

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS  
*CAMPUS* POÇOS DE CALDAS  
INSTITUTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

**EDUARDO MELO DE ANDRADE SILVA**

**ECONOMIA CIRCULAR NA ENGENHARIA CIVIL: A INFLUÊNCIA  
DE REJEITOS DE LOUÇA SANITÁRIA NA FABRICAÇÃO DE  
CONCRETOS**

Poços de Caldas  
2021

**EDUARDO MELO DE ANDRADE SILVA**

**ECONOMIA CIRCULAR NA ENGENHARIA CIVIL: A INFLUÊNCIA DE  
REJEITOS DE LOUÇA SANITÁRIA NA FABRICAÇÃO DE CONCRETOS**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Ciência e Engenharia de Materiais, pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Alfenas.

Área de concentração: Materiais e Compósitos Cerâmicos.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Carolina Del Roveri

Poços de Caldas  
2021

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas  
Biblioteca campus Poços de Caldas

Silva, Eduardo Melo de Andrade.  
S586e Economia circular na engenharia civil: a influência de rejeitos de louça sanitária na fabricação de concretos / Eduardo Melo de Andrade Silva. -- Poços de Caldas/MG, 2021.  
129 f. –

Orientador(a): Carolina Del Roveri.  
Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) –  
Universidade Federal de Alfenas, campus Poços de Caldas, 2021.  
Bibliografia.

1. Concreto. 2. Agregados (Materiais de construção). 3.  
Economia Circular. 4. Louça Sanitária. 5. Resíduos sólidos. I. Del  
Roveri, Carolina. II. Título.

CDD – 620.11

EDUARDO MELO DE ANDRADE SILVA

**ECONOMIA CIRCULAR NA ENGENHARIA CIVIL: A INFLUÊNCIA DE REJEITOS DE LOUÇA  
SANITÁRIA NA FABRICAÇÃO DE CONCRETOS**

A Banca examinadora abaixo-assinada aprova a  
Dissertação apresentada como parte dos requisitos  
para a obtenção do título de Mestre em Ciência e  
Engenharia de Materiais pela Universidade Federal  
de Alfenas. Área de concentração: Desenvolvimento,  
caracterização e aplicação de materiais.

Aprovada em: 05 de março de 2021.

Profa. Dra. Carolina Del Roveri  
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Prof. Dr. João Vicente Zampieron  
Instituição: Universidade do Estado de Minas Gerais

Profa. Dra. Sylma Carvalho Maestrelli  
Instituição: Universidade Federal de Alfenas



Documento assinado eletronicamente por **Sylma Carvalho Maestrelli, Professor do Magistério Superior**, em 05/03/2021, às 16:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carolina Del Roveri, Professor do Magistério Superior**, em 05/03/2021, às 16:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **João Vicente Zampieron, Usuário Externo**, em 10/03/2021, às 18:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0475549** e o código CRC **EE1121D6**.

*Dedico essa dissertação a Deus, aos meus pais Marisa e Nourival, a meu irmão Daniel, aos meus avós que hoje moram no céu, a minha amada família e aos meus verdadeiros amigos.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que me deu toda clareza, sabedoria e perseverança para concluir esse trabalho.

Ao meu núcleo familiar: minha mãe Marisa, meu pai Nourival, meu irmão Daniel. Também, aproveito a oportunidade, para agradecer toda minha família estendida e meus verdadeiros amigos.

À Profa. Dra. Carolina Del Roveri por ser essa ótima orientadora, que me deu direcionamento certo, apoio, auxílio, me ensinou por suas experiências e principalmente, me proporcionou autonomia para o desenvolvimento desse projeto.

À Profa. Dra. Sylma Carvalho Maestrelli e ao Prof. Dr. João Vicente Zampieron, que me deram ainda mais respaldo técnico para engrandecer esse trabalho.

À Universidade Federal de Alfenas, *campus* Poços de Caldas, por, além de ser uma segunda casa para mim, me abriu as portas dos laboratórios, equipamentos, materiais e em todos os aspectos, em geral.

Ao corpo docente, funcionários e aos discentes do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – PPGCEM da UNIFAL, em especial Eduardo Alves, Igor, Grazi e Valentina.

Nominalmente, gostaria de agradecer ao Sc. Me. Lucas Moreira Ferreira, que me ajudou de forma direta e com um sorriso no rosto a cada ensaio que deveria ser feito nas dependências do Departamento de Materiais da Universidade de São Paulo, *campus* Lorena, ao qual também sou muito grato. Sem dúvida mais que uma prova de amizade.

À Universidade do Estado de Minas Gerais, *campus* Passos e à Pontifícia Universidade Católica de Poços de Caldas, por me ceder à oportunidade de desenvolver parte do trabalho em seus laboratórios próprios e a Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP, pelo apoio financeiro no que tange toda a construção dessa dissertação.

A todos que de uma maneira, direta ou indiretamente, confiaram no meu trabalho e me auxiliaram nessa caminhada tão importante da minha vida.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## RESUMO

O setor da construção civil é uma das áreas mais relevantes no âmbito econômico para o Brasil, pois essa área tem a capacidade de elevar a taxa de empregados e com isso, melhorar a renda da população e a circulação da moeda como um todo no país. O concreto é o produto mais relevante nesse setor, pelo fato do mesmo poder ser empregado tanto para fins estruturais quanto para fins não-estruturais e ser – com exceção da água – o produto mais utilizado no mundo. Sua fabricação é consideravelmente simples em comparação a outros materiais, e sendo obtido pela mistura de somente quatro elementos: cimento, agregado miúdo, agregado graúdo (normalmente empregado areia e brita, respectivamente) e água. Já em relação aos resíduos sólidos, estes estão presentes em absolutamente todos os setores e, por este motivo, é de interesse o desenvolvimento de um estudo que possa abranger a substituição de constituintes básicos na estrutura do concreto por algum insumo que seria descartado na natureza. De acordo com o exposto, o objetivo desse trabalho foi estudar o impacto da substituição da brita 0 de concretos comuns por rejeito de louça sanitária (como agregado graúdo), entendendo os efeitos dessa matéria-prima substituinte. Foram produzidos corpos de prova em várias formulações e de vários períodos pré-definidos (3, 7 e 28 dias desde sua confecção), seguindo-se as normas técnicas vigentes. Iniciou-se pelo concreto de referência (CR), com 100% de brita 0 em sua composição e substituindo, a cada nova formulação, 25% da brita pelo rejeito de louça sanitária (C25, C50, C75 e C100), resultando então num total de 90 exemplares. Na análise do concreto em seu estado fresco, todas as formulações se apresentaram trabalháveis e sem segregação aparente entre os constituintes, algo imprescindível para sua utilização na prática. O estudo do concreto no estado endurecido, mais especificamente sua resistência à compressão demonstrou que todos os traços podem ser utilizados em aplicações estruturais. O melhor resultado do ensaio de compressão após 28 dias, dentre todos, foi o com substituição total da brita por louça sanitária (atingindo uma resistência característica de aproximadamente 36MPa), seguindo da composição C75 (35MPa) e superando o desempenho do concreto de referência (34MPa). A porosidade, de acordo com os ensaios, diminuiu à medida em que a brita 0 foi substituída pelo rejeito de louça sanitária, com exceção da composição C25 que se mostrou mais absorvivo à água e isso pode ter ocasionado em piores resistências mecânicas (28MPa). Com as análises de microscopia, tanto óptica quanto eletrônica de varredura, pôde-se detectar características mais específicas em relação à disposição dos compostos da estrutura e ancoragem dos agregados graúdos na matriz cimentícia (interface pasta de cimento – agregado). No que diz respeito a ancoragem dos agregados graúdos na matriz cimentícia, foi notório a maior fixação do agregado natural (brita 0) em comparação ao agregado reciclado (rejeito de louça sanitária). A primeira se mostrou mais envolta/encaixada na pasta de cimento como um todo e, a segunda somente como uma vizinhança – sem uma relação forte nessa interface de elementos constituintes do concreto.

**Palavras chave:** Concreto. Economia Circular. Rejeito de Louça Sanitária. Resistência Mecânica. Interface e Ancoragem.

