	0,00
<b>Módulo de Finura</b>	NBR NM 248/2003	2,323	2,323	2,323	0,00
<b>Massa Unitária (<math>g \cdot cm^{-3}</math>)</b>	NBR NM 45/2006	1,42	1,50	1,46	0,057

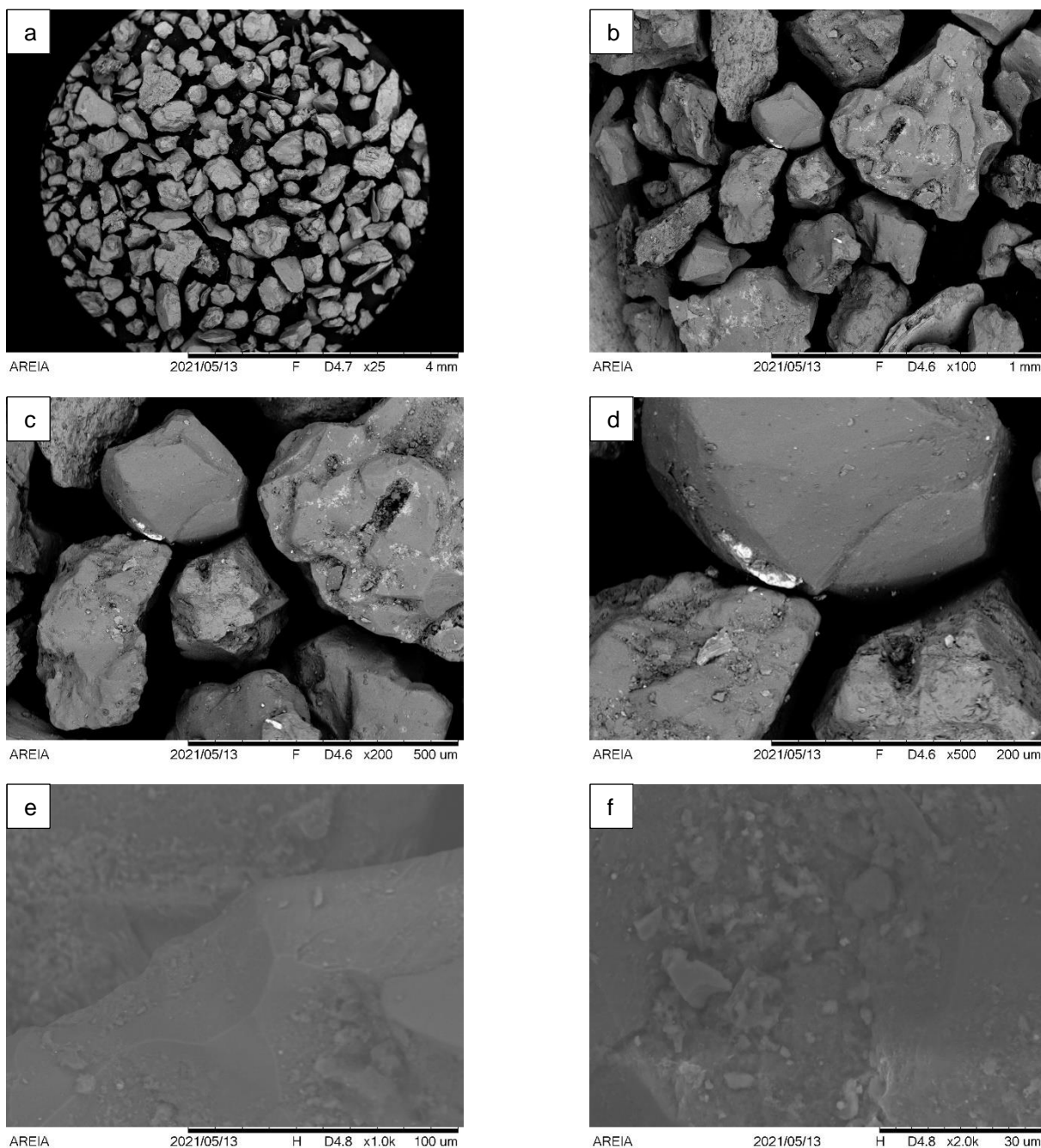
Fonte: Autor, 2021

O agregado miúdo, possui um baixo módulo de finura em comparação aos utilizados em Campos (2009) e Vieira (2017), indicando um possível melhor preenchimento dos vazios formados pelos agregados graúdos.

#### MEV

As investigações com MEV, demonstram as características da microestrutura da areia empregada no concreto, sendo possível verificar os aspectos gerais do material. Assim sendo, a análise foi realizada em uma amostra de areia conforme demonstra Figura 28.

**Figura 28.** MEV da areia. a) Ampliação de 25X. b) Ampliação de 100X. c) Ampliação de 200X. d) Ampliação de 500X. e) Ampliação de 1000X. f) Ampliação de 2000X.



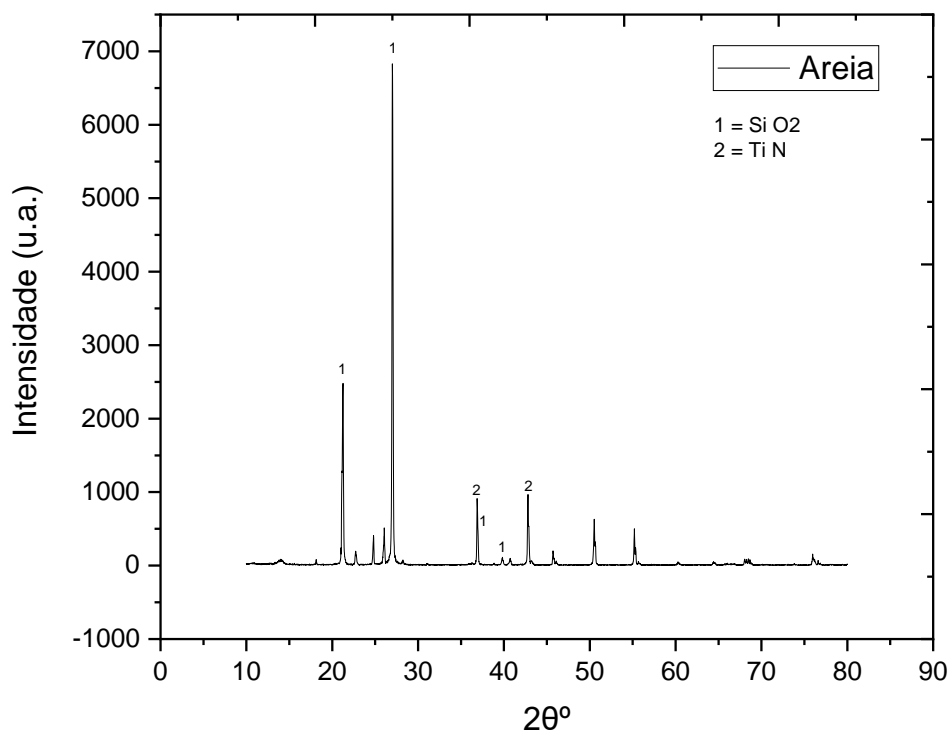
Fonte: Autor, 2021

Na análise da areia por meio do MEV, observou-se uma característica lamelar do agregado miúdo, aliado a uma boa distribuição granulométrica, contribuindo para uma boa homogeneização da pasta.

## DRX

Pode ser observado, conforme a Figura 29, que a composição da areia, é formada predominantemente por Dióxido de Silício, e materiais de menor ocorrência, como Azidas de Titânio.

**Figura 29.** Difratoograma da areia utilizada para confecção do concreto



Fonte: Autor, 2021

Os dados da composição analisada exibem características de areia de leito do rio, com quantidades de quartzo (sílica) de forma predominante e alguns minerais subjacentes (VIEIRA, 2017), com incidência de Azidas de Titânio.

### Cimento CP-B

A verificação das características do cimento é baseada em análises físicas e química do mesmo. Sendo assim, serão descritos dados de expansibilidade, início e fim de pega, MEV e DRX.

#### Expansibilidade de Le Chatelier

Foi realizado o ensaio de expansibilidade de Le Chatelier na pasta baseado na NBR 11582, somente para cura a frio. Sendo assim, o ensaio foi realizado, utilizando uma agulha de Le Chatelier com dimensões de 30 mm de diâmetro e altura. Foi feito

a pasta padrão e moldado o CP's e realizado as medições de expansibilidade após 7 dias, conforme descreve Tabela 21.

**Tabela 21.** Expansibilidade de Le Chatelier

Corpos de Prova	Referência	Referência + 7 Dias	Expansibilidade	Média ( $\bar{x}$ )	Desvio padrão $\sigma$
CP 1	0,0 mm	3,5 mm	3,5 mm	2,9 mm	0,71
CP2	0,0 mm	2,3 mm	2,5 mm		

Fonte: Autor, 2021

A partir da Tabela 21 pode ser verificado que a expansibilidade do cimento CP-B exibe uma taxa de expansibilidade conforme a norma e normal em relação aos cimentos dispostos no mercado. Tendo que o valor da expansibilidade máxima de 5,0 mm descrita pela NBR 16697 (BRASIL,2019).

#### Início e Fim de pega

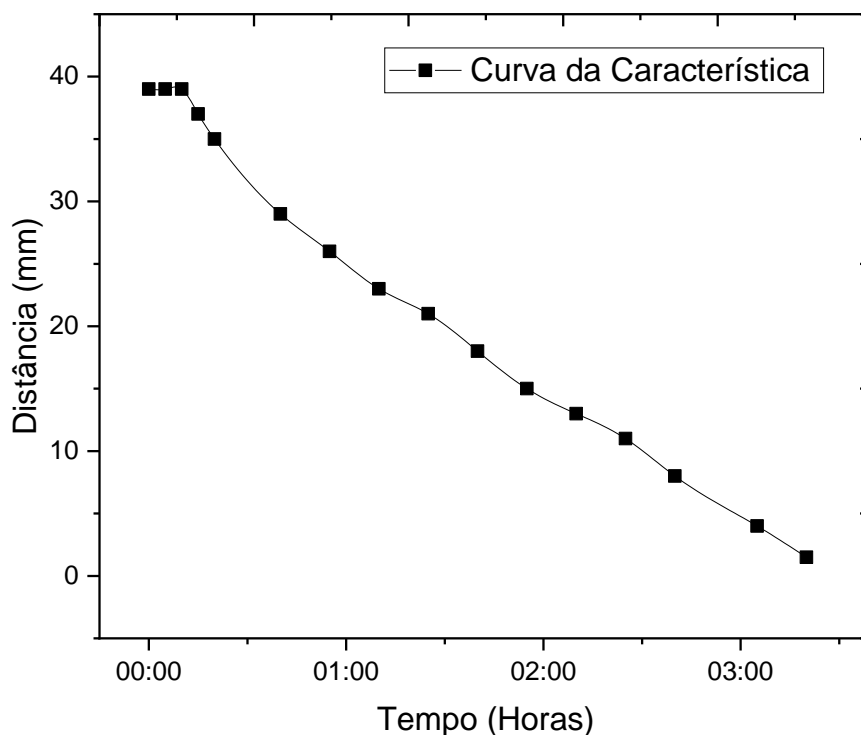
O ensaio de tempo de início e fim de pega da pasta, tem como objetivo verificar as características do cimento utilizado. O ensaio foi baseado na NBR NM6, sendo realizado a pasta com relação 1:0,50 (cimento, água) utilizando um aparelho de Vicat, com temperatura controlada em aproximadamente 25°C. Os dados podem ser verificados conforme Tabela 22 e Gráfico 14.

**Tabela 22.** Ensaio de início e fim de pega na pasta

Ensaio	Pasta CP 1	Pasta CP 2	Média ( $\bar{x}$ )	Desvio padrão $\sigma$
Início de Pega (min)	55	54	54	0,71
Fim de Pega (min)	200	202	201	1,41

Fonte: Autor, 2021



**Gráfico 14.** Período de início e fim de pega da pasta CP-B

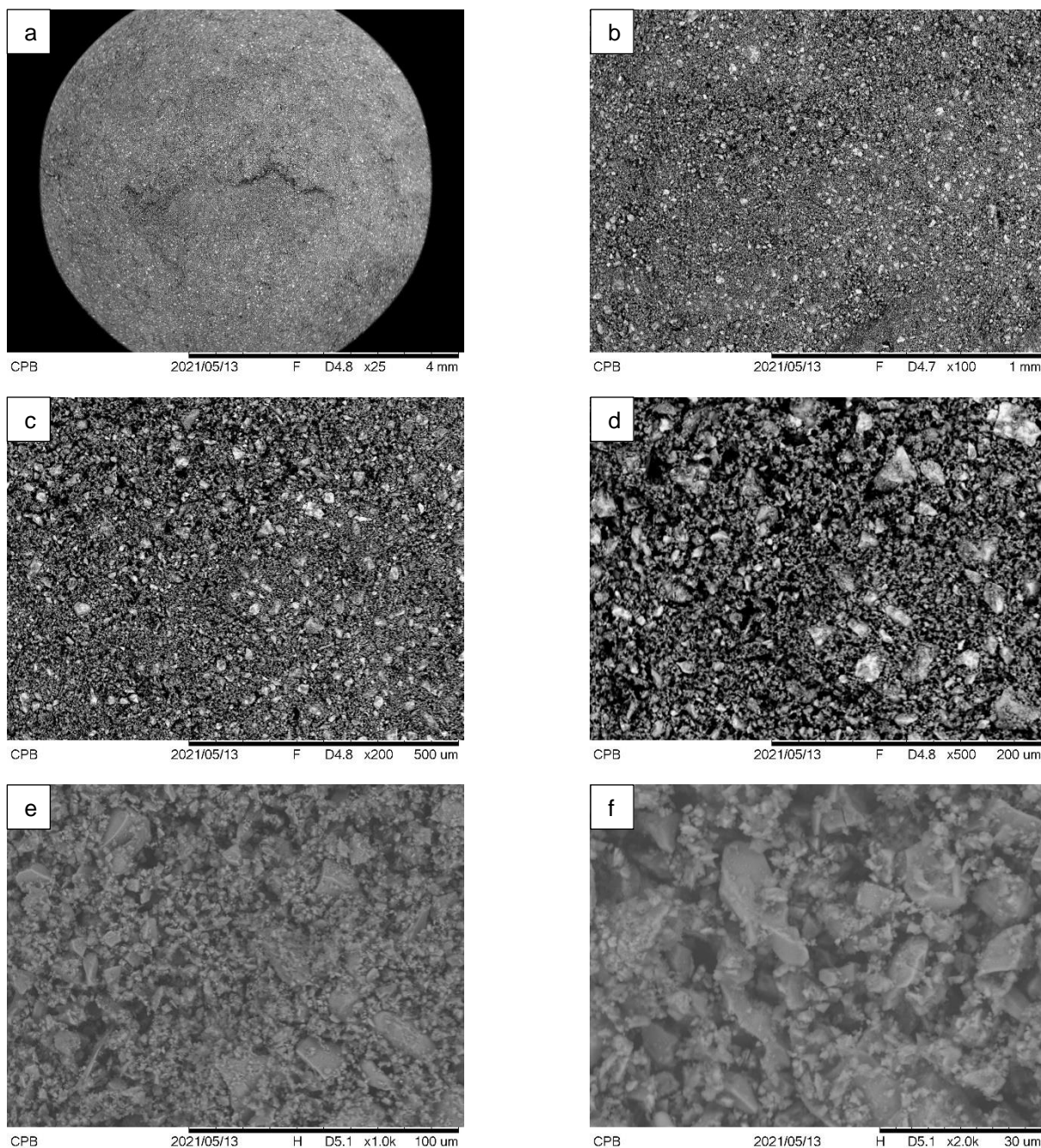
Fonte: Autor, 2021

O tempo de início de pega se apresentou em desconforme com a NBR19697 (2018) onde estabelece que o CP-B deverá apresentar um tempo de início de pega maior ou igual a 60 min para  $4 \pm 1$  mm. Já o tempo de fim de pega, se apresentou dentro da norma sendo menor ou igual que 600 min para o CP-B. Tendo que o fim de pega do CP-B é inferior ao CP V e CP IV.

#### MEV

As análises com MEV, mostram as características da microestrutura do cimento CP-B empregado no concreto, sendo possível verificar características gerais do material. Assim sendo, a análise foi realizada em uma amostra de cimento CP-B em pó conforme demonstra Figura 30.

**Figura 30.** MEV Cimento CP-B. a) Ampliação de 25X. b) Ampliação de 100X. c) Ampliação de 200X. d) Ampliação de 500X. e) Ampliação de 1000X. f) Ampliação de 2000X.