## ABSTRACT

The civil construction sector is one of the most relevant areas in the economic scope for Brazil because this area has the capacity to raise the rate of employees and thereby improve the population's income and the circulation of the currency in the country. Concrete is the most relevant product in this sector, as it can be used for both structural and non-structural purposes and is - with the exception of water - the most used product in the world. Its manufacture is considerably simple compared to other materials, and it is made by mixing only four elements: cement, fine aggregate, coarse aggregate (normally used sand and gravel, respectively) and water. Regarding solid waste, these are present in absolutely all sectors and, for this reason, the interest to develop a study that can cover the replacement of basic constituents in concrete structure with some input that would be discarded in nature. The aim of this work was to study the impact of replacing gravel from common concretes with sanitary wastes (as coarse aggregate), understanding the nuances of this substitute raw material. Specimens were produced in various formulations and from several predefined periods (3, 7 and 28 days), following the current technical standards. It started with the reference concrete (CR), with 100% of gravel in its composition and replacing, with each new formulation, 25% of the gravel with sanitary wastes (C25, C50, C75 and C100), resulting in a total of 90 samples. Analyzing concrete in its fresh state, all the formulations proved to be workable and with no apparent segregation between the constituents, something essential for its use. The study of concrete in the hardened state, more specifically its resistance to compression, demonstrated that all traces can be used in structural applications. The best result of the compression test after 28 days was the total replacement of the gravel by sanitary ware (reaching a characteristic resistance of approximately 36MPa), followed by the C75 (35MPa) and surpassing the performance of the concrete reference (34MPa). The porosity, according to the tests, decreased as the gravel was replaced by the waste of sanitary ware, with the exception of C25, which was more absorbent to water and this may have resulted in worse mechanical resistance (28MPa). With microscopy analyzes, both optical and scanning electronics were possible to detect more specific characteristics in relation to the arrangement of the structure compounds and anchoring of coarse aggregates in the cementitious matrix (cement paste - aggregate interface). Regarding the anchoring of coarse aggregates in the cementitious matrix, the greater fixation of the natural aggregate (gravel 0) in comparison with the recycled aggregate (sanitary wastes) was notorious. The first proved to be more wrapped in the cement paste as a whole and, the second only as a neighborhood - without a strong relationship in this interface of concrete constituent elements.

Keywords: Concrete. Circular Economy. Waste from Sanitary Ware. Mechanical resistance. Interface and Anchorage.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Seção polida de uma amostra de concreto.....	18
Figura 2 - Reação de Hidratação dos Silicatos no Cimento .....	20
Figura 3 - Estágios de Hidratação do Cimento, com Destaque para Formação de Fases .....	26
Figura 4 - Desenho esquemático da zona de transição agregado – pasta de cimento .....	27
Figura 5 - Gráfico Tensão x Deformação – agregado, pasta de cimento e concreto	29
Figura 6 - Procedimento do <i>Slump Test</i> .....	38
Figura 7 - Distribuição da Resistência à Compressão no Concreto .....	41
Figura 8 - Tipos de Ruptura de Corpos-de-prova.....	43
Figura 9 - Fluxograma dos Métodos de Análise Utilizados .....	46
Figura 10 - Recebimento do rejeito de louça sanitária .....	47
Figura 11 - Britagem do rejeito de louça sanitária .....	48
Figura 12 - Metalização da Superfície do Vidrado de Rejeito.....	49
Figura 13 - Ensaio de MEV e EDS .....	50
Figura 14 - Confeção do concreto em betoneira .....	53
Figura 15 - Corpos-de-prova (a) moldados e identificados; (b) exemplar finalizado;(c) imersos em água.....	54
Figura 16 - Slump Test realizado (a) no concreto C50; (b) no concreto C100 .....	55
Figura 17 - Corpo-de-prova sendo retificado.....	56
Figura 18 - Seções transversais das formulações de concreto .....	57
Figura 19 - Rompimento de corpo-de-prova por .....	58
Figura 20 - Rompimento dos Corpos-de-prova .....	59
Figura 21 - Corpos-de-prova Rompidos Posicionados no Interior da Estufa.....	60
Figura 22 - Ensaio de Porosidade Aparente .....	61
Figura 23 - Amostra de Concreto Posicionado.....	62
Figura 24 - Metalização das Amostras de Concreto.....	63
Figura 25 - Amostra de Concreto Posicionada para Análise no .....	64
Figura 26 - Gráfico Comparativo de Barras da Análise Granulométrica Quantitativa da Brita 0 e do Rejeito de Louça Sanitária .....	66
Figura 27- Curva de Distribuição Granulométrica Comparativa da Brita 0 e do Rejeito de Louça Sanitária .....	67
Figura 28 - Curva de Distribuição Granulométrica Normalizada da Brita 0 e do Rejeito de Louça Sanitária .....	68
Figura 29 - Micrografias obtidas por MEV do Vidrado. Imagens Obtidas por Elétrons Retroespalhados.	69
Figura 30 - EDS Vidrado (fundo Escuro), mostrando os picos principais relativos aos elementos encontrados e a região onde a análise foi obtida. ....	70
Figura 31 - EDS do vidrado (fragmentos cinza) mostrando os picos principais relativos aos elementos encontrados e a região onde a análise foi obtida. ....	72
Figura 32 - Fotomicrografias ao MEV da região interna. Imagens obtidas por elétrons secundários.....	74

Figura 33 - EDS Interior (Área Total) mostrando os picos principais relativos aos elementos encontrados e a região onde a análise foi obtida. ....	75
Figura 34 - Fotomicrografia obtidas por MEV da interface vidro – parte interna do rejeito de louça sanitária. Imagem obtida por elétrons retroespalhados. ....	77
Figura 35 - Gráfico de Barras de Resistência à Compressão em 3, 7 e 28 dias .....	82
Figura 36 - Gráfico de Linhas de Resistência à Compressão em 3, 7 e 28 dias .....	83
Figura 37 - Resistência Mecânica por Formulações .....	85
Figura 38 - Tipos de Ruptura no Ensaio de Compressão .....	87
Figura 39 - Interior dos Corpos-de-prova CR, Após Rompimento em Máquina de Ensaio. ....	88
Figura 40 - Interior dos Corpos-de-prova C25, Após Rompimento em Máquina de Ensaio .....	89
Figura 41 - Interior dos Corpos-de-prova C50, Após Rompimento em Máquina de Ensaio .....	90
Figura 42 -Interior dos Corpos-de-prova C75, Após Rompimento em Máquina de Ensaio .....	91
Figura 43 - Interior dos Corpos-de-prova C100, Após Rompimento em Máquina de Ensaio .....	92
Figura 44 - Imagem de Microscopia Óptica - CR .....	95
Figura 45 - Fotomicrografias ao MEV do Concreto Referência. Imagens Obtidas por Elétrons Secundários. ....	96
Figura 46 - EDS Concreto Referência – Região Direita, Mostrando os Picos Principais Relativos aos Elementos Encontrados e a Região onde a Análise foi Obtida.....	97
Figura 47 - EDS Concreto Referência – Região Esquerda, Mostrando os Picos Principais Relativos aos Elementos Encontrados e a Região onde a Análise foi Obtida.....	98
Figura 48 - Imagem de Microscopia Óptica - C25 .....	100
Figura 49 - Fotomicrografias ao MEV do C25. Imagens Obtidas por Elétrons Secundários. ....	101
Figura 50 - EDS C25 – Região Direita, Mostrando os Picos Principais Relativos aos Elementos Encontrados e a Região onde a Análise foi Obtida. ....	102
Figura 51 - EDS C25 – Região Esquerda, Mostrando os Picos Principais Relativos aos Elementos Encontrados e a Região onde a Análise foi Obtida. ....	103
Figura 52 - Imagem de Microscopia Óptica – C50 .....	105
Figura 53 - Fotomicrografias ao MEV do C50. Imagens Obtidas por Elétrons Secundários .....	106
Figura 54 - EDS C50 – Região Direita, Mostrando os Picos Principais Relativos aos Elementos Encontrados e a Região onde a Análise foi Obtida. ....	107
Figura 55 - EDS C50 – Região Esquerda, Mostrando os Picos Principais Relativos aos Elementos Encontrados e a Região onde a Análise foi Obtida. ....	109
Figura 56 - Imagem de Microscopia Óptica - C75 .....	110
Figura 57 - Fotomicrografias ao MEV do C75. Imagens Obtidas por Elétrons Secundários .....	111

Figura 58 - EDS C75 – Região Abaixo, Mostrando os Picos Principais Relativos aos Elementos Encontrados e a Região onde a Análise foi Obtida. ....	113
Figura 59 - EDS C75 – Região Acima, Mostrando os Picos Principais Relativos aos Elementos Encontrados e a Região onde a Análise foi Obtida. ....	114
Figura 60 - Imagem de Microscopia Óptica - C100 .....	115
Figura 61 - Fotomicrografias ao MEV do C100. Imagens Obtidas por Elétrons Secundários .....	116
Figura 62 - EDS C100 – Região Abaixo e a Esquerda, Mostrando os Picos Principais Relativos aos Elementos Encontrados e a Região onde a Análise foi Obtida.....	117
Figura 63 - EDS C100 – Região Acima e a Direita, Mostrando os Picos Principais Relativos aos Elementos Encontrados e a Região onde a Análise foi Obtida.....	118

## LISTA DE TABELA

Tabela 1– Principais componentes do cimento .....	19
Tabela 2 – Composição dos principais tipos de cimentos utilizados no Brasil .....	21
Tabela 3– Classificação dos Agregados Graúdos por Dimensão .....	23
Tabela 4 – Limites de distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	35
Tabela 5 – Limites de distribuição granulométrica do agregado graúdo .....	36
Tabela 6 – Classe de consistência do concreto .....	39
Tabela 7– Valores de $f_{ck}$ de acordo com a Condição de Produção do Concreto.....	42
Tabela 8 – Identificação das Formulações de Concreto .....	51
Tabela 9– Quantidade, em massa, dos componentes do concreto.....	52
Tabela 10 – Análise Quantitativa EDS Vidrado (Fundo Escuro) .....	71
Tabela 11 - Análise Quantitativa EDS Vidrado (Partículas Cinza) .....	72
Tabela 12 - Análise Quantitativa EDS Interior .....	75
Tabela 13 – Valores do Slump Test dos Concretos nas Várias Formulações.....	78
Tabela 14 - Resistência à Compressão dos concretos com 3 dias de cura .....	80
Tabela 15 - Resistência à Compressão dos concretos com 7 dias de cura .....	81
Tabela 16 - Resistência à Compressão dos concretos com 28 dias de cura .....	81
Tabela 17 - Absorção de Água dos CPs .....	93
Tabela 18 - Porosidade dos CPs.....	93
Tabela 19 - Análise Quantitativa EDS Concreto Referência – Região Direita.....	98
Tabela 20 - Análise Quantitativa EDS Concreto Referência – Região Esquerda.....	99
Tabela 21 - Análise Quantitativa EDS C25 – Região Direita.....	102
Tabela 22 - Análise Quantitativa EDS C25 – Região Esquerda.....	103
Tabela 23- Análise Quantitativa EDS C50 – Região Direita.....	108
Tabela 24 - Análise Quantitativa EDS C50 – Região Esquerda.....	109
Tabela 25 - Análise Quantitativa EDS C75 – Região Abaixo .....	113
Tabela 26 - Análise Quantitativa EDS C75 – Região Acima .....	114
Tabela 27 - Análise Quantitativa EDS C100 – Região Abaixo e a Esquerda .....	117
Tabela 28 - Análise Quantitativa EDS C100 – Região Acima e a Direita .....	118
Tabela 29 – Resultados da Análise Granulométrica da Amostra 1 de Brita 0 .....	127
Tabela 30 – Resultados da Análise Granulométrica da Amostra 2 de Brita 0 .....	127
Tabela 31 – Resultados da Análise Granulométrica da Amostra 3 de Brita 0 .....	128
Tabela 32 - Resultados da Análise Granulométrica da Amostra 1 de Louça Sanitária .....	128
Tabela 33 – Resultados da Análise Granulométrica da Amostra 2 de Louça Sanitária .....	129
Tabela 34 – Resultados da Análise Granulométrica da Amostra 3 de Louça Sanitária .....	129

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	13
<b>2 OBJETIVOS</b>	14
2.1 OBJETIVO GERAL	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
<b>3 JUSTIFICATIVAS</b>	15
<b>4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	16
4.1 COMPÓSITOS	16
4.2 CONCRETO	17
<b>4.2.1 Cimento</b>	19
<b>4.2.2 Agregados</b>	22
<b>4.2.3 Água</b>	23
<b>4.2.4 Reações de Hidratação do Cimento</b>	24
<b>4.2.5 Concreto Hidratado e Zona de Transição Agregado – Pasta de Cimento</b>	26
4.3. ECONOMIA CIRCULAR	29
<b>4.3.1 Resíduos Sólidos</b>	30
<b>4.3.1.1 Resíduos Sólidos na Formulação de Concretos</b>	31
<b>4.3.1.2 Rejeito de Louça Sanitária na Formulação de Concretos</b>	32
4.4 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS	34
<b>4.4.1 Composição Granulométrica</b>	34
<b>4.4.2 Ensaios no Concreto no Estado Fresco</b>	36
4.4.2.1 Teste de Abatimento de Tronco de Cone – Slump Test	37
4.4.2.2 Segregação e Exsudação	39
<b>4.4.3 Ensaios no Concreto no Estado Endurecido</b>	40
4.4.3.1 Ensaios Mecânico de Compressão	40
4.4.4 Porosidade Aparente e Absorção de Água	43
<b>5 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	45
5.1 MATERIAIS	45
5.2 MÉTODOS	46
<b>5.2.1 Caracterização das Matérias-Primas</b>	47
5.2.1.1 Recebimento e Britagem	47
5.2.1.2 Análise Granulométrica	48
5.2.1.3 Microscopia Eletrônica de Varredura e Análise de EDS	49
<b>5.2.2 Caracterização dos Concretos</b>	50

5.2.2.1	Formulação dos Concretos Produzidos	50
5.2.2.2	Confeção dos Corpos-de-prova em Laboratório	51
5.2.2.3	Slump Test	54
5.2.2.4	Retífica e Ensaio de Resistência à Compressão	55
5.2.2.5	Análise do Caminho Crítico de Ruptura	58
5.2.2.6	Porosidade Aparente dos Corpos de Prova	59
<b>5.2.2.</b>	<b>Microscopia nos Corpos de Prova</b>	<b>61</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>65</b>
6.1	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DAS MATÉRIAS-PRIMAS	65
6.2	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA E ESPECTROSCOPIA DE RAIOS-X POR DISPERSÃO EM ENERGIA DO REJEITO DE LOUÇA SANITÁRIA	68
<b>6.2.1</b>	<b>Região do Esmalte (Vidrado)</b>	<b>68</b>
<b>6.2.2</b>	<b>Região Interna</b>	<b>73</b>
<b>6.2.3</b>	<b>Interface Vidrado – Parte Interna da Louça Sanitária</b>	<b>76</b>
6.5	ANÁLISES DO CONCRETO EM SEU ESTADO FRESCO	78
6.6	ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO	80
6.7	MODOS DE RUPTURA E ANÁLISE DO CAMINHO CRÍTICO	86
6.8	POROSIDADE MÉDIA DOS CONCRETOS	93
6.9	MICROSCOPIAS E ESPECTROSCOPIAS DOS CORPOS DE PROVA	94
<b>6.9.1</b>	<b>Concreto Referência (CR)</b>	<b>94</b>
<b>6.9.2</b>	<b>Concreto com 25% de Rejeito e 75% de Brita 0 (C25)</b>	<b>99</b>
<b>6.9.3</b>	<b>Concreto com 50% de Rejeito e 50% de Brita 0 (C50)</b>	<b>104</b>
<b>6.9.4</b>	<b>Concreto com 75% de Rejeito e 25% de Brita 0 (C75)</b>	<b>110</b>
<b>6.9.5</b>	<b>Concreto com 100% de Substituição – 100% de Rejeito (C100)</b>	<b>115</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>120</b>
<b>8</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>121</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>123</b>
	<b>APÊNDICES</b>	<b>127</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material de construção mais utilizado no mundo e isso pode ser explicado por sua habilidade de resistir à deterioração causada pela água, diferentemente do aço e das madeiras sem nenhum tipo de tratamento, que são outros materiais altamente difundidos nesse setor. Este material é confeccionado pela mistura de quatro elementos facilmente encontrados no mercado, sendo estes: o cimento (comumente usado o Cimento *Portland*), a brita (agregado graúdo), a areia (agregado miúdo) e, a água (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

É um problema crescente na sociedade o excesso de resíduos provenientes de diversas áreas que estão interligadas economicamente. Os resíduos sólidos, principalmente provenientes dos setores automobilísticos, cerâmicos e de construção, por seu volume tomado no espaço, são uma preocupação diretamente ligada a novas políticas de encorajamento do reuso dos mesmos (MEDINA; FRÍA; ROJAS, 2014)

Os resíduos cerâmicos são materiais não biodegradáveis, que podem ser advindos diretamente da indústria, como é o caso das louças sanitárias, ou da construção civil, as chamadas cerâmicas vermelhas, como os tijolos, blocos e telhas. Pelo fato desse tipo de material ser de difícil reciclagem, é cada vez mais pesquisada a adição ou substituição total ou parcial das mesmas em concreto, uma vez que este tem um enorme potencial de incorporação de diferentes agregados em sua composição final (HALICKA; OGRODNIK; ZEGARDLO, 2013; MEDINA *et al.*, 2014).