Fonte: Autor, 2021

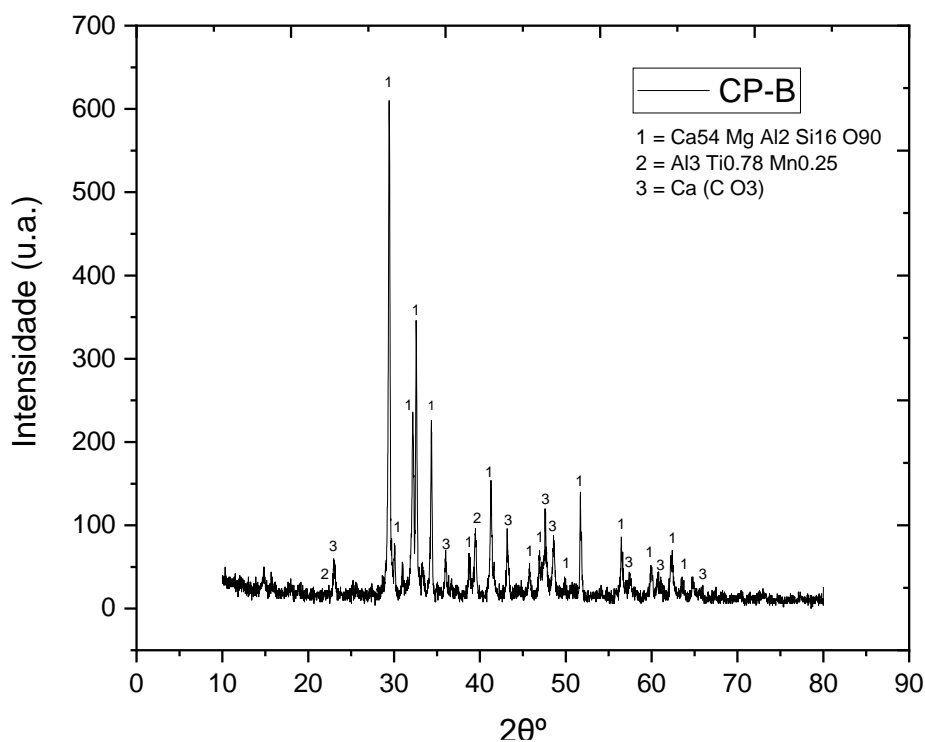
O MEV do cimento CP-B demonstrou um elevado módulo de finura. De acordo com Kirchheim (2003) a finura dos aglomerantes do CP-B afeta a resistência, retração, segregação, consistência, trabalhabilidade, quantidade de ar incorporado e velocidade de hidratação.

## DRX

O cimento CP-B em geral possui um baixo teor de manganês e ferro, e utiliza o caulim para substituição da argila, exibindo assim sua característica na cor branca.

Com isso, pode-se verificar em sua composição predominantemente de Silicato de Cálcio-Magnésio-Alumínio e picos de Carbonato de Cálcio e Alumínio-Manganês-Titânio. Conforme demonstra Figura 31.

**Figura 31.** Difratograma do CP- B utilizada para confecção do concreto



Fonte: Autor, 2021

Para o cimento Portland Branco, é observável a presença de Silicato tricálcico (Alita), Silicato dicálcico (Belita), aluminato tricálcico (Aluminato), Ferro aluminato tetracálcico (Ferrita) e compostos menores como óxidos de cálcio livre, magnésio, manganês, dentre outros. (KIRCHHEIM, 2003).

## 4.2. RESULTADOS DO CONCRETO

### Ensaio de abatimento

O método utilizado, conforme descreve a NBR NM 67 é aplicado aos concretos que possuam seu agregado graúdo com dimensão até 35,7 mm. Com isso, foi realizado o ensaio utilizando um molde com a forma de um tronco de cone oco, realizado o preenchimento de material e após as medições conforme pode ser observado na Figura 32.

**Figura 32.** Ensaio de abatimento no concreto Referência.



Fonte: Autor, 2021

A Tabela 23, mostra os valores do abatimento do concreto.

**Tabela 23.** Ensaio de abatimento nos CP's de concreto

Ensaio	Ref.	AG 12,5	AG 25	AG 50
<b>Abatimento (mm)</b>	45 mm	45 mm	44 mm	45 mm

Fonte: Autor, 2021

Os concretos apresentaram uma boa coesão, indicando que a adição de porcelana graúda oriunda de isoladores, apresentaram uma baixa taxa de abatimento,

podendo estar associado ao fato de a porcelana ser um material de baixa permeabilidade, indicando uma taxa máxima de abatimento de 15%, apontando uma fluidez do concreto. A baixa taxa de abatimento pode ser associada a baixa relação água/cimento, e a não utilização de aditivos (CAMPOS, 2009).

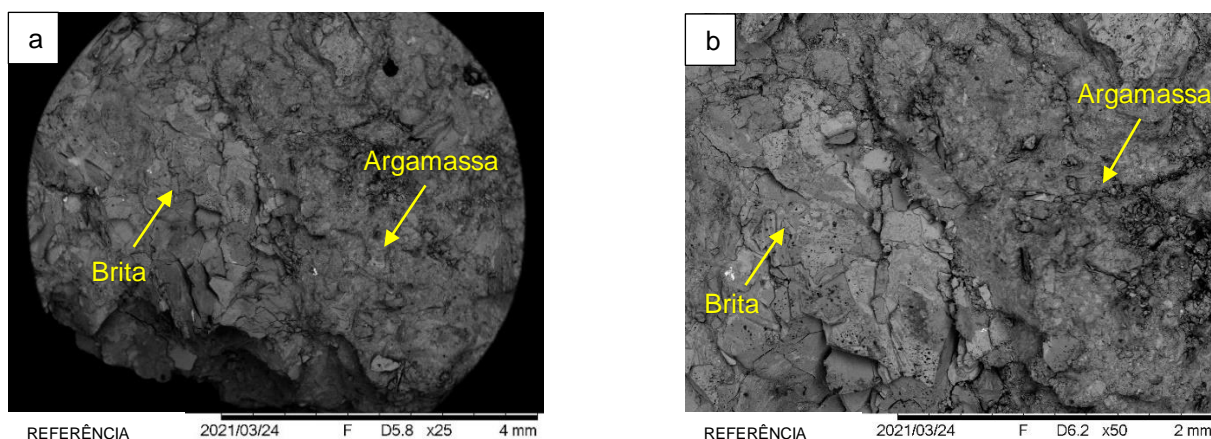
## MEV

As amostras utilizadas para análise no MEV, foram oriundas do rompimento do CP's e coletados para verificação na região de interesse para cada dosagem de substituição, podendo ser possível a verificação de características da fratura dentre outros comportamentos mecânicos do material.

### Análise no concreto Referência

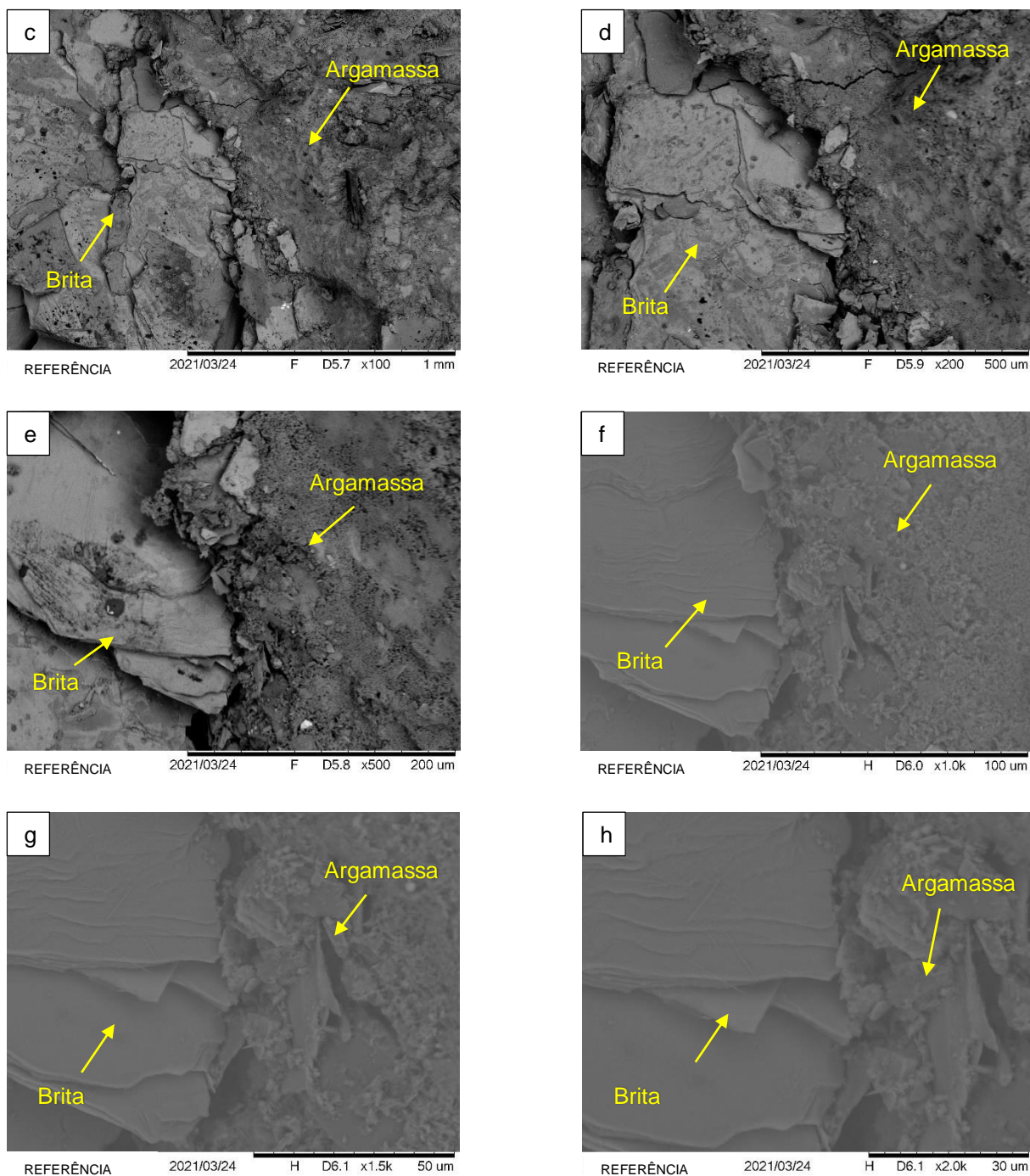
Para verificar as características de rompimento de maneira individual, foi realizado inicialmente a observação nas regiões de ruptura do concreto referência sem adição de isoladores de porcelana. As imagens demonstram a brita e a argamassa em junção. A digitalização mostrou uma boa resolução nas ampliações de 20x até 2000x, conforme descreve a Figura 33.

**Figura 33.** MEV CP Ref. com ampliação de 25x a 2000x. a) Ampliação de 25X. b) Ampliação de 50X. c) Ampliação de 100X. d) Ampliação de 200X. e) Ampliação de 500X. f) Ampliação de 1000X. g) Ampliação de 1500X. h) Ampliação de 2000X.





**Figura 33.** MEV CP Ref. com ampliação de 25x a 2000x. a) Ampliação de 25X. b) Ampliação de 50X. c) Ampliação de 100X. d) Ampliação de 200X. e) Ampliação de 500X. f) Ampliação de 1000X. g) Ampliação de 1500X. h) Ampliação de 2000X.



Fonte: Autor, 2021

Os resultados demonstram, o que é de fato esperado nos concretos; a brita se apresenta com características lamelar envolta pela argamassa, apresentando variações superficiais de relevos aleatórios, demonstrando uma característica

ovalada, demonstrando também sobre ampliação um valor de porosidade significativo, o que é conveniente para adesão e penetração do concreto.

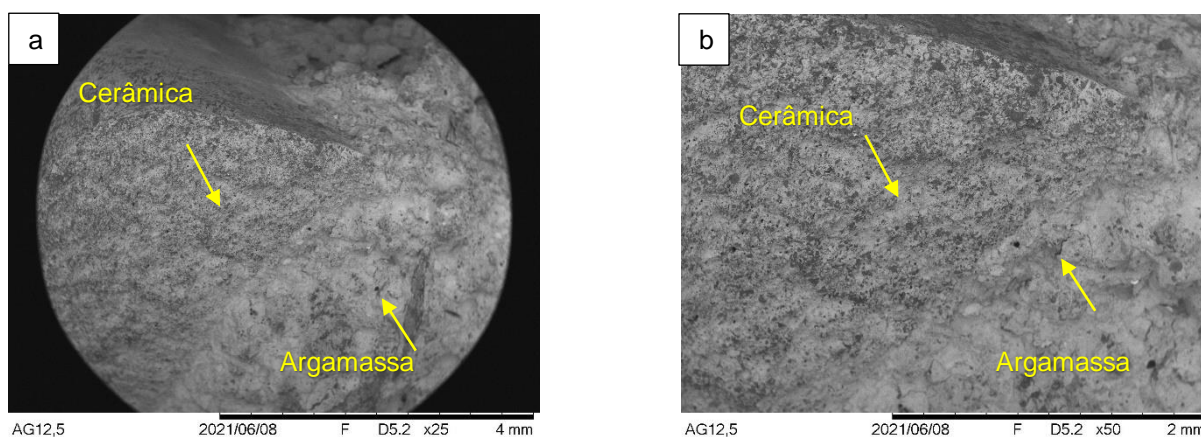
A homogeneidade dos grãos de areia e pó da brita, agrupados a uma matriz de argamassa exibiu uma amálgama endurecida e porosa a ampliações de 1000x. Sendo possível ser observado poros e inclusões nos agregados (COSTA, 2016).

É possível observar uma região de transição entre o agregado e argamassa suficientemente densificado, conduzindo a respostas satisfatórias do concreto referência (VIEIRA, 2017).

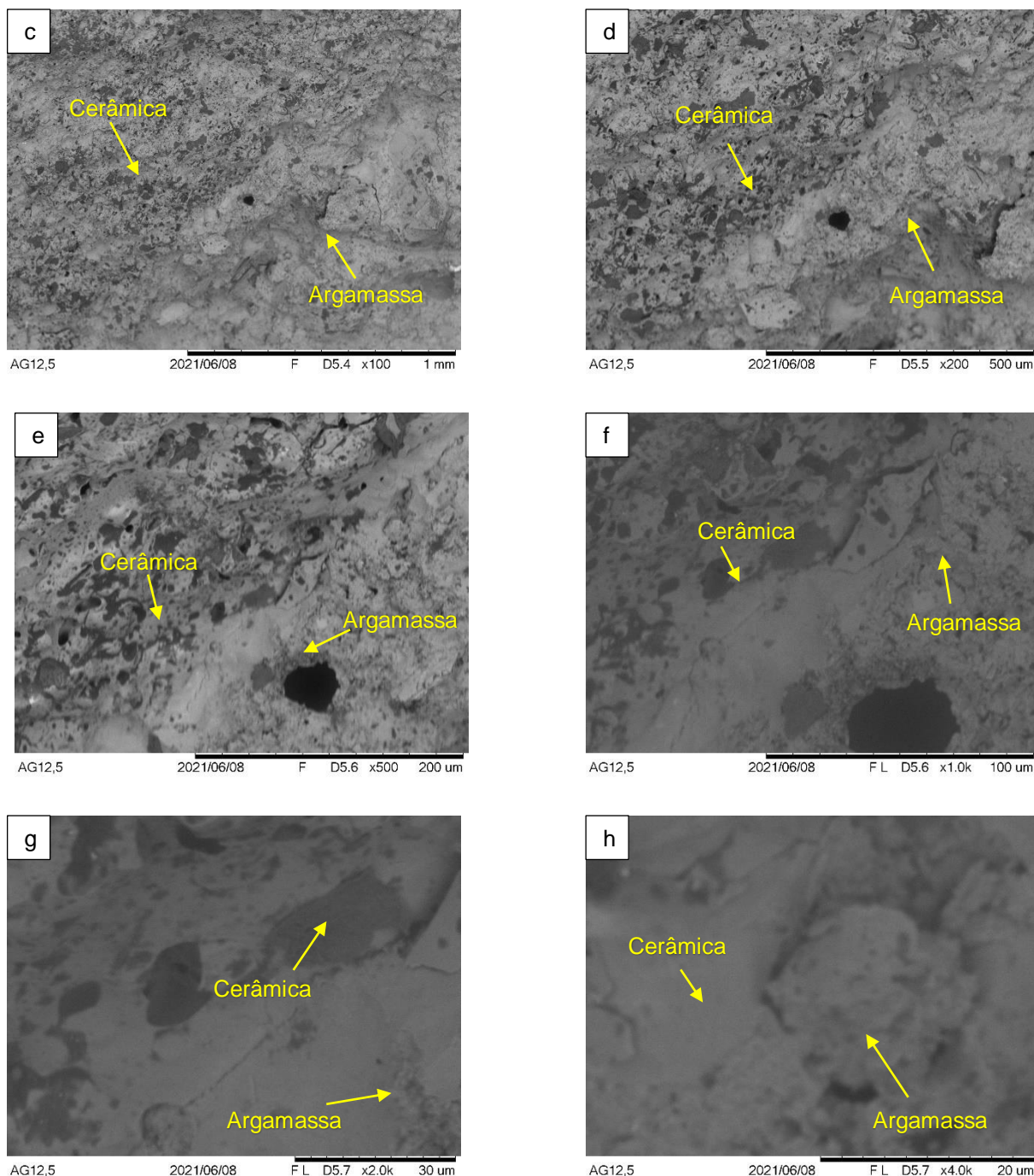
#### Análise do concreto AG 12,5

As características do concreto com a adição de isolador em substituição em 12,5%, AG12,5, pode ser demonstrado conforme a Figura 34. Com ampliações de 25x até 2000x, foi demonstrado a interação entre a argamassa e a parte porosa/lisa do isolador cerâmico.