O uso da louça sanitária como agregado graúdo na formulação do concreto pode ser uma solução viável para além do reuso deste resíduo, contribuir para a menor exploração de minerais que seriam utilizados como componentes do concreto, que seriam retirados do meio ambiente por meio de desmonte de rochas e liberação de dióxido de carbono na atmosfera (LUCAS *et al.*, 2016).

Desta forma, o presente investigou a inserção de resíduos oriundos da fabricação de louça sanitária no concreto com o objetivo de reduzir o impacto ao meio ambiente proveniente do descarte incorreto desses resíduos sólidos.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho teve como objetivo geral a investigação da substituição de brita 0 por rejeito de louça sanitária na fabricação de concretos e o impacto desses agregados graúdos na sua ancoragem na matriz cimentícia.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Analisar o processo de moagem para obtenção da louça em condições de adição ao concreto;
- b) Caracterizar a louça sanitária por meio da técnica física de separação por distribuição granulométrica;
- c) Caracterizar a morfologia do rejeito de louça sanitária por meio de microscopia eletrônica e espectroscopia por dispersão de energia;
- d) Estudar a formulação de traço teórico para confecção dos corpos de prova de referência (com utilização da brita em sua formulação) e com a substituição pelo rejeito de louça sanitária, confeccionar dos corpos de prova de referência e com as formulações pré-definidas de substituinte;
- e) Realizar ensaios mecânicos de compressão nos mesmos após diferentes dias desde a confecção destes para determinação da resistência à compressão;
- f) Determinar porosidade aparente dos corpos-de-prova de concreto em todas suas formulações;
- g) Avaliar a ancoragem do agregado graúdo substituinte (rejeito de louça sanitária) na interface da fase agregado/argamassa;
- h) Verificar a integração do rejeito de louça sanitária em composições do concreto;
- i) Comparar com a literatura e avaliação dos resultados obtidos.



### 3 JUSTIFICATIVAS

A problemática atual relacionado aos resíduos sólidos se dá pelo fato dos mesmos tomarem um volume considerável no ambiente. Por esse motivo, eles trazem um empecilho no desenvolvimento sustentável no setor da produção das cerâmicas, já que, demandam criterioso estudo para sua reciclagem e reuso em processos produtivos.

O rejeito da louça sanitária foi o resíduo sólido utilizado como substituinte à brita no concreto e este estudo busca analisar as camadas internas e do esmalte, bem como a interface entre ambas para se ter uma avaliação mais criteriosa quanto à morfologia desse material. Não é grande a coletânea de estudos específicos com temática focada na morfologia do rejeito da louça sanitária.

A construção civil é uma área em que se utiliza de uma grande gama de recursos naturais e em grandes proporções. Essa utilização em quantidades significativas de recursos não renováveis causa um desequilíbrio natural das fontes de matéria-prima e, por esse motivo, vários estudos relacionados à substituição dos constituintes básicos do concreto por resíduos, rejeitos e materiais menos agressivos ao meio ambiente estão sendo desenvolvidos.

A análise do modo de ancoragem do rejeito de louça sanitária na matriz cimentícia – levando-se em consideração a região de vidro dela – é um ponto crítico de importância, uma vez que, tal região por ser impermeável e lisa pode interferir na boa adesão entre esses componentes do concreto.

Pensando-se ainda no viés social e ambiental, o trabalho trouxe uma contribuição nos tópicos relacionados ao reaproveitamento de resíduos sólidos na construção civil, apresentando resultados de melhores propriedades mecânicas no que diz respeito ao concreto produzido e atingindo os critérios de segurança regidos em normas.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 COMPÓSITOS

Os compósitos, que são a combinação entre dois ou mais materiais fundamentais (cerâmica, metal e polímero), distinguíveis entre si e com pelo menos uma propriedade superior à de seus constituintes isoladamente, podem ser de origem natural ou serem manufaturados.

Os compósitos são úteis em diversos setores da indústria e da sociedade e sua produção vem crescendo muito nas últimas décadas. Essa classe de materiais pode ser separada em duas categorias: compósitos reforçados com fibra e compósitos reforçados com partículas (SHACKELFORD, 2008).

Os compósitos reforçados com fibra, em termos tecnológicos, são os mais importantes e, em termos gerais, são constituídos de uma matriz com as fibras dispostas em seu interior. As propriedades desses materiais não são somente dependentes das fibras, mas também do grau como uma carga aplicada é transmitida das próprias fibras para a matriz e da qualidade da interface matriz-reforço (CALLISTER JR; RETHWISH, 2012).

De acordo com os autores acima, a matriz nos compósitos reforçados com fibras tem função de ligação entre as fibras e de proteção contra danos superficiais, advindos de abrasão mecânica ou ataques químicos. Além disso, a matriz mantém uma distância tal que as fibras não se sobrepõem e isso funciona como uma barreira de propagação de trincas. Já as fibras, que possuem um pequeno diâmetro e é muito mais resistente mecanicamente que o material volumétrico, podem ser utilizadas para causar uma redução proposital do volume de um material.

Os compósitos com partículas, também conhecidos como compósitos agregados, não podem ser tratados ao nível atômico pela dimensão considerável do reforço. A fase particulada é, geralmente, mais dura e rígida que a matriz e essa característica é importante pelo fato de que a matriz transfere parte da tensão para os agregados e estes suportam parte da carga solicitada. Um exemplo clássico desse tipo de compósito é o concreto, em que as fases matriz e reforço são materiais cerâmicos (CALLISTER JR; RETHWISH, 2012).

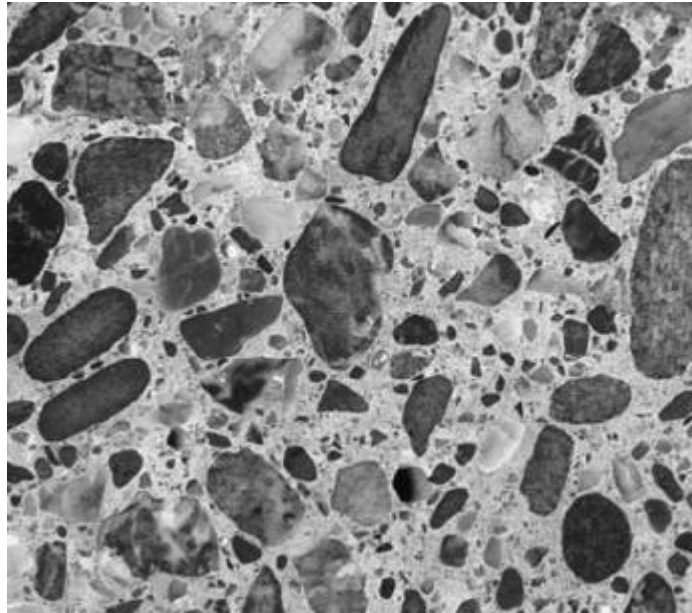
## 4.2 CONCRETO

Em se tratando da classe de materiais, o concreto é considerado um compósito que consiste essencialmente numa ligação média com partículas ou fragmentos de agregados inseridos em sua matriz. Sua composição básica é formada por um aglomerante (o cimento), com um ou mais materiais (agregado graúdo e miúdo) e água e, em casos com especiais propriedades, aditivos de várias naturezas também são inseridos na formulação. Tal composição torna esse material poroso, com uma estrutura heterogênea e extremamente complexa (NEVILLE, 1997).

Quando os constituintes são misturados, essa massa formada deve possuir propriedades de plasticidade que favoreçam o manuseio e o assentamento do concreto e, posteriormente, adquira coesão e resistência mecânica. Essas características são encontradas nesse material, em específico, pelas reações que ocorrem entre o aglomerante e a água, chamada de reação de hidratação (FRAZÃO, 2002).

Do ponto de vista macro estrutural, como é demonstrada na Figura 1, a composição do concreto pode ser dividida em duas fases bem definidas, sendo a primeira a das partículas dos agregados graúdos, que possuem formas, tamanhos e disposição variada (as partículas mais destacadas, em sua maioria, mais escuras) e uma massa de cimento hidratado denominado pasta de cimento (toda região mais clara e no fundo da imagem) (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Figura 1 - Seção polida de uma amostra de concreto



Fonte: MEHTA, MONTEIRO (2006, p. 22)

É estimado que o consumo de concreto em todo mundo seja em torno de onze bilhões de toneladas todo ano e uma das explicações é que facilmente moldado em elementos estruturais e pode ser conformado de variados tamanhos e formas, pela sua capacidade de fluir em estruturas pré-fabricadas (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Nas estruturas de concreto, ele suporta as forças de compressão e cisalhamento, além de ter a rigidez necessária para manter estruturas inteiras estáveis. De acordo com a finalidade que se pretende para a utilização do concreto, sua formulação pode ser alterada. A dosagem dos componentes do concreto, chamada na área da engenharia civil de traço teórico, deve ser considerada para que todas as propriedades necessárias para tal aplicação sejam alcançadas (PETRUCCI, 1998).