**Figura 34.** MEV CP AG 12,5 com ampliação de 25x a 2000x. a) Ampliação de 25X. b) Ampliação de 50X. c) Ampliação de 100X. d) Ampliação de 200X. e) Ampliação de 500X. f) Ampliação de 1000X. g) Ampliação de 1500X. h) Ampliação de 2000X.



**Figura 34.** MEV CP AG 12,5 com ampliação de 25x a 2000x. a) Ampliação de 25X. b) Ampliação de 50X. c) Ampliação de 100X. d) Ampliação de 200X. e) Ampliação de 500X. f) Ampliação de 1000X. g) Ampliação de 1500X. h) Ampliação de 2000X.



Fonte: Autor, 2021

Os resultados obtidos referentes a adição da cerâmica exibiram satisfatoriamente melhor desempenho em relação ao ensaio de compressão, podendo ser representado pela Figura 34, exibindo uma boa aderência na face do isolador de



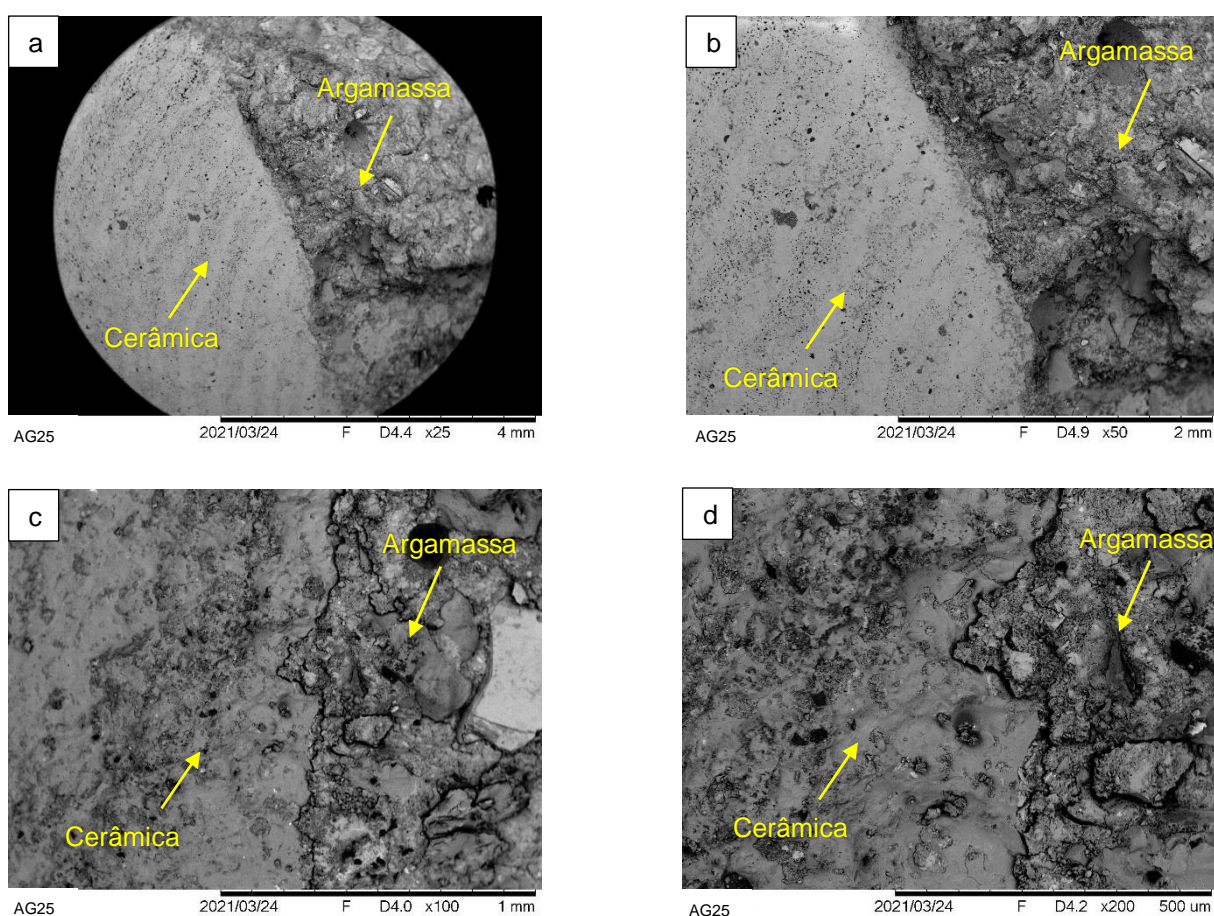
porcelana podendo verificar que a argamassa se ancorou dentro dos poros da cerâmica.

Também, pode ser observado uma região de transição, onde é possível verificar a argamassa ancorando dentro dos poros do isolador. Os poros irregulares internos contribuem para aderência da argamassa, contrabalaceando a superfície esmaltada dos isoladores (VIEIRA, 2017).

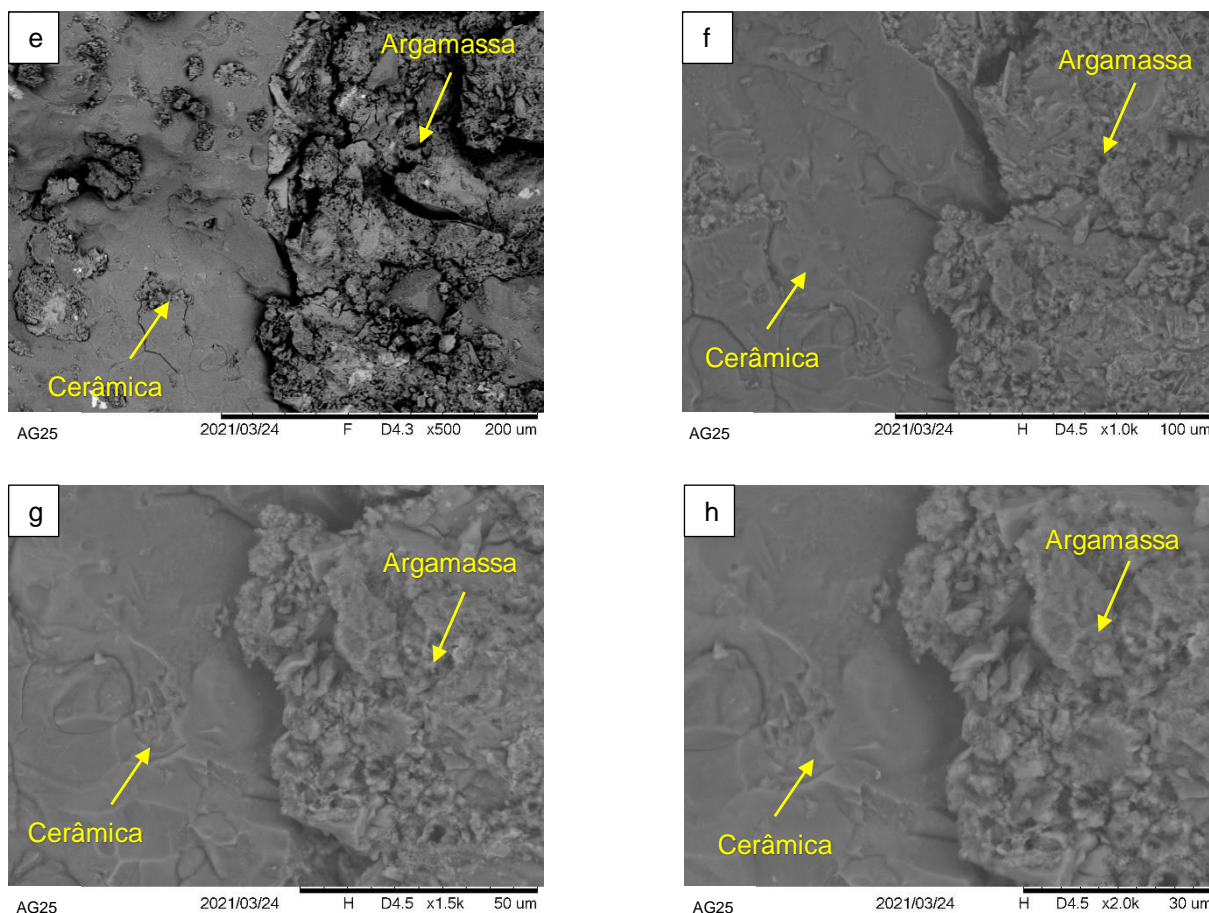
#### Análise do concreto AG 25

As análises realizadas no AG 25, pode ser demonstrado conforme a Figura 35. Com ampliações de 25x até 2000x, foi expresso a interação entre a argamassa e a parte porosa do isolador cerâmico.

**Figura 35.** MEV CP AG 25 com ampliação de 25x a 2000x. a) Ampliação de 25X. b) Ampliação de 50X. c) Ampliação de 100X. d) Ampliação de 200X. e) Ampliação de 500X. f) Ampliação de 1000X. g) Ampliação de 1500X. h) Ampliação de 2000X.



**Figura 35.** MEV CP AG 25 com ampliação de 25x a 2000x. a) Ampliação de 25X. b) Ampliação de 50X. c) Ampliação de 100X. d) Ampliação de 200X. e) Ampliação de 500X. f) Ampliação de 1000X. g) Ampliação de 1500X. h) Ampliação de 2000X.



Fonte: Autor, 2021

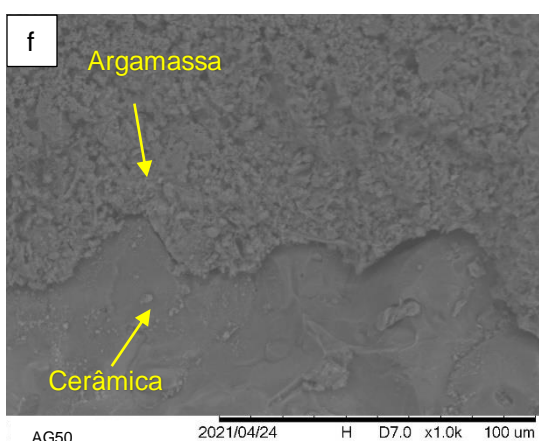
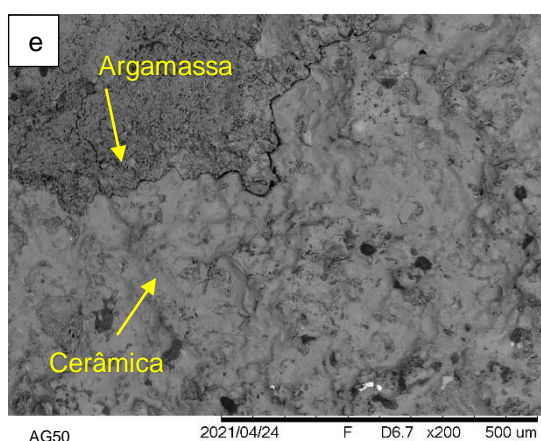
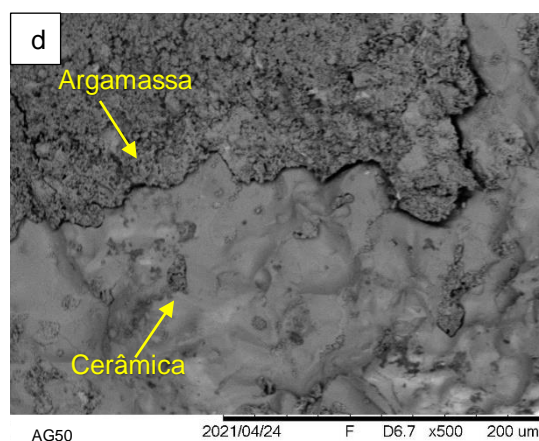
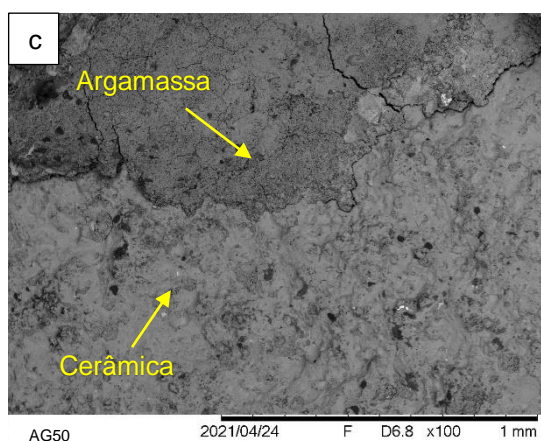
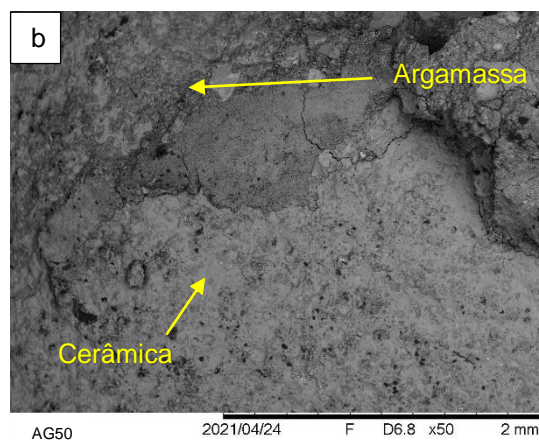
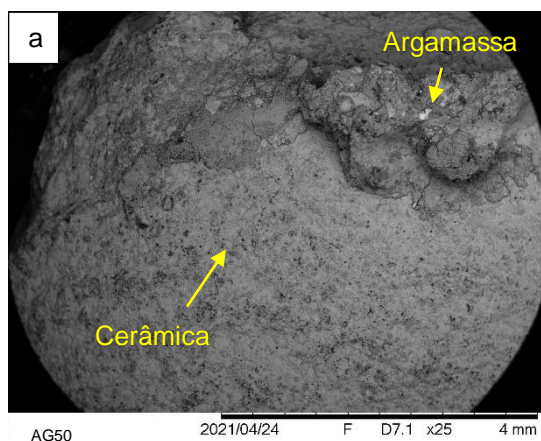
Nos resultados obtidos, justifica-se o aumento do valor da resistência a compressão em função do aumento da substituição de isoladores de porcelana, conforme demonstra nas ampliações da Figura 35. A aderência da argamassa na face dos isoladores, se demonstraram com características porosas. As possíveis causas desta aderência, podem ser identificadas em alguns casos, devido a reação dos silicatos quimicamente ativos do cimento com a cerâmica (COSTA, 2016).

#### Análise do concreto AG 50

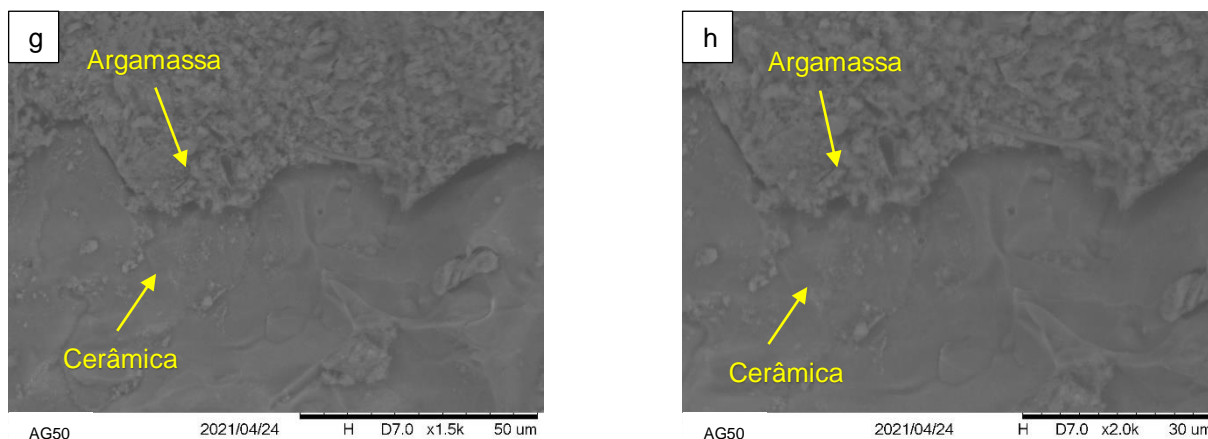
As análises realizadas no AG 50, representam a maior taxa de substituição do isolador cerâmico no concreto, e pode ser demonstrado conforme a Figura 36. Com ampliações de 25x até 2000x, foi expresso a interação entre a argamassa e a parte porosa do isolador cerâmico.



**Figura 36.** MEV CP AG 50 com ampliação de 25x a 2000x. a) Ampliação de 25X. b) Ampliação de 50X. c) Ampliação de 100X. d) Ampliação de 200X. e) Ampliação de 500X. f) Ampliação de 1000X. g) Ampliação de 1500X. h) Ampliação de 2000X.



**Figura 36.** MEV CP AG 50 com ampliação de 25x a 2000x. a) Ampliação de 25X. b) Ampliação de 50X. c) Ampliação de 100X. d) Ampliação de 200X. e) Ampliação de 500X. f) Ampliação de 1000X. g) Ampliação de 1500X. h) Ampliação de 2000X.



Fonte: Autor, 2021

Pelos resultados analisados, verifica-se que a argamassa se ancorou dentro dos poros dispostos pelo isolador cerâmico. No entanto, pode ser verificado que em algumas regiões, os isoladores cerâmicos exibem uma baixa resistência oriundo da parte esmaltada (face-vítrea) disposta pelo material cerâmico, reduzindo a aderência entre a argamassa e o isolador, gerando assim um dinamismo entre os valores dos ensaios de compressão, justificando a elevada variância dos dados. Em geral, a face esmaltada e a face porosa são contrabalanceadas, fazendo com que não afete a resistência mecânica, de forma a reduzir a confiabilidade do material.

Em geral, as amostras se demonstraram inalteradas e aderida a superfície de contato com a matriz, revelando uma boa resistência a fratura (COSTA, 2016).

Provavelmente, o atrito interno entre as partículas da estrutura intrincada do concreto, colaborou para o valor de resistência mecânica obtida, desenvolvendo uma estrutura semelhante a uma rede policristalina, de forma mais rudimentar que a exibida pelos metais, porém tão quanto eficiente (COSTA, 2016).

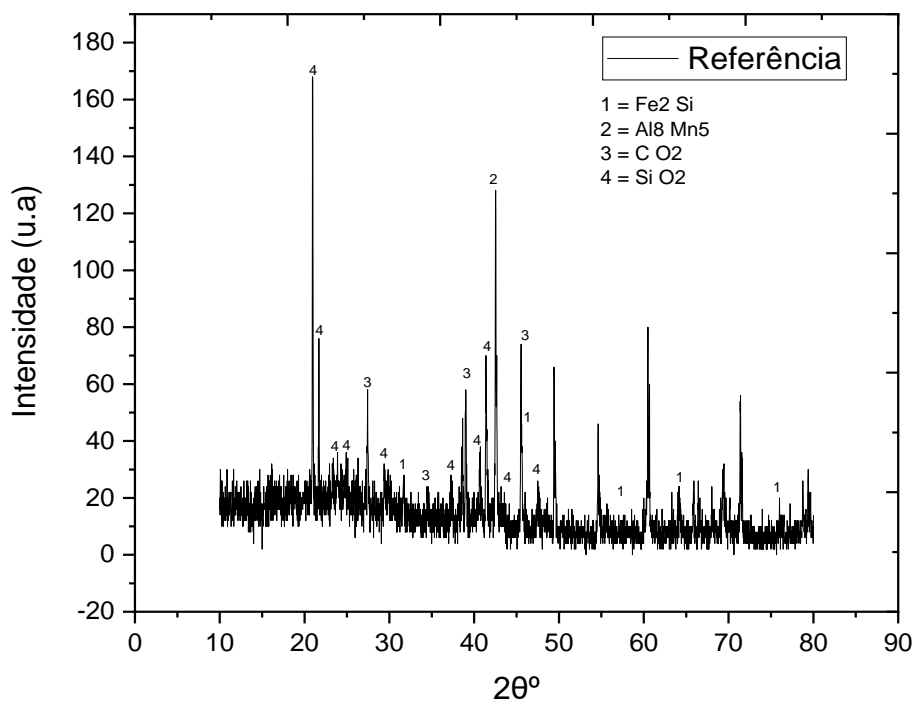
### **Difração de Raio X**

Foram realizadas as análises químicas no concreto referência e no concreto com substituição do agregado graúdo, para verificação da influência dos agregados no concreto.

### Análise do DRX do Concreto Referência

Inicialmente a análise foi realizada no concreto Referência onde não se teve a substituição do agregado, com o objetivo de verificar as características químicas oriundas das substituições em relação ao Referência, conforme descreve Figura 37.

**Figura 37.** Difratoograma do Concreto Referência

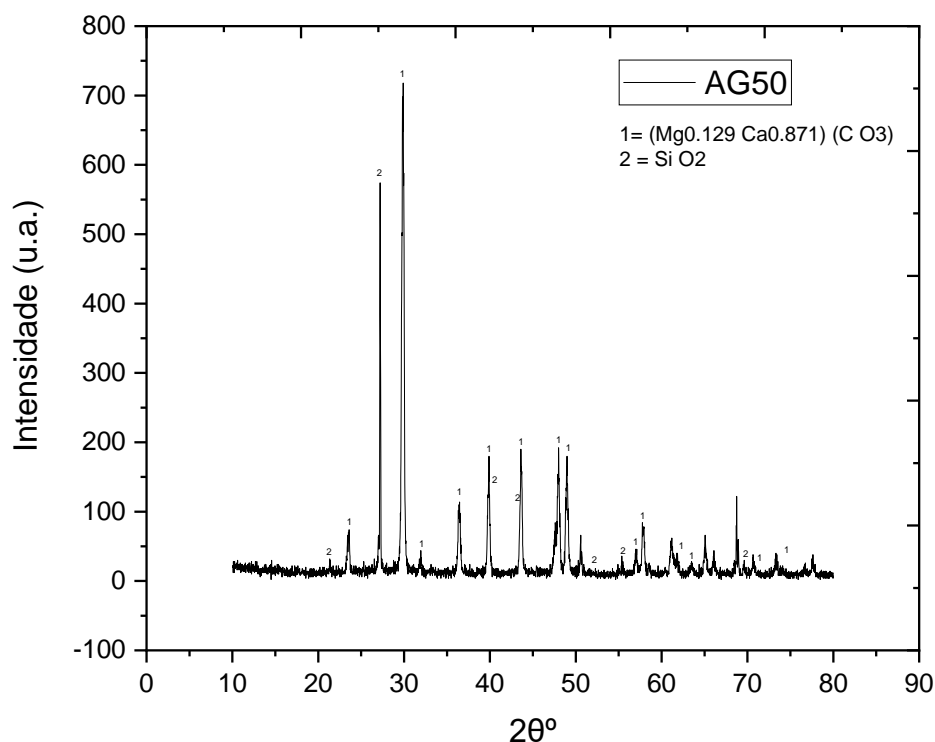


Fonte: Autor, 2021

Pode ser observada predominantemente o quartzo presente na areia e brita, encontrado entre 20° e 50°.

### Análise do DRX do Concreto AG 50

A análise foi realizada no concreto AG 50, onde obteve maior substituição do agregado, com o objetivo de verificar as características químicas oriundas das substituições, conforme descreve Figura 38.

**Figura 38.** Difratoograma do Concreto AG 50

Fonte: Autor, 2021

Pode ser observada predominantemente o quartzo presente na areia e brita, encontrado entre 20° e 50° e adjacentes elementos oriundos da brita e do isolador. Houve uma elevada predominância do quartzo e feldspato, que está associada a um valor razoável de resistência (COSTA, 2016).

Os componentes presentes exibem formatos policristalinos de tetraedros de silicatos, que demonstram uma elevada resistência (CABRAL, 2007).

### **Resultado da resistência a compressão Uniaxial do concreto**

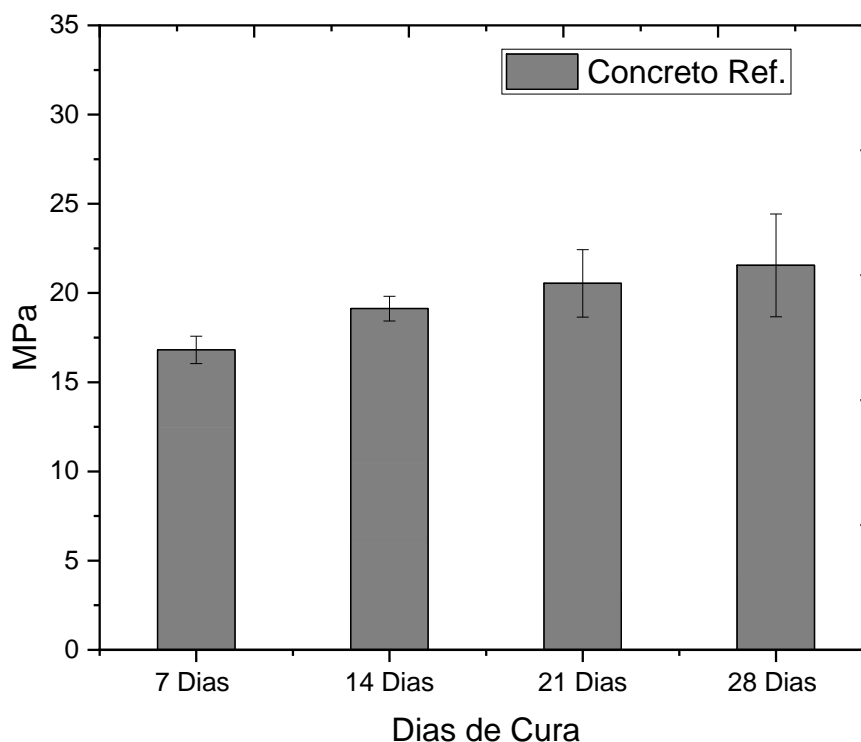
O ensaio de compressão foi realizado baseando-se na NBR 5739, tendo como amostragem 5 corpos de prova para as idades de 7, 14, 21 e 28 dias de cura, sendo a mesma realizada em câmara com solução saturada de hidróxido de cálcio com temperatura controlada em aproximadamente 25°C. As identificações das amostras estão associadas ao percentual de substituição do agregado graúdo. Para os CP's sem substituição de agregado graúdo, identificou-se "referência", para os CP's com substituição de 12,5%, "AG12,5". Para os CP's com substituição de 25%, "AG25". E para as substituições de 50%, "AG50".

Para o Concreto “referência” pôde-se obter os seguintes resultados, conforme descreve a Tabela 24 e Gráfico 15. Podendo ser observado que os valores tenderam a média, indicando um baixo desvio padrão. Nos dados a partir do 21º dia de cura, pôde ser observável um desvio superior ao 7º e 14º dia, possivelmente associado aos defeitos pré-existentes oriundos de alguns corpos de prova. No entanto, os valores da mediana se apresentaram semelhantes à média, indicando uma característica de equilíbrio de dados entre as amostras.

**Tabela 24.** Resultados ensaio compressão concreto Referência

Dias de Cura	Resultados (MPa)	Média	Mediana	Variância	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
7	15,52	16,81	17,02	0,58	0,77	4,55
	17,57					
	16,91					
	17,02					
	17,03					
14	19,19	19,12	19,19	0,48	0,69	3,62
	18,18					
	18,84					
	19,33					
	20,07					
21	20,15	20,54	20,07	3,58	1,89	9,21
	22,19					
	22,11					
	17,55					
	20,70					
28	23,07	21,55	22,46	8,30	2,88	13,37
	24,62					
	17,14					
	20,45					
	22,46					

Fonte: Autor, 2021

**Gráfico 15.** Resultados Resistencia a compressão Referência

Fonte: Autor, 2021

No gráfico 15, pôde ser observado, que os valores referentes a média indicaram uma linearidade das amostras para a taxa de crescimento dos dias de cura, resultados também verificados em Campos (2009), Campos e Paulon (2015), Portella et al. (2006).

Para o Concreto com substituição de 12,5% “AG12,5” pôde-se observar, que para todos os dias de cura, os mesmos tenderam a média, exibindo um baixo desvio padrão, indicando uma boa homogeneidade da mistura, principalmente por estar agrupando dois modelos de agregado graúdo ao concreto. Também, verificado que os valores da mediana convergiram a média indicando uma tendência entre as amostras, conforme descreve a Tabela 25 e Gráfico 16.

De acordo com Gráfico 16, pode ser observável um crescente da resistência a compressão de acordo com o aumento dos dias de cura, no entanto, pode ser verificado que essa característica não se apresenta de maneira linear conforme demonstra o concreto “referência”, possivelmente associado a inserção dos agregados oriundos dos isoladores de porcelana ao concreto. Essa característica é observada principalmente entre o 14<sup>o</sup> e 21<sup>o</sup> dia de cura. De maneira geral, os valores



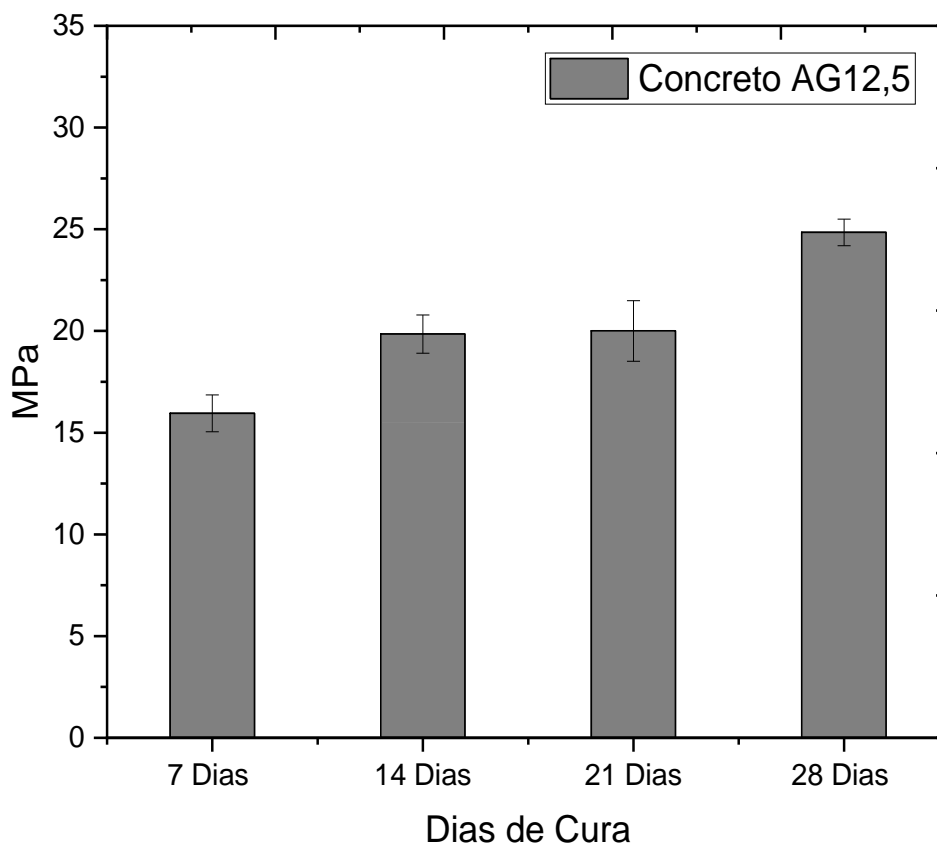
de resistência a compressão são superiores ao concreto “referência” indicando uma melhora na performance do mesmo com adição dos agregados.

Para o Concreto com substituição de 25% “AG25”, pôde ser verificado, que os valores também tenderam a média indicando um baixo desvio padrão, porém superior ao “AG12,5”, podendo estar associado a homogeneidade da mistura dos agregados naturais e os agregados oriundos de isoladores elétricos, no entanto, os valores de mediana tendem a média indicando tendência entre as amostras, conforme demonstra Tabela 26 e Gráfico 17.