Podem-se enumerar suas qualidades como sendo o mais barato em comparação a outros materiais de engenharia produzidos, ganho de resistência mecânica à temperatura ambiente, eficientemente energético, por praticamente não se utilizar de energia elétrica para sua produção, possuir excelente resistência à degradação pela água e as altas temperaturas, baixa requisição de manutenção em curto prazo e sua habilidade de agregar resíduos em sua composição (LI, 2011).

### 4.2.1 Cimento

Uma gama de materiais cerâmicos é classificada como cimentos inorgânicos por uma característica muito específica e especial: estes quando em contato com a água, passam por uma reação química de hidratação à temperatura ambiente, formando uma pasta que posteriormente endurece, resultando em um material sólido, rígido e com elevada resistência à compressão. Deste grupo, os que se destacam é o gesso de paris, a cal e, principalmente, o próprio cimento (CALLISTER JR; RETHWISH, 2012).

O principal e mais utilizado tipo de cimento que pode se destacar é o cimento *Portland* (CP), material pulverulento, tendo em sua constituição silicatos e aluminatos de cálcio. A Tabela 1 traz os quatro compostos com maior proporção na constituição do cimento (PETRUCCI, 1998).

Tabela 1– Principais componentes do cimento

Nome do Composto	Fórmula	Fórmula Abreviada	Porcentagem
Silicato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	45 - 60
Silicato Dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	15 - 30
Aluminato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	6 -12
Ferroaluminato			
Tetracálcico (Ferrita)	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$	6 - 8

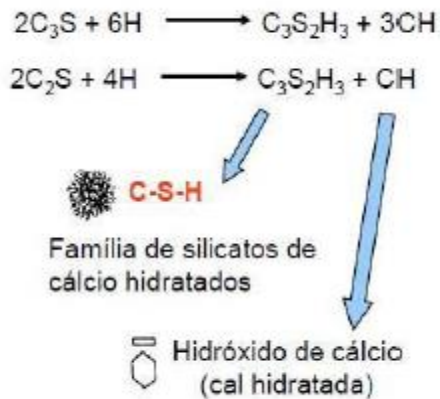
Fonte: Adaptado de SHETTY (2005, p. 15) e METHA; MONTEIRO (2006, p. 27)

O cimento *Portland* é resultante da moagem de um composto denominado clínquer, este resultado de outra moagem a alta temperatura, de proporções adequadas de argila e calcário. Há também, na etapa de produção do cimento a adição de sulfato de cálcio (gipsita), para controlar o tempo de pega. Desta forma, o cimento é formado por uma mistura íntima de duas fases, conforme explicitada abaixo:

A fase silicato, tendo como seus constituintes o  $\text{C}_3\text{S}$  e  $\text{C}_2\text{S}$  é a que possui maior porcentagem em peso do cimento; e a fase intersticial, contendo o  $\text{C}_3\text{A}$  e a ferrita, com menor peso. A Figura 2 retrata

esquemáticamente a hidratação dos compostos com maior relevância do cimento e seus produtos formados (SILVA, 2000).

Figura 2 - Reação de Hidratação dos Silicatos no Cimento



Fonte: GRILLO (2012, p.34)

A evolução do concreto, em geral, acompanha o desenvolvimento das tecnologias ligadas ao cimento e há uma ampla gama de aplicações desse material, dependendo do fim que se deseja aplicá-lo. As normas brasileiras classificam o cimento *Portland* em cinco tipos distintos, sendo estes designados pela sigla CP e do numeral um a cinco, em algarismos romanos, de acordo com sua característica específica (GALVÃO, 2003).

O CP-I, Cimento *Portland* Comum, é utilizado quando não há necessidade de nenhuma característica ou propriedade especial no cimento, normalmente encontrado em serviços gerais. O CP-II, Cimento *Portland* Composto, é subdividido em três classes: CP – II – E (produzidos com 6 a 35% de escória de alto forno), CP – II – Z (teor de 6 a 14% de pozolana) e o CP – II – F (resultante de adição de 6 a 10% de fíler calcário). Destes, o primeiro cimento *Portland* é constituído de uma adição de produto não-metálico e amorfo, essencialmente silicatos e alumino silicatos de cálcio, resultante como um resíduo de alto forno. O segundo tem por característica a reação química entre a pozolana e o hidróxido de cálcio, a temperatura ambiente, que resulta em melhores propriedades cimentantes. Finalmente, na terceira composição, o fíler é adicionado à composição por beneficiar as propriedades em questão de trabalhabilidade, permeabilidade, tendência à fissuração e exsudação, dentre outros (GALVÃO, 2003).

Ainda segundo Galvão (2003), o CP – III, Cimento *Portland* de Alto Forno, como em um dos casos encontrados no CP – II, também é referente à adição de escória de alto forno, entretanto em uma proporção muito maior, podendo chegar até 70% desse resíduo, que é basicamente uma mistura de cal, sílica e alumina. O CP – IV, Cimento *Portland* Pozolânico, possui uma adição de 15 a 50% de pozolana em sua composição, similarmente a um dos tipos do CP – II, mas novamente, em maior quantidade. Este composto possui a sílica ativa e esta pode ser de fontes naturais, como a palha de arroz e artificiais, por exemplo, a cinza volante pulverizada.

O Cimento *Portland* de Alta Resistência Inicial (CP – V ARI) é utilizado para aplicações que necessitam de um ganho rápido na resistência mecânica do material. Além disso, o mesmo é também indicado para obras que tem a necessidade de se retirar as formas de sustentação dos concretos para sua reutilização, pelo seu tempo menor de cura (GALVÃO, 2003).

No Brasil, há o uso desses diversos tipos de cimento, nas mais variadas áreas de atuação e essa variedade está intimamente relacionada aos compostos que estão presentes na sua composição. A Tabela 2 resume as características dos cimentos apresentados.

Tabela 2 – Composição dos principais tipos de cimentos utilizados no Brasil

Tipo de Cimento	Resistência [MPa]	Clínquer + Gesso	Composição [%]		
			Escórias de alto forno	Pozolana	Fíler
CP I	25	100	-	-	-
CP I - S	25	95-99	-	1 - 5	-
CP II- E	25-32-40	56-94	6 - 34	-	0 - 10
CP II - Z	25-32-40	76-94	-	6 - 14	
CP II - F	25-32-40	90-94	-	-	6 - 10
CP III	25-32-41	25-65	35 - 70	-	0 - 5
CP IV	25-32-42	45-85	-	15 - 50	0 - 5
	Alta resistência				
CP V ARI	inicial	95-100	-	-	0 - 5

Fonte: Adaptado de GRILLO (2014, p. 22)

### 4.2.2 Agregados

A qualidade de um concreto tem uma dependência direta com a procedência dos seus componentes e, por esse motivo, a característica dos agregados tem que ser um ponto de atenção, uma vez que, estes podem alcançar até 85% do peso total do concreto acabado. Os agregados estão presentes na constituição desse compósito por questões tanto técnicas quanto econômicas (FRAZÃO, 2002).

Ainda de acordo com Frazão (2002), têm-se como funções primárias dos agregados na composição do concreto, a redução dos custos atrelados para sua formulação e das variações de volume provenientes de causas diversas e, principalmente, contribuir com grãos que tenha a capacidade de resistir aos esforços solicitantes, ao desgaste e a ação do meio em que está inserido.

O maior tamanho de agregado praticável para que as propriedades do concreto sejam atendidas e até mesmo por conveniência de sua produção é de 80mm. Partindo-se da utilização da máxima dimensão de partícula de agregado, esta escolha de dimensão reduziria a quantidade de cimento despendida para a confecção do concreto, o volume de água na massa para sua hidratação e o encolhimento a seco do mesmo. Entretanto, esta condição só pode ser atendida em trabalhos bem específicos de mistura e arranjo da estrutura, que também tenham um controle bem definido da espessura da seção, espaço para esse tipo de reforço e um cobrimento limpo (SHETTY, 2005).