**Tabela 25.** Resultados ensaio compressão concreto AG12,5.

Dias de Cura	Resultados (MPa)	Média	Mediana	Variância	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
7	17,02	15,95	16,21	0,82	0,91	5,68
	15,71					
	14,56					
	16,24					
	16,21					
	19,18					
14	21,19	19,85	19,96	0,88	0,94	4,73
	20,14					
	18,76					
	19,96					
	20,87					
	20,51					
21	17,98	20,00	20,51	2,22	1,49	7,45
	18,98					
	21,66					
	24,33					
	24,72					
	25,81					
28	24,22	24,85	24,72	0,42	0,65	2,62
	25,15					

Fonte: Autor, 2021

**Gráfico 16.** Resultados Resistencia a compressão AG12,5.

Fonte: Autor, 2021

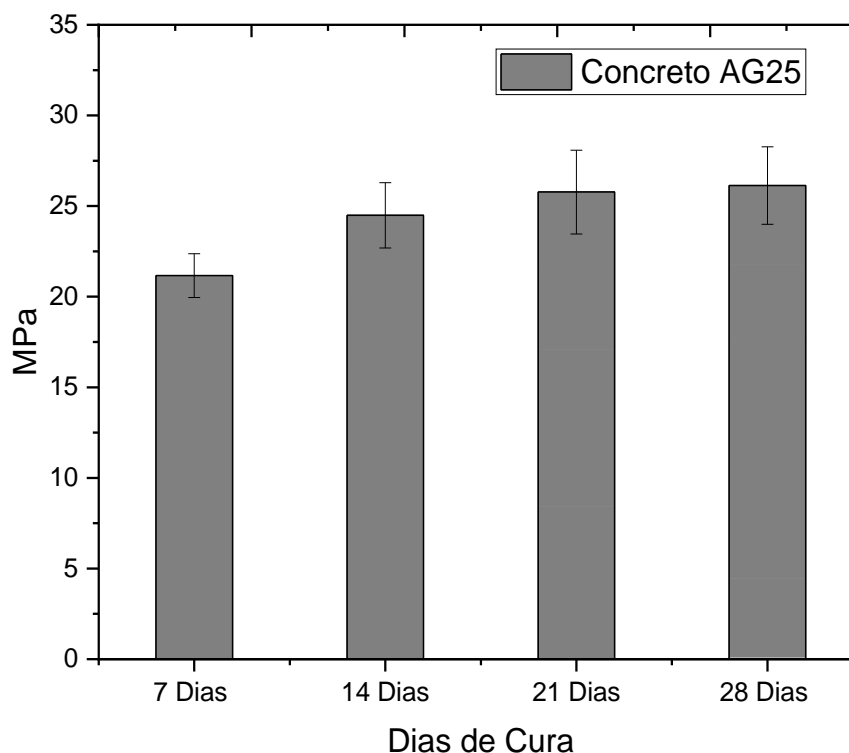
De acordo com o Gráfico 17, pôde ser observado que os valores de resistência a compressão foram superiores para todos os períodos de cura, tanto em comparação com o concreto “referência” tanto para o “AG12,5”, indicando que a adição de isoladores de porcelana de fato aumenta a resistência a compressão do material. A característica de linearidade da resistência em função da elevação dos dias de cura, também pôde ser observada nessa substituição, indicando um menor desvio entre 14º, 21º e 28º dia de cura, característica também observada no “AG12,5”.

Para o concreto com substituição de 50% “AG 50”, pôde ser verificado que os valores tenderam a média, indicando um baixo valor de desvio padrão, oriundo uma boa homogeneidade da mistura dos agregados. Os valores da mediana se apresentaram semelhantes à média, indicando uma característica de equilíbrio de dados entre as amostras, conforme descreve a Tabela 27 e Gráfico 18.

**Tabela 26.** Resultados ensaio compressão concreto AG25.

<b>Dias de Cura</b>	<b>Resultados (MPa)</b>	<b>Média</b>	<b>Mediana</b>	<b>Variância</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Coefficiente de Variação</b>
<b>7</b>	20,80	21,162	21,26	1,45	1,21	5,70
	21,26					
	19,36					
	21,81					
	22,58					
<b>14</b>	22,48	24,49	24,76	3,25	1,80	7,37
	24,76					
	25,51					
	26,80					
	22,90					
<b>21</b>	28,08	25,77	26,63	5,34	2,31	8,97
	27,54					
	23,17					
	23,44					
	26,63					
<b>28</b>	25,19	26,13	25,33	4,57	2,13	8,18
	25,33					
	26,98					
	23,79					
	29,38					

Fonte: Autor, 2021

**Gráfico 17.** Resultados Resistencia a compressão AG25.

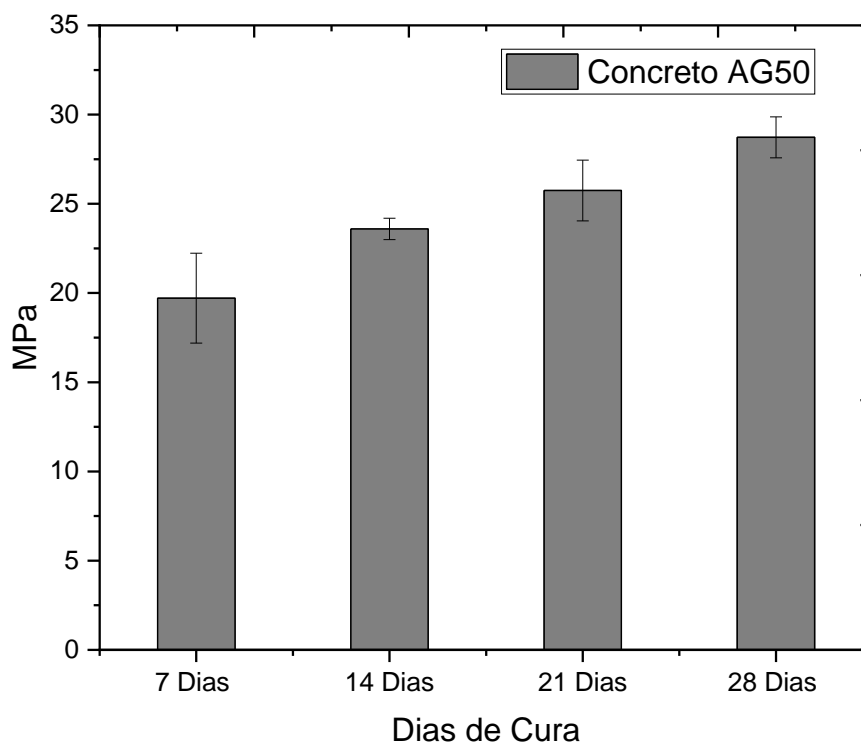
Fonte: Autor, 2021

De acordo com Gráfico 18, pôde ser verificado que a resistência a compressão exibe uma boa linearidade, em função do aumento dos dias de cura, características observadas em Campos (2009), Campos e Paulon (2015), Portella et al. (2006). Também pode ser observado que o valor de resistência a compressão no 28 dia de cura, foi o maior dentre todas as substituições, indicando que, quanto maior a substituição dos agregados maior o valor de resistência a compressão.

**Tabela 27.** Resultados ensaio compressão concreto AG50

<b>Dias de Cura</b>	<b>Resultados (MPa)</b>	<b>Média</b>	<b>Mediana</b>	<b>Variância</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Coefficiente de Variação</b>
<b>7</b>	22,12	19,71	20,13	6,33	2,56	12,76
	19,79					
	19,51					
	20,13					
	21,01					
<b>14</b>	23,10	23,59	23,47	0,36	0,60	2,54
	23,01					
	23,94					
	24,44					
	23,47					
<b>21</b>	23,42	25,75	25,32	2,90	1,70	6,61
	27,90					
	25,32					
	25,28					
	26,81					
<b>28</b>	27,59	28,73	28,24	1,32	1,15	4,00
	28,24					
	27,97					
	30,33					
	29,50					

Fonte: Autor, 2021

**Gráfico 18.** Resultados Resistencia a compressão AG50

Fonte: Autor, 2021

#### Análise de Resistência a compressão

Para verificação dos dados de resistência a compressão, inicialmente foi realizada a análise estatística pela ANOVA, com o objetivo de verificar a significância dos dados. Nesse processo foi utilizado um nível de significância de 5%, avaliando as variáveis influentes no sistema. Para realização desse modelo, existe dois parâmetros para análise dos dados: o p-valor e Fc. A hipótese nula que está sendo verificada é de que os valores são análogos e não existe influência significativa entre as variáveis analisadas, podendo ser confirmada a hipótese quando p-valor exibe um valor maior que o nível de significância determinado. Ocorrendo o inverso, quando o p-valor é inferior ao nível de significância, a hipótese nula não se confirma, indicando que a variável exibe influência significativa no sistema.

Sendo assim, foi avaliado inicialmente a relação entre os períodos de cura dos concretos, associando em 4 grupos com 5 amostragens referentes as amostras ensaiadas. Com isso, a Tabela 28 indica a significância dos dias de cura do concreto.

**Tabela 28.** Análise ANOVA entre amostras individuais Resistência a compressão

Fonte da variação	SQ	gl	valor-P	F crítico
Entre grupos ref.	63,27	3	0,004351	3,24
Entre grupos AG12,5.	199,11	3	$5,61 \cdot 10^{-9}$	3,24
Entre grupos AG25.	76,87	3	0,003177	3,24
Entre grupos AG50.	215,74	3	$1,97 \cdot 10^{-6}$	3,24

Fonte: Autor, 2021

Conforme demonstra Tabela 28, foi possível verificar que o p-valor ficou inferior ao nível de significância determinado 0,05. Sendo assim, os valores referentes a cura dos concretos foram significativos, demonstrando que cada período de cura, exercem isoladamente influência na variável compressão.

A próxima verificação também utiliza da ferramenta de análise de variância ANOVA, com o objetivo de identificar a significância dos dados referentes a resistência a compressão dos grupos, devido a substituição dos agregados graúdos, sendo dividida pelo dia de cura. A análise foi realizada em 4 grupos com 5 amostragens referentes aos dias de cura de cada substituição, conforme demonstra Tabela 29.

Demonstrado pela Tabela 29, verificou-se que o p-valor ficou inferior ao nível de significância determinado em 0,05. Portanto, os valores referentes a substituição dos agregados em função do período de cura, exercem isoladamente influência na variável compressão, conforme descreve Gráfico 19.

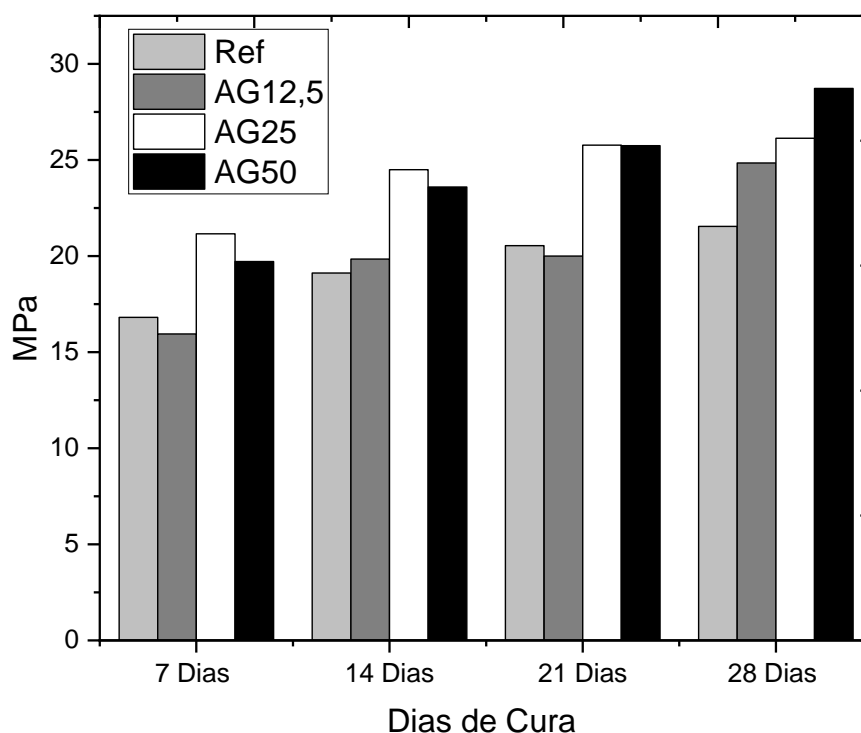
A partir do Gráfico 19, pode ser verificado uma crescente da resistência a compressão em função das substituições dos agregados graúdos por isoladores elétricos de porcelana. Tendo como o maior valor de compressão para o AG50 no 28º dia de cura.

**Tabela 29.** Análise de variância ANOVA em média das substituições Resistência a compressão

Fonte da variação	SQ	gl	valor-P	F crítico
Entre grupos 7 dias cura	89,45	3	0,000149	3,24
Entre grupos 14 dias cura	107,16	3	$1,12 \cdot 10^{-6}$	3,24
Entre grupos 21 dias cura	151,32	3	$8,36 \cdot 10^{-5}$	3,24
Entre grupos 28 dias cura	133,58	3	0,00021	3,24

Fonte: Autor, 2021

**Gráfico 19.** Resultados Resistencia a compressão do concreto



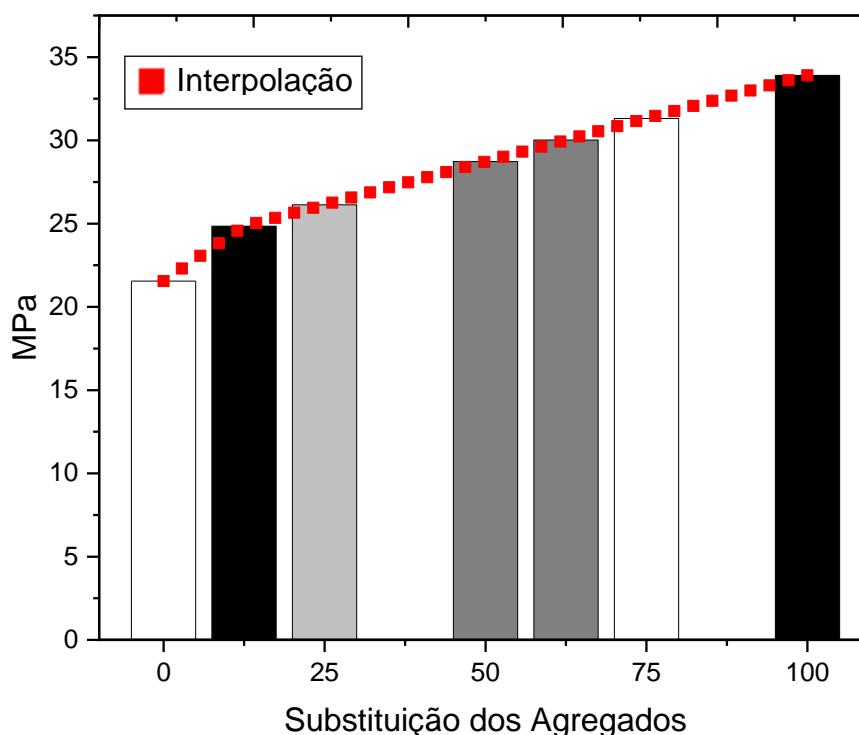
Fonte: Autor, 2021

Com o objetivo de indicar uma tendência da resistência em função da substituição dos agregados, o Gráfico 20, indica a curva da resistência interpolada e extrapolada de forma linear para os valores de resistência a compressão no 28º dia



de cura do concreto. Extrapolando para os valores de 62,5%, 75% e 100% de substituição.

**Gráfico 20.** Interpolação e extrapolação dos dados de resistência a compressão ao 28º dia de cura



Fonte: Autor, 2021

No entanto, foi necessário a avaliação individual de cada substituição em função da adição dos agregados. Sendo assim, a Tabela 30 exibe uma avaliação da resistência a compressão dos CP's em função da substituição.

A partir dos dados oriundos da Tabela 30, foi possível observar que no 7º dia de cura dos concretos, o melhor desempenho se deu no AG25, indicando uma melhor resistência a compressão dentre as substituições, indicando um aumento de 25,89% em função do CP padrão "referência". No 14º dia de cura, o AG25 também se despontou em relação aos outros concretos indicando uma taxa de crescimento de 23,40% em função do concreto padrão "referência". Já no 21º dia de cura, tanto o AG25 quanto o AG50, exibiram um bom desempenho em relação ao concreto padrão, indicando uma taxa de 25,46% e 25,34% para o AG25 e AG50, respectivamente em função do concreto padrão "referência". No 28º dia de cura, foi observado que o concreto AG50 exibiu uma maior taxa de crescimento em relação ao concreto padrão

“referência” com um aumento de 33,31%. Além disso, pôde ser observado que os concretos oriundos de substituição se demonstraram superior ao concreto referência, indicando uma melhora da resistência a compressão dos concretos com a inserção de isoladores elétricos de porcelana.

**Tabela 30.** Avaliação dos concretos para ensaio de resistência a compressão

	Base	REF.	AG12,5	AG25	AG50
7 Dias	REF.	1,00%	- 5,13%	25,89%	17,26%
	AG12,5	5,40%	1,00%	32,69%	23,60%
	AG25	-20,56%	-24,63%	1,00%	-6,85%
	AG50	-14,72%	-19,09%	7,36%	1,00%
14 Dias	REF.	1,00%	3,79%	28,07%	23,38%
	AG12,5	-3,65%	1,00%	23,4%	18,87%
	AG25	-21,92%	-18,96%	1,00%	-3,67%
	AG50	-18,95%	-15,88%	3,81%	1,00%
21 Dias	REF.	1,00%	-2,62%	25,46%	25,34%
	AG12,5	2,7%	1,00%	28,85%	28,73%
	AG25	-20,29%	-22,39%	1,00%	-0,09%
	AG50	-20,22%	-22,32%	0,09%	1,00%
28 Dias	REF.	1,00%	15,31%	21,28%	33,31%
	AG12,5	-13,27%	1,00%	5,18%	15,62%
	AG25	-17,55%	-4,93%	1,00%	9,92%
	AG50	-24,99%5	-13,51%	-9,02%	1,00%

Fonte: Autor, 2021

Observou-se que os concretos não obedeceram com rigor a lei de Abrams, exibindo resultados distintos para resistência a compressão para mesma relação água/cimento. Provavelmente o fenômeno aconteceu devido a substituição do agregado, com propriedades distintas e quantidades volumétricas distintas (VIEIRA, 2017).

Um fato que provavelmente contribuiu para o aumento do desvio dos valores de resistência a compressão, está associado a parte esmaltada do isolador elétrico de porcelana, onde foi possível verificar as características de ruptura do concreto com adição de isoladores associada a parte esmaltada, indicando um ponto de fragilidade no concreto, devido à baixa aderência entre a pasta e a parte esmaltada do isolador.

Outra justificativa que se deu a melhora de performance, pode ser enunciada a melhor distribuição granulométrica dos agregados artificiais que entregam ao concreto um melhor adensamento, devido à baixa capacidade de absorção de água (CAMPOS; PAULON, 2015).

### Índice de vazios

O ensaio de índice de vazios, foi realizado no laboratório do UniFoa ao 28º dia de cura dos CP's. Os dados dos ensaios, foram comparados com a Tabela 31 que classifica o índice de vazios, podendo além de comparar os concretos, avaliar a resposta da adição em função de resultados dispostos na literatura (COSTA, 2016).

**Tabela 31.** Classificação do índice de vazios

Índice de vazios (IV)	Classificação
$IV < 12\%$	Excelente
$12\% \leq IV < 14\%$	Bom
$14\% \leq IV < 15\%$	Normal
$15\% \leq IV < 17\%$	Marginal
$IV \geq 17\%$	Ruim

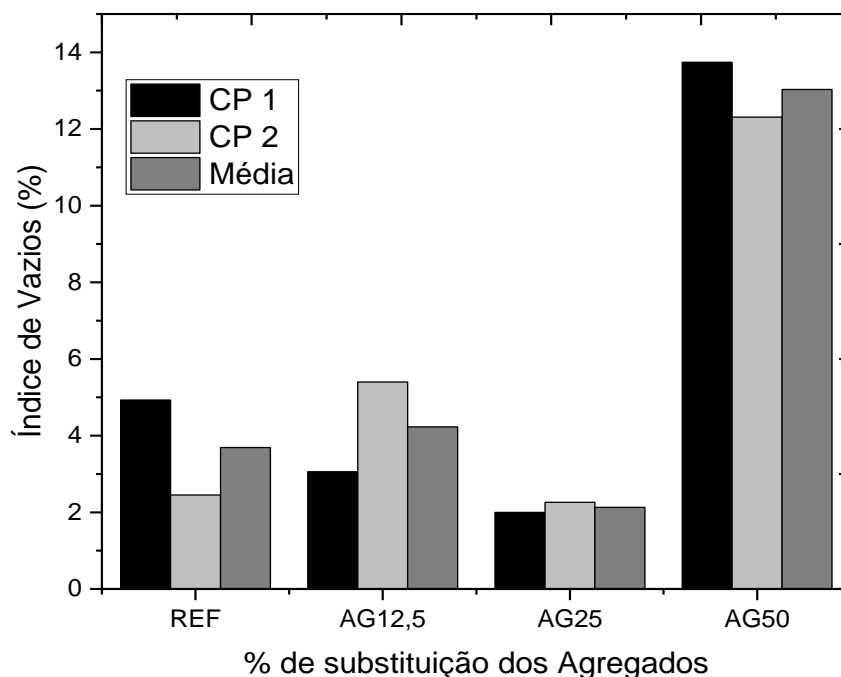
Fonte: (COSTA, 2016)

O ensaio foi realizado conforme NBR 9778, e os resultados coletados, foram comparados entre si, apresentando uma diferença máxima de 10,9% entre o concreto AG 25 e AG 50. A Tabela 32 e Gráfico 21 indica a durabilidade do concreto, e a Tabela 31 classifica os mesmos de acordo com os resultados.

**Tabela 32.** Resultados, comparação e classificação do índice de vazios

Substituição	CP 1 - Índice (%)	CP 2 - Índice (%)	Média ( $\bar{x}$ )	Desvio padrão $\sigma$	Avaliação
Ref.	4,93	2,45	3,69	1,75	Excelente
AG12,5	3,06	5,40	4,23	1,65	Excelente
AG25	2,0	2,26	2,13	0,18	Excelente
AG50	13,74	12,31	13,03	1,01	Bom

Fonte: Autor, 2021

**Gráfico 21.** Ensaio de índices de vazio CP's

Fonte: Autor, 2021

#### Análise do Índice de vazios

Para verificação dos dados de Índice de vazios, também foi utilizada a metodologia de análise da variância ANOVA. Nessa verificação foi utilizado um nível de significância de 5%, analisando as variáveis influentes no sistema. Para análise desse modelo de verificação, existem dois parâmetros para diagnóstico dos dados: o p-valor e Fc. A hipótese nula que está sendo verificada, é de que os valores são semelhantes e não há influência significativa entre as variáveis analisadas, podendo ser confirmado a hipótese, quando p-valor exibe um valor maior que o nível de significância determinado. Ocorrendo o inverso, o p-valor inferior ao nível de significância, a hipótese nula não se confirma, indicando que a variável exibe influência significativa no sistema.

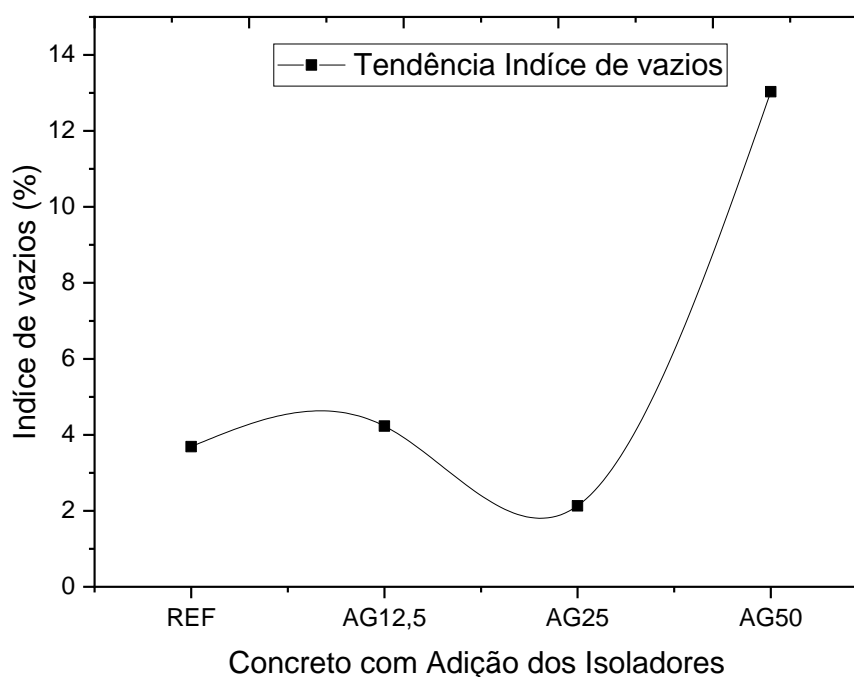
Então, inicialmente foram avaliados os dados referentes ao índice de vazios dos grupos contendo as devidas substituições conforme demonstra Tabela 33. O mesmo foi dividido em 4 grupos devido as substituições com 2 amostragens de dados para cada agrupamento.

**Tabela 33.** Análise de variância ANOVA no Índice de vazios

Fonte da variação	SQ	gl	valor-P	F crítico
Entre grupos AG	144,74	3	0,003787	6,59

Fonte: Autor, 2021

Demonstrado pela Tabela 33, verifica-se que o p-valor é inferior ao nível de significância determinado em 0,05. Sendo assim, os valores referentes a substituição dos agregados, exerce isoladamente influência na variável índice de vazios, conforme descreve Gráfico 22.

**Gráfico 22.** Tendência CP's índice de vazios

Fonte: Autor, 2021

O Gráfico 22 demonstra a resposta da substituição dos agregados indicando um menor índice de vazios para substituição de 25% e logo após um aumento para o AG50.

A dinâmica dos valores do índice de vazios, pode estar associada ao menor índice de absorção da cerâmica e pela característica granulométrica do agregado graúdo. Outro fator, que exibe uma grande influência nos vazios são as faces vidradas da cerâmica que de fato interferem nos vazios do CP's.

Com isso, foi avaliada a resposta individual de cada substituição, em função da adição dos agregados. Portanto, a Tabela 34 demonstra a avaliação do índice de vazios em função da substituição.

**Tabela 34.** Avaliação do índice de vazios do concreto

		<b>REF.</b>	<b>AG12,5</b>	<b>AG25</b>	<b>AG50</b>
<b>28 Dias</b>	<b>REF.</b>	1,00%	14,60%	-41,42%	252,84%
	<b>AG12,5</b>	-12,74%	1,00%	-48,88%	207,87%
	<b>AG25</b>	70,69%	95,62%	1,00%	502,25%
	<b>AG50</b>	-71,66%	-67,52%	-83,40%	1,00%

Fonte: Autor, 2021

Pôde ser observado um elevado aumento do índice de vazios no AG50 em relação as demais substituições, conforme demonstra Tabela 34. O gráfico de tendência se apresenta linear com uma descontinuidade em 25%, onde foi possível observar uma queda brusca no índice de absorção.

O aumento dos valores do índice de vazios associados a substituição do AG50 em relação ao concreto Referência, pode estar associado ao espaço gerado entre a porcelana e a argamassa do concreto, oriunda da evaporação da água de amassamento que não foi absorvida pela porcelana (CAMPOS, 2009).

### **Índice de absorção e Capilaridade**

O ensaio para análise do índice de absorção nos corpos de prova foi realizado baseado na NBR 9778. Foram realizados os ensaios ao 28<sup>o</sup> dia de cura dos CP's e verificado de forma individual para cada substituição do agregado graúdo.

Foi realizado o índice de absorção por capilaridade com base na NBR 9779, 1995, de forma adaptada, com objetivo de identificar a absorção por capilaridade do CP's conforme substituição.

Inicialmente realizado o ensaio no concreto Referência e posteriormente nos AG12,5, AG25 e AG50, com o objetivo de verificar a interação entre os agregados em adição ao concreto.

### Absorção concreto Referência

O concreto referência apresentou uma maior homogeneidade a partir dos gráficos, exibindo um menor índice de absorção. Os resultados já eram esperados, devido o índice de absorção da brita em função dos isoladores elétricos de porcelana, caracterizados anteriormente de forma individual. As respostas podem ser verificadas conforme demonstra Tabela 35 e Gráfico 23.

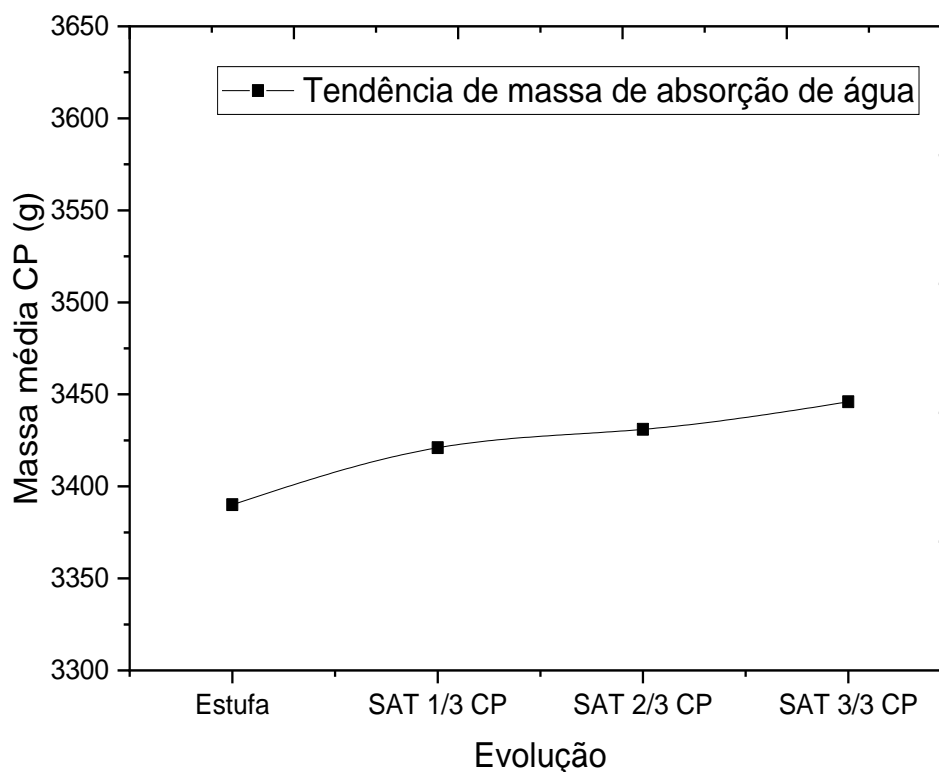
O Gráfico 23, indica uma taxa de variação 1,65% com mais intensidade nas 72 horas, indicando uma boa linearidade dos dados. O desvio associado aos corpos de prova pode estar associado a distribuição dos agregados dentro dos mesmos. No entanto, o concreto “referência” indica um baixo índice de absorção de água, fazendo com que tenha uma maior durabilidade do mesmo.

**Tabela 35.** Ensaio de índice de absorção e capilaridade concreto Referência

Característica	Tempo (h)	CP 1	CP 2	Média ( $\bar{x}$ )	Desvio padrão $\sigma$
Seca (Estufa) (g)	24	3318	3462	3390	-
Saturação de $H_2O$ 1/3 do CP (g)	24	3360	3482	3421	-
Saturação de $H_2O$ 2/3 do CP (g)	48	3374	3488	3431	-
Saturação de $H_2O$ 3/3 do CP (g)	72	3392	3500	3446	-
Hidrostática (g)	96	1892	1950	1921	-
Índice de absorção 1/3 de água	-	1,26	0,57	0,915	0,48
Índice de absorção 2/3 de água	-	1,68	0,75	1,22	0,66
Índice de absorção de água	-	2,23	1,09	1,66	0,81
Capilaridade 1/3 de água	-	0,53	0,25	0,39	0,20
Capilaridade 2/3 de água	-	0,71	0,33	0,52	0,29

Fonte: Autor, 2021

**Gráfico 23.** Resposta do índice de absorção do concreto Referência



Fonte: Autor, 2021

#### Absorção concreto AG 12,5

O concreto AG 12,5 com substituição de 12,5% de isoladores de porcelana, apresentaram uma taxa de índice de absorção 14,51% superior ao concreto referência. No entanto, apresentou uma homogeneidade razoável, conforme demonstra Tabela 36 e Gráfico 24.

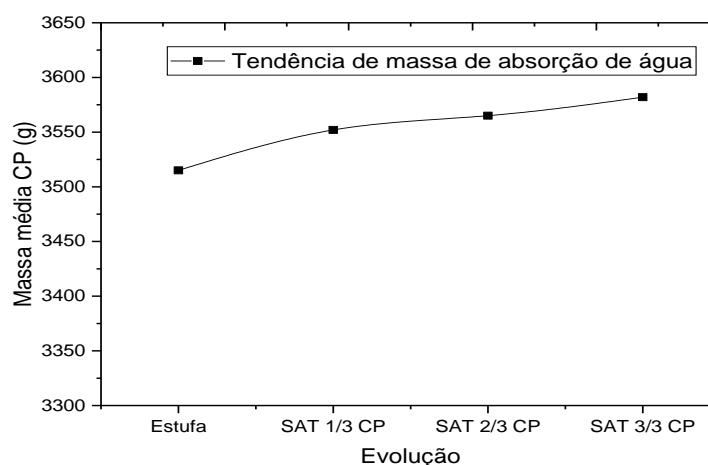
O Gráfico 23, indica uma taxa de variação 1,90% com mais intensidade nas 72 horas, sendo superior ao concreto “referência”, provavelmente oriundo da adição dos isoladores de porcelana. O elevado desvio entre os CP's pode estar associados à distribuição dos agregados dentro do CP. No entanto, os valores foram próximos ao concreto referência indicando similaridade entre os dados.