Os agregados são divididos em duas classes de acordo com seu tamanho de partícula: graúdos, aqueles que possuem dimensão superior a 4,75mm (Tabela 3) e os miúdos, que apresentam valores inferiores a essa dimensão e superior a 75 $\mu$ m, sendo o mais comum a areia. Os primeiros são, em sua maioria, a areia natural quartzosa, resultado do britamento ou moagem abrupta de rochas estáveis, enquanto os agregados miúdos podem ser tanto os pedregulhos naturais quanto a brita, resultante do britamento das mesmas rochas.

A Tabela 3 também mostra o DMC – dimensão máxima característica – das britas. Tal grandeza é associada à distribuição da granulometria em relação a malha quadrada e sua porcentagem retida acumulada sendo igual ou imediatamente inferior a 5% em massa da porção amostrada (FUSCO, 2012).



Tabela 3– Classificação dos Agregados

Graúdos por	Dimensões	
	Dimensões [mm]	DMC [mm]
Brita 0	4,8 - 9,5	9,5
Brita 1	9,5 - 19,0	19,0
Brita 2	19,0 - 25,0	25,0
Brita 3	25,0 - 50,0	50,0
Brita 4	50,0 - 76,0	76,0
Brita 5	76,0 - 100,0	100,0

Fonte: FUSCO (2012, p. 94)

### 4.2.3 Água

Não é usual considerar a água como material de construção, mesmo com seu consumo significativo nesse setor. Na formulação de um metro cúbico de concreto, o volume de água pode variar entre 160 e 200 litros, valor este que compõe menos de 10% da massa total do concreto finalizado. Entretanto, sob o ponto de vista técnico, há transformações importantes na microestrutura das pastas cimentícias que confere propriedades requeridas para o concreto (ISAIA, 2011).

Segundo Isaia (2011), a água é um dos principais componentes do concreto, pois esta influencia diretamente nas propriedades reológicas do concreto fresco e endurecido, na retração e fluência, nos mecanismos de transporte de fluidos, mas principalmente, na hidratação do concreto e em todas reações derivadas nesse importante processo.

A quantidade de água a ser utilizada para formulação do concreto é extraída a partir de uma relação entre a massa da própria água (a) e o cimento (c), conhecida como fator  $a/c$ . Quanto maior essa relação, menor é a tensão de limite de escoamento, gerando um aumento na deformabilidade e uma diminuição da viscosidade da pasta. Contudo, na formulação do concreto deve se procurar conseguir um fator  $a/c$  o mais baixo possível, a fim de se evitar fissuras nos capilares, se houver excesso de água na composição (ISAIA, 2005).

#### 4.2.4 Reações de Hidratação do Cimento

Juntamente com o cimento, a água pode ser considerada um componente vital para o concreto, já que, produz a matriz resistente e aglutinante, que confere compacidade a estrutura e por consequência, afeta diretamente a durabilidade e a vida útil desse material (ISAIA, 2011).

Mais especificamente, o termo hidratação, levando-se em conta a química do cimento, se refere às modificações que ocorre no cimento anidro - este não possui características de aglomerante – quanto é misturado com água. As reações de hidratação, à medida que o tempo passa, diminuem sua velocidade, porque elas se processam do exterior para o interior dos grãos de cimento (TAYLOR, 1997).

As propriedades, resultantes das reações intrínsecas no material, têm relação direta com o tempo e esta característica é chamada de grau de hidratação. Para que haja uma completa hidratação do cimento, deve haver quantidade suficiente para que todas as reações que ocorrem no interior da pasta se processem integralmente, e o valor-chave para a relação a/c é de aproximadamente 0,40 (ISAIA, 2011).

A hidratação do cimento é muito complexa pela interferência de diferentes processos, pela influência entre as diferentes fases do cimento que reagem com a água e pela diferente taxa de hidratação de cada composto isoladamente. Há cinco etapas, bem definidas, para a hidratação do cimento (KURDOWSKI, 2014).

A primeira etapa é o chamado período de pré-indução, o qual é caracterizado pela saturação do meio líquido pela dissolução dos compostos do cimento anidro. Esta etapa pode chegar a 15 minutos, ou seja, muito rápida e apresentando uma alta liberação de calor.

Posteriormente, inicia-se o período de indução, também chamado de dormência, fase essa que se inicia a formação de um gel de silicato hidratado de cálcio (CSH) em torno da partícula de cimento. Pela formação desse gel na superfície das partículas, o processo de hidratação é retardado e há uma boa trabalhabilidade do cimento, uma vez que esse processo pode acontecer de 15 minutos até 4 horas, com liberação de calor desprezível.

Já a etapa 3, chamada fase de aceleração, tem por característica o consumo quase total do gel de CSH formado na etapa anterior e espécies iônicas presentes no meio líquido começam a atravessar a camada fina CSH e tendo contato direto

com as partículas de cimento. Desta forma, o processo de hidratação volta a ter uma velocidade alta, ocorrendo a transformação de parte do CSH em etringita ( $CA\bar{S}H$ ) e em hidróxido de cálcio, chamado portlandita (CH). Esse período ocorre, em média, entre 4 e 8 horas.

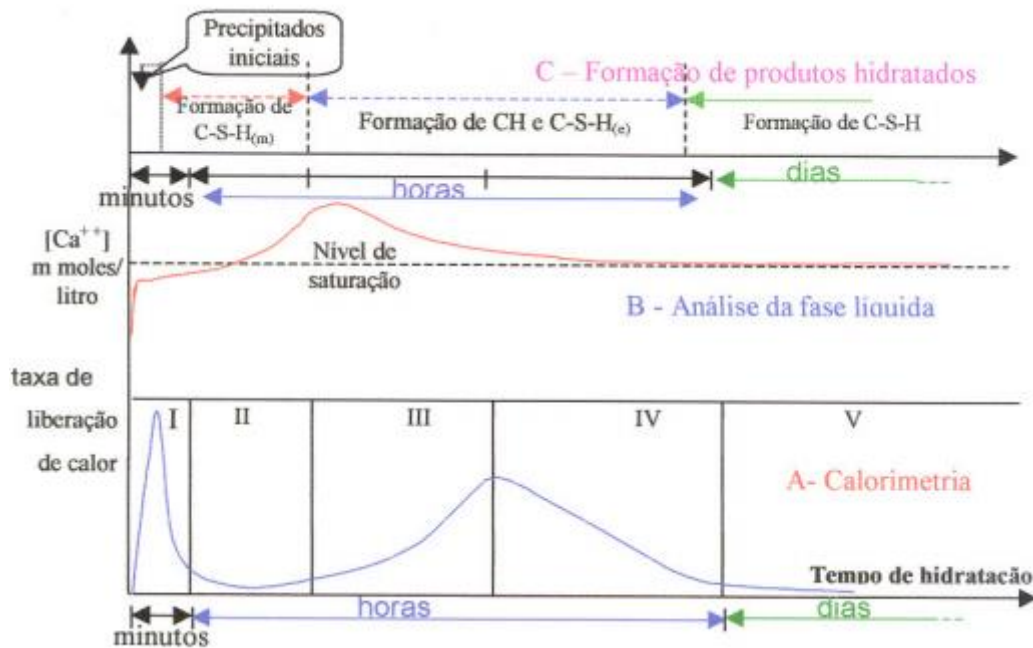
A etapa 4, com o desenvolvimento da etringita, em sua forma de agulha, e dos cristais hexagonais de portlandita, o cimento vai perdendo sua trabalhabilidade. Nesse período de hidratação, o CSH, o CH e o  $CA\bar{S}H$  continuam sendo formados, entretanto de uma forma bem mais lenta e com pouca liberação de calor, podendo ter duração de 8 a 24 horas.

Finalmente, a etapa 5 se estende até o vigésimo oitavo dia, com formação dos mesmos compostos presentes na etapa anterior, entretanto com uma velocidade ainda menor e com praticamente nenhuma liberação de calor. Com o fim da cura (28 dias), a microestrutura pode apresentar a formação de gel CSH, uma vez que pode haver partículas de cimento ainda sendo hidratadas, devido a sua granulometria mais grossa (GRILLO, 2014; GONÇALVES, *et al.* 2006; SILVA, 2000).

Os compostos da hidratação, à medida que são formados, começam a ocupar os espaços deixados pela água e pelas partículas de cimento dissolvidas (METHA; MONTEIRO, 2006).

A Figura 3 retrata esquematicamente os períodos de hidratação do cimento, demonstrando a relação entre produtos formados advindos dos silicatos, nível de saturação do meio líquido e a liberação de calor.