**Tabela 36.** Ensaio de índice de absorção e capilaridade concreto AG12,5

Característica	Tempo (h)	CP 1	CP 2	Média ( $\bar{x}$ )	Desvio padrão $\sigma$
Seca (Estufa) (g)	24	3510	3520	3515	-
Saturação de $H_2O$ 1/3 do CP (g)	24	3528	3576	3552	-
Saturação de $H_2O$ 2/3 do CP (g)	48	3538	3592	3565	-
Saturação de $H_2O$ 3/3 do CP (g)	72	3558	3606	3582	-
Hidrostática (g)	96	1990	2014	4004	-
Índice de absorção 1/3 de água	-	0,51	1,59	1,05	0,76
Índice de absorção 2/3 de água	-	0,79	2,05	1,42	0,89
Índice de absorção de água	-	1,37	2,44	1,91	0,76
Capilaridade 1/3 de água	-	0,23	0,71	0,47	0,34
Capilaridade 2/3 de água	-	0,36	0,92	0,64	0,40

Fonte: Autor, 2021

**Gráfico 24.** Resposta do índice de absorção do concreto AG12,5

Fonte: Autor, 2021

### Absorção concreto AG 25

O concreto AG 25 com substituição de 25% de isoladores de porcelana, apresentaram uma taxa de índice de absorção 42,29% inferior ao concreto referência. No entanto, apresentou uma homogeneidade inferior comparado a substituição de 12,5%, conforme demonstra Tabela 37 e Gráfico 25.

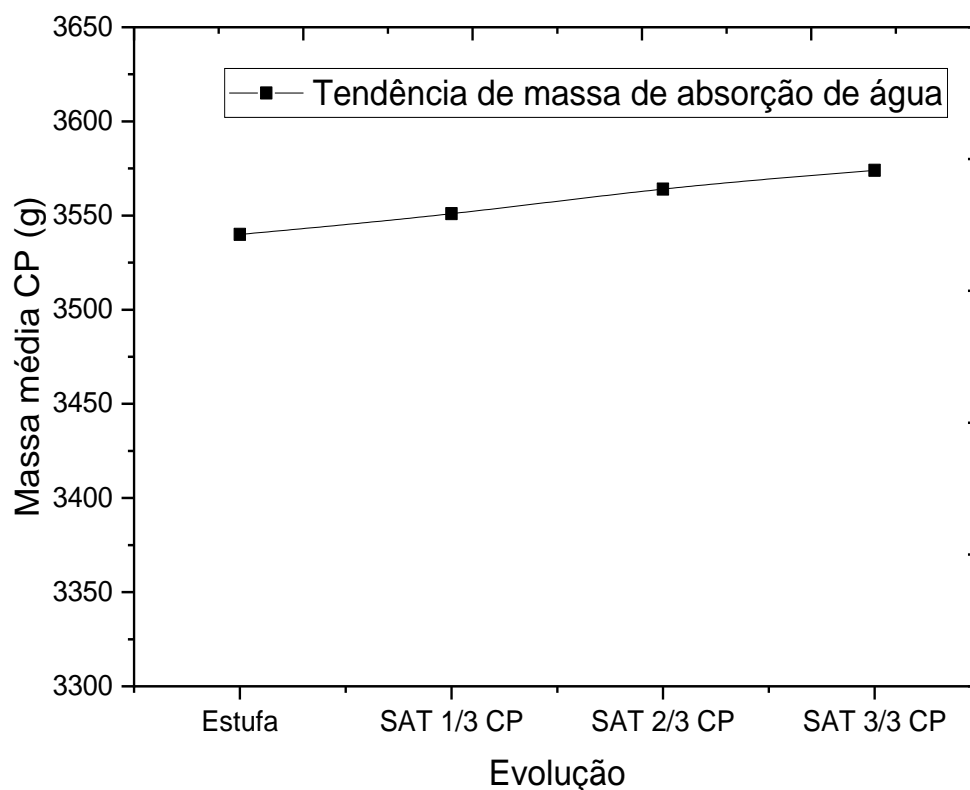
O Gráfico 25, indica uma taxa de variação 0,96% com mais intensidade nas 72 horas, sendo inferior ao concreto “referência” e “AG12,5”, demonstrando uma maior durabilidade do concreto com essa substituição. Essa característica, também pode ser observada em Campos (2009), em substituições de 25%. O desvio entre as amostras se demonstraram baixos, indicando uma boa homogeneidade entre os agregados conjugados com a pasta.

**Tabela 37.** Ensaio de índice de absorção e capilaridade concreto AG25

Característica	Tempo (h)	CP 1	CP 2	Média ( $\bar{x}$ )	Desvio padrão $\sigma$
Seca (Estufa) (g)	24	3532	3548	3540	-
Saturação de $H_2O$ 1/3 do CP (g)	24	3544	3558	3551	-
Saturação de $H_2O$ 2/3 do CP (g)	48	3556	3572	3564	-
Saturação de $H_2O$ 3/3 do CP (g)	72	3564	3584	3574	-
Hidrostática (g)	96	2008	1998	2003	-
Índice de absorção 1/3 de água	-	0,34	0,28	0,31	0,04
Índice de absorção 2/3 de água	-	0,68	0,68	0,68	0,00
Índice de absorção de água	-	0,91	1,01	0,96	0,07
Capilaridade 1/3 de água	-	0,15	0,13	0,14	0,01
Capilaridade 2/3 de água	-	0,31	0,31	0,31	0,00

Fonte: Autor, 2021

**Gráfico 25.** Resposta do índice de absorção do concreto AG25



Fonte: Autor, 2021

#### Abosrção concreto AG 50

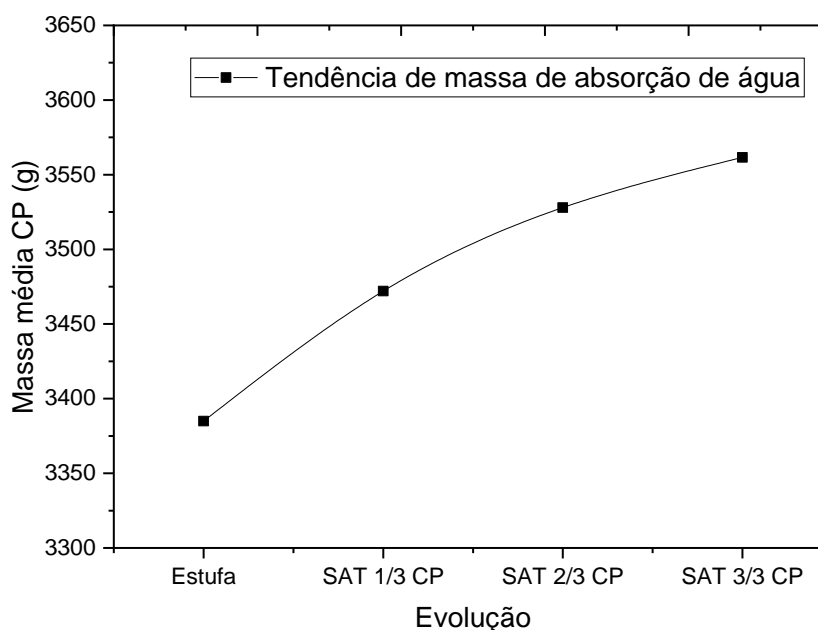
O concreto AG 50 com substituição de 50% de isoladores de porcelana apresentaram uma taxa de índice de absorção 213,49% superior ao concreto referência. No entanto, apresentou uma homogeneidade inferior comparado a substituição de 25%, conforme demonstra Tabela 38 e Gráfico 26.

O Gráfico 26, indica uma taxa de variação 5,21% com mais intensidade nas 72 horas, sendo superior a todas as demais substituições, indicando que quanto maior a substituição, os vazios se elevam, reduzindo a vida útil do concreto. Dados também observado em Campos (2009) e Vieira (2017).

**Tabela 38.** Ensaio de índice de absorção e capilaridade concreto AG50

<b>Característica</b>	<b>Tempo (h)</b>	<b>CP 1</b>	<b>CP 2</b>	<b>Média (<math>\bar{x}</math>)</b>	<b>Desvio padrão <math>\sigma</math></b>
<b>Seca (Estufa) (g)</b>	<b>24</b>	3390,0	3380,0	3385,0	-
<b>Saturação de <math>H_2O</math> 1/3 do CP (g)</b>	<b>24</b>	3484,0	3460,0	3472,0	-
<b>Saturação de <math>H_2O</math> 2/3 do CP (g)</b>	<b>48</b>	3540,0	3516,0	3528,0	-
<b>Saturação de <math>H_2O</math> 3/3 do CP (g)</b>	<b>72</b>	3579,1	3544,0	3561,6	-
<b>Hidrostática (g)</b>	<b>96</b>	2222,0	2212,0	2217	-
<b>Índice de absorção 1/3 de água</b>	-	2,77	2,37	2,57	0,28
<b>Índice de absorção 2/3 de água</b>	-	4,42	4,02	4,22	0,28
<b>Índice de absorção de água</b>	-	5,79	4,85	5,32	0,66
<b>Capilaridade 1/3 de água</b>	-	1,20	1,02	1,11	0,13
<b>Capilaridade 2/3 de água</b>	-	1,91	1,73	2,78	0,13

Fonte: Autor, 2021

**Gráfico 26.** Resposta do índice de absorção do concreto AG50

Fonte: Autor, 2021

#### Análise estatística Índice de Absorção

Para avaliação dos dados de índice de absorção, também foi utilizada a metodologia de análise de variância ANOVA. Foi utilizado um nível de significância de 5%, analisando as variáveis influentes no sistema. Para verificação desse modelo de análise, existem dois parâmetros para o diagnóstico dos dados: o p-valor e  $F_c$ . A hipótese nula que está sendo verificada é de que os valores são semelhantes e não há influência significativa entre as variáveis analisadas, podendo ser confirmada a hipótese quando p-valor exibe um valor maior que o nível de significância determinado. Ocorrendo o inverso, o p-valor inferior ao nível de significância, a hipótese nula não se confirma, indicando que a variável exibe influência significativa no sistema.

Então, foi avaliado o índice de absorção dos grupos contendo as devidas substituições, conforme demonstra Tabela 39. O mesmo foi dividido em 4 grupos devido as substituições com 2 amostragens de dados para cada agrupamento.

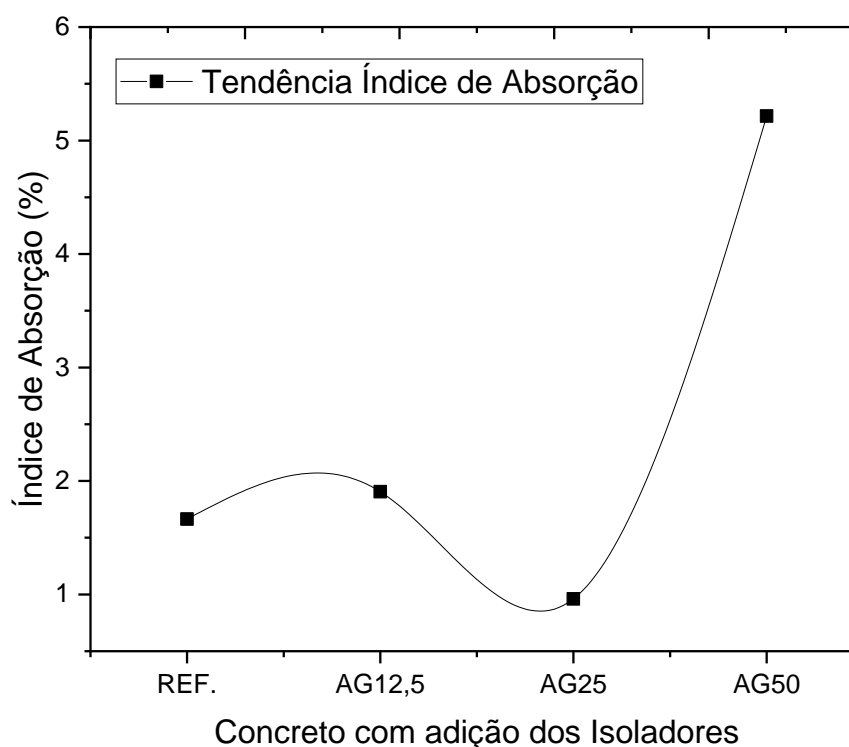
**Tabela 39.** Análise de variância ANOVA no índice de absorção

Fonte da variação	SQ	gl	valor-P	F crítico
Entre grupos AG	21,55755	3	0,00766	6,591382

Fonte: Autor, 2021

Observável pela Tabela 39, que o p-valor é inferior ao nível de significância determinado em 0,05. Sendo assim, os valores referentes a substituição dos agregados, exerce isoladamente influência na variável índice de absorção, conforme descreve Gráfico 27.

O gráfico 27, demonstra uma descontinuidade na curva de absorção de água na região da substituição em 25%, mas indicando um aumento na absorção de água, com o aumento da substituição dos agregados graúdos.

**Gráfico 27.** Tendência CP's índice de absorção

Fonte: Autor, 2021

A avaliação da resposta individual de cada substituição, em função da adição dos agregados, é primordial para verificação de evolução dos dados. Portanto a

Tabela 40 demonstra a avaliação do índice absorção de água em função da substituição.

**Tabela 40.** Avaliação do índice de absorção de água no concreto

		<b>REF.</b>	<b>AG12,5</b>	<b>AG25</b>	<b>AG50</b>
<b>28 Dias</b>	<b>REF.</b>	1,00%	14,51%	-42,29%	213,42%
	<b>AG12,5</b>	-12,67%	1,00%	-49,60%	173,71%
	<b>AG25</b>	73,27%	98,41%	1,00%	443,06%
	<b>AG50</b>	-68,09%	-63,46%	-81,59%	1,00%

Fonte: Autor, 2021

Foi observado que a maior evolução em função do concreto referência se apresenta na substituição em 50% dos agregados graúdos, representando uma taxa de 213,42%.

O concreto AG25 exibiu uma menor quantidade de água absorvida em relação ao concreto referência. Porém, pôde ser observado como Campos (2009), uma baixa quantidade de água absorvida na base dos corpos de prova, indicando uma elevada quantidade de porcelana, e pelo fato da porcelana exibir uma baixa capacidade de absorção, formou uma espécie de barreira para absorção de água nos CP's.

De fato, os resultados indicam uma piora no índice de absorção dos concretos com aumento da substituição dos agregados. O mesmo ocorreu com Campos (2009) e Vieira (2017) para o aumento da substituição dos agregados no concreto.

#### **Método de avaliação do concreto**

O método de avaliação dos concretos consiste em avaliar os mesmos de maneira generalizada. Com isso, foram fotografadas as características de ruptura e realizada uma análise de forma macrográfico dos concretos.

#### **Concreto Referência**

O concreto referência, foi tomado como base para pesquisa e verificação das características de inserção de agregados no concreto. Sendo assim, as análises de suas características se tornam primordiais para verificação da performance dos agregados.

No ensaio de resistência a compressão, o concreto referência apresentou uma média ao 28º dia de cura equivalente a 21,55 MPa, com uma característica contínua de aumento de resistência com a elevação dos dias de cura, indicando um aumento médio de 22,5% de elevação de resistência por dia de cura.

Nos concretos após a ruptura, foram avaliados e verificados uma boa homogeneidade da mistura e uma boa distribuição dos agregados graúdos no mesmo, conforme demonstra Figura 39 e demonstrado uma boa aderência da pasta junto com o agregado conforme verificado com MEV.

O índice de vazios e absorção no concreto referência, se aprestaram com média de 3,69% e 1,66% respectivamente; um valor abaixo em relação as demais substituições, e pode estar associado a boa distribuição dos agregados juntamente com a maior absorção de água pela brita em relação ao isolador de porcelana. O mesmo indicou uma boa trabalhabilidade com o abatimento dentro de 4,5 cm.

**Figura 39.** Concreto Referência



Fonte: Autor, 2021

O concreto referência com utilização do CP-B demonstrou uma boa performance em relação a dados verificados, indicando uma boa trabalhabilidade, uniformidade dos dados de resistência a compressão e baixo índice de absorção e vazio dos CP's.



### Concreto AG12,5

O concreto AG12,5 contou com a substituição de 12,5% dos agregados graúdos por isoladores elétricos de porcelana, para avaliação da performance dos mesmos.

No ensaio de resistência a compressão o concreto AG12,5 exibiu uma resistência a compressão média ao 28º dia de cura igual a 24,84 MPa, com uma característica não linear de aumento de resistência, de acordo com a elevação dos dias de cura, indicando um aumento médio de 42,4% de elevação de resistência por dia de cura.

O AG12,5 após a ruptura, foi avaliado e verificado uma boa homogeneidade da mistura e uma boa distribuição dos agregados graúdos naturais e artificiais no corpo de prova, conforme demonstra Figura 40. A aderência entre o isolador com a face porosa e a pasta, se apresentou satisfatório conforme demonstrado pelo MEV. Porém, avaliando as características de ruptura pode ser verificado, ainda que poucas, algumas lacunas em relação a parte esmaltada do isolador, indicando um ponto de fragilidade do material na qual a provável elevação dos valores do desvio padrão em relação ao concreto referência.

**Figura 40.** Concreto AG 12,5



O índice de vazios e absorção no concreto referência, se aprestaram com média de 4,23% e 1,91% respectivamente, valores superiores ao concreto referência. Provável crescente devido a inserção de isoladores elétricos de porcelana como agregado graúdo, que exibiu um menor índice de absorção de água em relação a brita natural.