Figura 3 - Estágios de Hidratação do Cimento, com Destaque para Formação de Fases



Fonte: SILVA (2000, p. 31)

#### 4.2.5 Concreto Hidratado e Zona de Transição Agregado – Pasta de Cimento

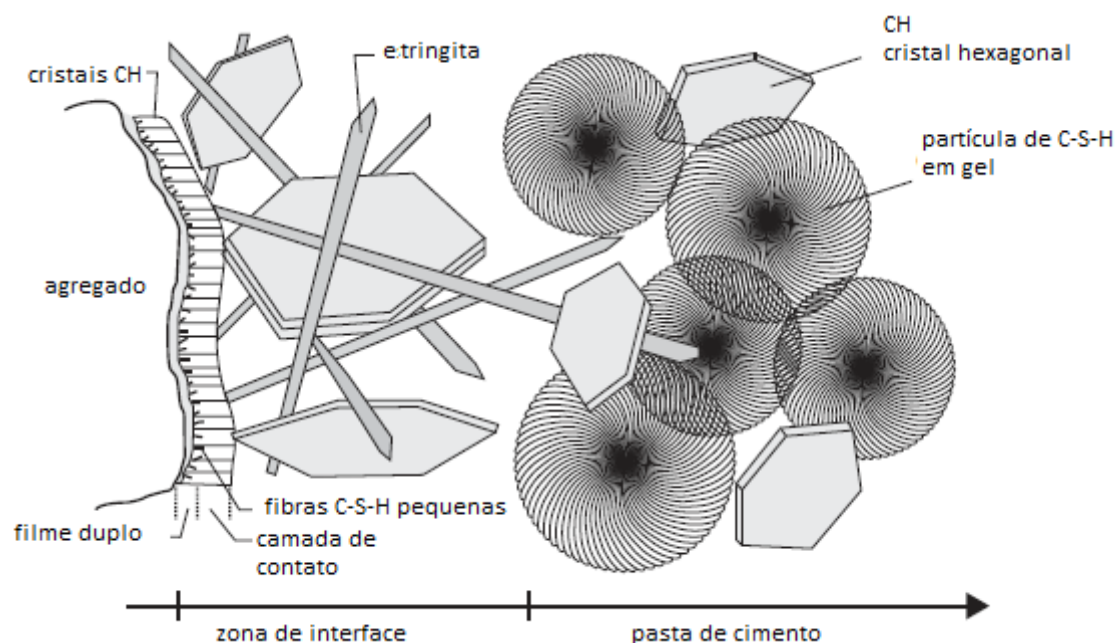
O concreto não pode simplesmente ser descrito como um compósito de agregado graúdo e miúdo em uma matriz de cimento. Suas propriedades são largamente influenciadas, por além de seus componentes, também pela zona de transição entre os agregados, a pasta de cimento e as forças de ligação entre elas. Em concretos tradicionais, os agregados são menos deformáveis e, por essa razão, todas as tensões presentes no mesmo são transferidas para essa zona de transição, ocorrendo a quebra das ligações entre a pasta e os agregados, formando trinca (KURDOWSKI, 2014; TAYLOR, 1997).

Essa zona de transição pode ser caracterizada do ponto de vista microestrutural por reações que ocorrem no interior do concreto. A sequência delas é bem próxima ao que acontece na hidratação da pasta de cimento. Primeiramente, são formados filmes de água ao redor das maiores partículas de agregado, quando o concreto ainda está em seu formato fresco. Simultaneamente, uma série de íons - cálcio, sulfato, hidróxidos e aluminatos - advindos da dissociação do sulfato de cálcio

e do aluminato de cálcio são combinados dando origem a etringita, ao C-S-H e ao CH (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Segundo Mehta e Monteiro (2006), com o progresso da hidratação na zona de transição agregado - pasta, as fibras menores de C-S-H, os pequenos cristais de etringita e de CH começam a preencher os espaços vazios deixados pela água, fato este que aumenta a densidade do material e melhora a resistência mecânica nessa zona transicional. A Figura 4 ilustra um modelo esquemático da composição de fases da zona de transição e seus componentes microestruturais.

Figura 4 - Desenho esquemático da zona de transição agregado – pasta de cimento



Fonte: Adaptado de KURDOWSKI (2014, p. 378).

Essa interface entre os agregados e a pasta de cimento, caracteriza-se por apresentar maior quantidade de vazios em relação a qualquer outro ponto genérico no corpo do concreto (cimento hidratado ou agregado), e estes vazios podem provocar comportamentos diferenciados quando o concreto é submetido a diferentes tipos de esforços (ISAIA, 2011).

A microestrutura da zona de interface nos concretos varia grandemente pela característica encontrada na pasta de cimento, como a porosidade, precipitação de alongados cristais de CH pelas reações de hidratação e grande quantidade de etringita na região. O melhor entendimento dessa região poderia trazer explicações

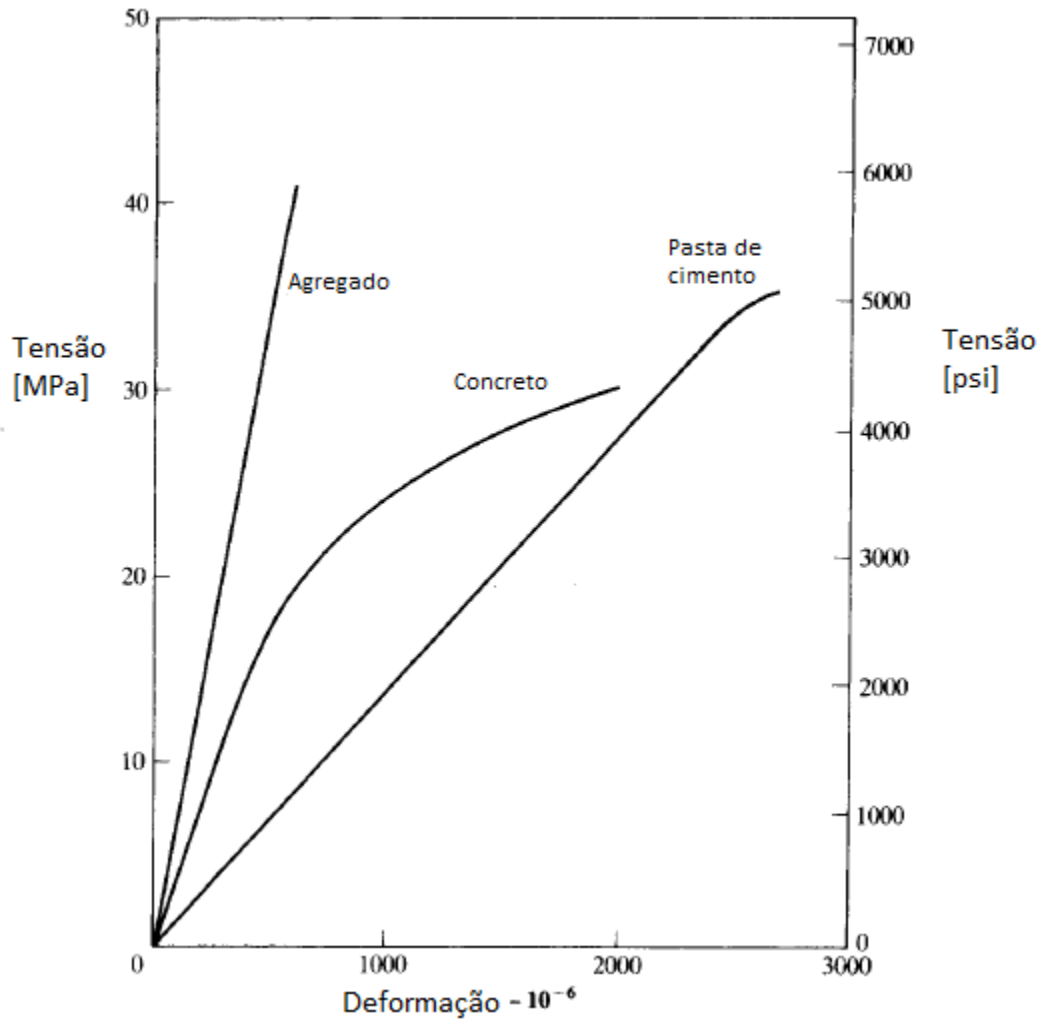
mais apuradas em relação ao seu desempenho macroestrutural de sua quanto a resistência à compressão e outros parâmetros (LI, 2012).

Segundo Isaia (2011), o concreto quando submetido a um esforço de tração, uma falha genérica é formada na pasta de cimento e isso causa enfraquecimento localizado no material, que aumenta gradativamente à medida que há um aumento de tensão aplicada, levando a propagação das microfissuras. Já na compressão, a ruptura se dá por tração indireta, ocorrendo uma interconexão entre as microfissuras, desagregando o concreto – principalmente na zona de transição – e causando, assim, um deslocamento superficial acentuado e a desagregação do concreto.