O concreto AG12,5 demonstrou uma boa performance em geral, sendo superior em relação a resistência a compressão e inferior ao índice de absorção e vazios. No entanto, a mesma exibiu uma taxa de abatimento de 4,5 cm indicando uma boa trabalhabilidade do material.

#### Concreto AG25

O concreto AG 25, refere a substituição de 25% dos agregados graúdos por isoladores elétricos de porcelana, para avaliação da performance dos mesmos.

No ensaio de resistência a compressão o concreto AG25 demonstrou uma resistência a compressão média ao 28º dia de cura, igual a 25,33 MPa, com uma característica linear de aumento de resistência de acordo com a elevação dos dias de cura, indicando um aumento médio de 23,7% de elevação de resistência por dias de cura.

O AG25 após a ruptura foi avaliado e verificado uma maior concentração dos agregados graúdos na região inferior dos CP's. A região de transição do isolador com a pasta pode ser verificada com o MEV, indicando uma boa resistência. Porém, avaliando as características de ruptura pode ser verificado que as mesmas estão direcionadas a face esmaltada dos isoladores elétricos de porcelana, indicando o maior ponto de fragilidade do AG25 em relação a resistência a compressão, conforme demonstra Figura 41.

**Figura 41. Concreto AG25**

Fonte: Autor, 2021

O índice de vazios e absorção no concreto AG25, se exibiram com média de 2,13% e 0,96% respectivamente, valores inferiores ao concreto referência, provavelmente pela maior concentração de agregados na parte inferior dos CP's, induzindo assim, uma barreira para absorção de água devido à baixa capacidade de absorção de água dos isoladores.

O concreto AG25, se demonstrou com uma excelente performance em relação ao concreto referência, sendo em geral superior em relação a resistência a compressão e ao índice de absorção e vazios.

#### Concreto AG50

O concreto AG50 associa-se a substituição de 50% dos agregados graúdos por isoladores elétricos de porcelana, para avaliação da performance dos mesmos. A substituição em 50% é primordial, pois a mesma representa um ponto limiar para verificação de performance devido representar metade dos agregados graúdos.

No ensaio de resistência a compressão, o concreto AG50 exibiu uma resistência a compressão média ao 28º dia de cura, equivalente a 28,73 MPa, com uma característica contínua de aumento de resistência de acordo com a elevação dos dias de cura, indicando um aumento médio de 42,9% de elevação de resistência por dias de cura; indicando a maior resistência a compressão dos concretos e maior taxa de crescimento de resistência a compressão em função dos dias de cura.

Após a ruptura, foi avaliado o AG50 e verificado uma boa distribuição tanto dos agregados naturais, quanto dos artificiais dentro dos CP's. A região de transição do isolador com a pasta pode ser verificada com o MEV indicando uma aderência da pasta ao agregado. Porém, foi avaliado que com o aumento das substituições, as rupturas se apresentaram prioritariamente nas regiões da face esmaltada dos isoladores, demonstrando a fragilidade do isolador, indicando que provavelmente para as substituições de maior intensidade as respostas de resistência podem se apresentar inferiores devido a este fato, que pode ser representado pela Figura 42.

O índice de vazios e absorção no concreto AG50, se exibiram com média de 13,03% e 5,32% respectivamente, valores elevados, comparados ao concreto referência, provavelmente pela maior concentração de isoladores elétricos de porcelana no concreto, demonstrando de maneira bem distribuída, como pode se observar na absorção de água em áreas distintas do CP.

O concreto AG50 demonstrou uma boa performance em relação aos demais concretos em relação a resistência a compressão, indicando uma melhor resposta dos resultados. Em contrapartida, exibiram um elevado índice de vazios e absorção do concreto em relação ao concreto referência.

**Figura 42.** Concreto AG50



Fonte: Autor, 2021

## 5. CONCLUSÕES

- Conforme descreve objetivo da pesquisa, foi realizada uma análise dos agregados naturais e agregados artificiais oriundos de isoladores elétricos de porcelana, observando suas características físicas, químicas, e em geral, os resultados se apresentaram de maneira satisfatória devido a boa linearidade dos dados.
- Para os agregados, pode se observar uma ligeira descontinuidade na granulometria dos agregados artificiais devido à quebra manual, porém, em geral os mesmos se demonstraram com características lamelar, apresentando uma boa aderência no concreto. Os isoladores elétricos de porcelana, se exibiram com geometria média distinta do agregado natural devido a forma inicial do mesmo. As características físicas se distinguiram em função da absorção de água e massa específica dos mesmos, indicando que os isoladores dispõem de uma menor absorção de água e massa específica em relação a brita. Para as análises com o MEV, pôde se observar uma característica mais lamelar da brita, ao contrário do isolador, que exibe uma característica mais uniforme, principalmente na sua face esmaltada.
- Os concretos, exibiram dados significativos em todas as análises. Com isso, pode ser verificado um aumento da resistência a compressão do concreto AG50, onde houve a maior substituição de agregado graúdo. Em contrapartida, observou-se uma maior absorção de água do concreto e conseqüentemente um maior índice de vazios indicando uma piora na vida útil do concreto. Essas características foram observadas e de fato podem estar associadas a substituição do agregado, devido à baixa absorção de água dos mesmos. No entanto, pôde ser observado que os valores das demais substituições apresentaram-se linear em relação a resistência a compressão, e os dados de absorção de água e vazios exibiram uma descontinuidade em AG25, podendo ser justificada pelas características físicas dos CP's.
- Os valores de resistência a compressão, se demonstram dentro de uma média de 25,32 Mpa para o 28º dia de cura, com isso, caracteriza o mesmo para uma aplicação não estrutural deste concreto com aplicações em lajes, pisos, bloco dentre outros.

- No entanto, observou-se que o concreto AG50 exibiu um bom desempenho em relação aos demais concretos, indicando que a inserção de isoladores elétricos de porcelana no concreto, pode de fato melhorar suas características físicas, sendo uma alternativa para o cenário atual, onde a reciclagem é primordial.

## 6. TRABALHOS FUTUROS

- Devido a dinâmica dos valores de desvio padrão quando inserido os isoladores elétricos de porcelana, observou-se características de ruptura na face esmaltada, sendo assim a retirada da face esmaltada poderia representar de fato a contribuição dos isoladores no concreto.
- Os ensaios somente foram realizados para substituição de 50% dos agregados graúdos, porém é necessário verificar se ocorrerá uma saturação dos valores de resistência do concreto até uma substituição de 100% dos agregados graúdos.
- O ensaio de abrasão em concretos é primordial para verificação da vida útil do mesmo, e realizar uma comparação com índice de vazios dos mesmos.
- Observou-se na literatura, que em alguns casos, obteve-se uma piora no concreto com a inserção de isoladores elétricos de porcelana, sendo assim, a verificação da resistência com diferentes tipos de cimento é essencial para verificar se a perda de performance é associada ao traço ou ao cimento.
- Realizar ensaio de compressão diametral com o objetivo de verificação da resistência a tração dos corpos de prova.
- Efetuar substituição individual de agregados miúdos e conjugados com os agregados graúdos para análise de performance dos agregados no concreto.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

RIBEIRO, V. A. S. R.; PINTO, C. R.; BARBOSA, L. F.; OLIVEIRA F. A.; MENDONÇA, C. S. P. **PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO CONCRETO CONVENCIONAL COM ISOLADOR DE PORCELANA**, 2019 Revista Científica Universitas, Itajubá v.6, n.1, p.1-14 Maio 2019 ISSN Eletrônico: 2175-4020

VIEIRA, L. F. **ESTUDO DE VIABILIDADE DO RESÍDUO PROVINIENTE DAS PORCELANAS DE ISOLADORES PARA UTILIZAÇÃO EM CONCRETOS BOMBEÁVEIS ESTRUTURAIS**, 2017. Universidade Federal de Goiás. Dissertação.

A. M. DE ARGOLLO FERRÃO; M. A. CAMPOS; V. A. PAULON. **REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE ISOLADORES ELÉTRICOS DE PORCELANA COMO ADIÇÃO POZOLÂNICA EM ARGAMASAS**, 2016. Congresso brasileiro de cerâmicas.

BERALDO, A. L.; SHIROMA, L.; FERREIRA, G. C. S. **COMPÓSITO DE CIMENTO PORTLAND COM ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE ISOLADORES DE PORCELANA E DE PINUS**, 2016

LINO, F. J. **CERÂMICOS: MATERIAIS EM QUE VALE A PENA PENSAR**, 2006. Materiais Cerâmicos

BORBA, M. **COMPORTAMENTO MECANICO DE CERAMICAS UTILIZADAS NA CONFECÇÃO DE PROTESES PARCIAIS FIXAS**, 2010 Tese de Doutorado.

CHINELATTO, A. L.; DE SOUZA, D. P. F. **PORCELANAS ELÉTRICAS ALUMINOSAS: PARTE I – REVISÃO DA LITERATURA**, 2004. Cerâmica vol.50 no.313 São Paulo Jan./Mar. 2004

ZANOTTO, E. D.; JUNIOR, A. R. M. **PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MATERIAL CERÂMICO: UMA INTRODUÇÃO**, 1991. Cerâmica, 37 (247)



CAMPOS, M. A. **ESTUDO DO REAPROVEITAMENTO DE ISOLADORES ELÉTRICOS DE PORCELANA COMO AGRAGADOS EM ARGAMASSAS E CONCRETOS**, 2009. Dissertação de Mestrado UNICAMP

GUZZO, L. P. **QUARTZO**, 2008. Rochas e Minerais Industriais – CETEM/2008, 2ª Edição

LUZ, A. B.; CAMPOS A. R.; CARVALHO, E. A.; BERTOLINO, L. C.; SCORZELLI, R. B. **ARGILA – CAULIM**, 2008. Rochas e Minerais Industriais – CETEM/2008, 2ª Edição

LUZ, A. B.; COELHO, J. C. **FELDSPATO**, 2005. Rochas e Minerais Industriais – CETEM/2005

BRANCO, P. M. **MATERIAIS ARGILOSOS**, 2014.

CAVALCANTI, M. S. L. **DESENVOLVIMENTO DE MASSAS CERÂMICAS PARA GRÉS SANITÁRIOS UTILIZANDO RESÍDUO DE VIDRO PLANO COMO FUNDENTE EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL AO FELDSPATO**, 2010. Tese de Doutorado Universidade Federal de Campina Grande.

SOUZA, L.L. **APROVEITAMENTO DE RESÍDUO DE CAULIM EM CERÂMICA BRANCA**, 2007. Dissertação de Mestrado Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERAMICAS – ABCEREM**, 2019.

**SINDICATO DA INDÚSTRIA DE CERÂMICA VERMELHA DO ESTADO DA PARAÍBA – SINDICER**, 2019.

DEMAJOROVIC J. **DA POLÍTICA TRADICIONAL DE TRATAMENTO DO LIXO À POLÍTICA DE GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS AS NOVAS PRIORIDADES**, 1995. Revista de Administração de Empresas São Paulo, v. 35, n.3, p. 88-93 mai./jun.1995

LAVNITCKI, L.; BAUM, C. A.; BEEGATO, V. A. **POLÍTICA NACIONAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS: ABORDAGEM DA PROBLEMÁTICA NO BRASIL E A SITUAÇÃO NA REGIÃO SUL**, 2018. Ambiente & Educação ISSN- 1413-8638 E-ISSN - 2238-5533 v. 23, n. 3, p. 379-401, 2018

MATOS, J. P. C.; ALENCAR, T. C. S. B. D **GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E A APLICAÇÃO DA LOGÍSTICA REVERSA NO SEGMENTO DA CONSTRUÇÃO CIVIL**, 2019. Rev. Mult. Psic. V.13, N. 43, p. 784-807, 2019 - ISSN 1981-1179

PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; FRANCK, R.; DERKSEN R. **SECONDARY RECYCLING OF ELECTRICAL INSULATOR PORCELAIN WASTE IN PORTLAND CONCRETE STRUCTURES: DETERMINATION OF THE PERFORMANCE UNDER ACCELERATED AGING**, 2006. Cerâmica 52 (2006) 155-167

CAMPOS, M. C.; PAULON V. A. **UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS ALTERNATIVOS DE ISOLADORES ELÉTRICOS DE PORCELANA EM CONCRETOS**, 2015. CONCRETO Y CEMENTO. INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO, VOL 7 NÚM. 1, DE LA PÁG. 30 A LA 43, JULIO - DICIEMBRE DE 2015

DE ARGOLLO FERRÃO, A. M.; CAMPOS, M. A.; PAULON V. A. **REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE ISOLADORES ELÉTRICOS DE PORCELANA COMO ADIÇÃO POZOLÂNICA EM ARGAMASSAS**, 2016. 60º Congresso Brasileiro de Cerâmica 15 a 18 de maio de 2016, Águas de Lindóia, SP

SOUZA, F. J. P.; DAS NEVES. W. F.; ALARCON, O. E. **CERÂMICA 50** (2004) 217-224.

FERREIRA, L.; RIBAS, L.; DE SOUZA V. C.; BRAGANÇA S. R. **AVALIAÇÃO DA REUTILIZAÇÃO DE ISOLADORES ELÉTRICOS DE PORCELANA EM CERÂMICAS TRIAXIAIS**, 2018. 23º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais 04 a 08 de novembro de 2018, Foz do Iguaçu, PR, Brasil

BONETTI, A. N. **DESENVOLVIMENTO DE MASSAS CERÂMICAS PARA FABRICAÇÃO DE ISOLADORES ELÉTRICOS: PROPRIEDADES MECÂNICAS**, 2009. Dissertação de Mestrado Programa de pós-graduação em ciências e engenharia de materiais – Universidade Federal de Santa Catarina.

MILHOMEM, P. M.; DA SILVA, J. M.; COSTA, P. S. **AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO PRODUZIDO COM RESÍDUO DE ISOLADORES ELÉTRICOS DE PORCELANA**, 2018. REEC - Revista eletrônica de Engenharia Civil. Vol.14, nº, 238-247

DE ALMEIDA, L.C. **CONCRETO**, 2002. **NOTA DE AULA DA DISCIPLINA ESTRUTURAS IV- CONCRETO ARMADO. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS** – Departamento de estruturas, agosto 2002

COUTO, J. A. S.; CARMINATTI, R. L.; NUNES R. R. A.; MOURA, R. C. A. **O CONCRETO COM MATERIAL DE CONTRUÇÃO**, 2013 - Cadernos de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas | Sergipe | v. 1 | n.17 | p. 49-58 | out. 2013.

DE ARAÚJO, J. M. **O MÓDULO DE DEFORMAÇÃO LONGITUDINAL DO CONCRETO**, 2000 - Teoria e Prática na Engenharia Civil, No.1, p.9-16, nov., 2000.

LIBÂNIO, M. P.; CASSIANE, D. M.; SANDRO, P. S. **ESTRUTURAS DE CONCRETO – CAPÍTULO 2**, 2004 USP – EESC – Departamento de Engenharia de Estruturas Características do Concreto, 2004.

ANDOLFATO, R. P. **CONTROLE TECNOLÓGICO BÁSICO DO CONCRETO**, 2002- UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”, 2002.

COSTA, A.R.B; CABRAL, R.F. **DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPOSITO DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE RECICLADO CERAMICO DE OBRAS CIVIS**. 2016 – Dissertação de mestrado – UniFOA

CABRAL, A. E. B. . **MODELAGEM DE PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE DURABILIDADE DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADOS**

**RECICLADOS, CONSIDERANDO A VARIABILIDADE DA COMPOSIÇÃO DO RCD.**

Dissertação (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, 2007,208p.

**KIRCHHEIM, A. P. CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND BRANCO ESTRUTURAL: AVALIAÇÃO DA CARBONATAÇÃO E ABSORÇÃO CAPILAR.**

Dissertação (Mestrado acadêmico em Engenharia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003

**BASTOS, P. S. S. FUNDAMENTOS DO CONCRETO ARMADO.** Nota de aula da disciplina Estruturas de concreto I– Concreto armado. Universidade Estadual Paulista. Abril, 2019

**BRASIL, M. D. ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO CIMENTO PORTLAND COM A INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DE ARGILAS BENTONITAS.** Trabalho de Graduação. Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia. Fevereiro de 2019

**TAGLIAFERRO, E. R.; JUNIOR, E. A. JUNIOR GERENCIAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES EM SUZANO-SP – Brazilian journal of Development** Fevereiro de 2022. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv8n2-033>

**PAESE, C.; CATEN, C. T.; RIBEIRO, J. L. D. APLICAÇÃO DA ANÁLISE DE VARIANCA NA IMPLANTAÇÃO DO CEP.** – Revista produção v.11 n. 1 Novembro de 2001

**ROCHA, K. R; JUNIOR, A, J. B. ANOVA MEDIDAS REPETIDAS E SEUS PRESSUPOSTOS: ANÁLISE PASSO A PASSO DE UM EXPERIMENTO. -** Perspectiva da ciência e tecnologia v.10, 2018