Vale ressaltar que a zona de transição é considerada como o limite de resistência nos concretos. A presença desta interface está diretamente ligada às falhas no material por um considerado baixo valor de resistência, além de que suporta muito menos tensões do que se comparado a pasta de cimento ou os agregados, separadamente (TAYLOR, 1997).

Segundo o autor citado acima, é notório em um gráfico típico de Tensão x Deformação notar que tanto os agregados quanto a pasta de cimento (componentes do concreto) se deformam elasticamente até sua ruptura. Entretanto, o concreto acabado, que é proveniente de uma mistura entre a matriz cimentícia e o agregado graúdo, apresenta tanto uma seção de deformação elástica quanto uma seção de formação plástica, conforme é demonstrado na Figura 5 (TAYLOR, 1997).

Figura 5 - Gráfico Tensão x Deformação – agregado, pasta de cimento e concreto



Fonte: Adaptado de NEVILLE (2010, p. 113).

#### 4.3. ECONOMIA CIRCULAR

Os produtos manufaturados e utilizados no cotidiano foram, em sua maioria, projetados sem real importância quanto às matérias-primas que seriam consumidas, bem como qual seria o fim que teriam após seu ciclo de vida. Esse sistema tem como prerrogativa “extrair, transformar e descartar” e se denomina economia linear. A longo prazo, tal abordagem contribuiu para o esgotamento das fontes não-renováveis no planeta, ocasionando resíduos sem finalidade ou nocivos aos seres vivos e ao ambiente (VILELA, 2007).

Como alternativa a essa cultura de desperdício, há uma crescente discussão a respeito da chamada economia circular. Esse assunto surgiu há décadas,

entretanto a discussão sobre sua implementação de fato, é recente. Os produtos, nesse estilo de produção, são projetados para sua reutilização, reparo, reforma ou serem remanufaturados. Com o aumento da preocupação das empresas e consumidores com a preservação do meio ambiente, tal ciclo de máximo aproveitamento vem se tornando cada vez mais necessário (VILELA, 2007).

O que se pretende, com esse modelo, é a ligação entre os negócios e a transformação dos materiais, uma vez que, a economia circular possibilita a criação de produtos e serviços de modo eficiente. Mais especificamente, os produtos ditos biológicos retornam à cadeia de alimentos e a agricultura ao passo que os materiais técnicos podem ser recolocados na produção sem perda da qualidade (KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT, 2017).

O gerenciamento das empresas é desafiador, já que, isso demanda novas estruturas e procedimentos que explicitam o maior empenho delas no que diz respeito à inovação dentro da própria organização. O caminho para preposição de valor estendido possui correlação com modelos de negócio e serviços que estejam alinhados com a produção sustentável (RITZEN; SANDSTROM, 2017).

#### **4.3.1 Resíduos Sólidos**

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), amparada pela Lei n. 12.305, de 5 de agosto de 2010, estabelece princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações para a integralização da gestão e gerenciamento ambiental adequada para os resíduos sólidos (JARDIM; YOSHIDA; MACHADO FILHO, 2012).

A primeira preocupação de todo tipo de empreendimento deve ser a não geração de resíduos sólidos, o que é muito difícil de atender. Caso não seja possível atingir esse quesito, há uma ordem de prioridade a ser atendida para atender os parâmetros da sustentabilidade: a redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos e finalmente, a disposição final adequada dos rejeitos provenientes das mais diversas áreas (JARDIM; YOSHIDA; MACHADO FILHO, 2012).

A produção de lixo é inevitável na grande maioria dos setores, já que, todos os processos geram resíduos, desde os mais simples as mais complexas produções industriais. Frequentemente, o lixo é associado a algo que precisa ser afastado da sociedade, que não possui mais serventia. Entretanto, considerando esses rejeitos como tendo uma parcela de 40% de materiais que possam ser reciclados, pode-se



afirmar que existem valores a serem resgatados através do não desperdício, da separação na fonte e da cadeia produtiva da reciclagem (GONÇALVES, 2003).

#### 4.3.1.1 Resíduos Sólidos na Formulação de Concretos

Os resíduos sólidos para confecção de concreto são normalmente provenientes de dois grupos: os compostos de cimento, cal, areia e brita (chamado de Grupo I), que basicamente são os concretos, argamassas e blocos estruturais; e os do Grupo II, que são os derivados das cerâmicas. As características desses materiais podem ser muito variadas, desde concretos com resistência mecânica alta até louças sanitárias, com alta durabilidade, resistência a ataque de ácidos e elevada tensão de ruptura (IPT, 2000).

Há um crescente interesse no uso de resíduos sólidos, como as cerâmicas, na substituição dos agregados na formulação do concreto. Os produtos cerâmicos são parte essencial na maioria das construções e estes possuem, em sua maioria, alto nível de argila em sua composição. Na indústria cerâmica, pelo menos 30% de toda produção se torna resíduo e não é reciclado. (AWOYERA et al., 2016).

No estudo de Senthamarai e Manoharan (2005), foram comparadas as propriedades das cerâmicas britadas, provenientes da indústria de isolantes elétricos, com a brita, após um período de 28 dias, e obteve-se como resultado que as características relacionadas a densidade específica, tamanho máximo, módulo de finura, porcentagem de vazios e compactação de ambas são próximas e que a textura da superfície na cerâmica é mais homogênea e resistente a ataques químicos. Além disso, avaliou-se seis corpos de provas de concreto com total substituição da brita por esta cerâmica e conclui-se que a resistência a flexão e a compressão são similares ao concreto tradicional, entretanto, encontrou-se um valor menor para a resistência à tração.

Segundo estudo de Awoyera et al. (2016), foram produzidos oito corpos de prova com a substituição separadamente tanto de brita, como agregado graúdo quanto de areia de rio como agregado miúdo por cerâmicas cominuídas provenientes de demolições, mais especificamente dos revestimentos de parede e pisos. Cada concreto produzido possuía proporções de 25, 50, 75 e 100%, além do corpo de prova de referência (sem substituição alguma dos agregados tradicionais). Os ensaios tinham como objetivo analisar o *slump test*, a resistência a compressão e

a resistência a tração. O primeiro parâmetro indicou um resultado satisfatório, com exceção do corpo de prova com substituição total do agregado graúdo, que apresentou uma trabalhabilidade baixa. Já em relação ao teste de compressão e de tração, ambos apresentaram um ganho de resistência, principalmente dos corpos de prova com 100% dos agregados substituídos.

Os concretos que possuem em sua constituição agregados provenientes da reciclagem apresentam um maior número de zonas de transição pasta – agregado e essa importante região tem sido estudada menos intensamente em comparação a outras propriedades. O entendimento dessa zona interfacial pode trazer respostas a respeito do desempenho do concreto do ponto de vista macroestrutural, observando os efeitos da região tanto na resistência mecânica quanto na permeabilidade do mesmo (DEL BOSQUE *et al.*, 2017)

No estudo Del Bosque *et al.* (2017), foram confeccionados seis corpos de provas, com substituintes diferentes ao agregado graúdo, sendo eles: concreto reciclado (Rc), tijolo cerâmico, asfalto, vidro, plástico e madeira. Os resultados para o módulo de elasticidade foram muito menores para todos os substituintes - 4,73GPa para a madeira como o menor e o maior de 86,17GPa (vidro) – em comparação ao valor do concreto reciclado (120GPa). Em relação à aderência, tanto o Rc quanto o tijolo cerâmico se mostraram mais aderentes a matriz de cimento; já o plástico, o vidro e a madeira, demonstraram uma fraca ligação/afinidade com os constituintes da pasta de cimento. Concluiu-se neste estudo que os substituintes que possuem melhores aspectos e características para o concreto quando incorporados seriam o tijolo cerâmico e o Rc, enquanto o vidro, o plástico e a madeira não seriam uma alternativa viável.

#### 4.3.1.2 Rejeito de Louça Sanitária na Formulação de Concretos

O tempo de degradação de uma cerâmica é extremamente longo (faixa de quatro mil anos) e, por esse motivo, esse material tem um potencial de acumulação grande no meio ambiente. Um dos meios de melhor reuso desse material é como matéria-prima para a confecção de concreto, pelo fato do mesmo não precisar passar por processamento especial para ser utilizado como agregado (HALICKA; OGRODNIK; ZEGARDLO, 2013; MEDINA *et al.*, 2014).

No processo de manufatura de uma cerâmica, como a louça sanitária, é inevitável que se haja um percentual de produtos defeituosos e estes não são comercializados, mesmo com todo melhoramento ao longo do tempo da linha de produção. As duas principais razões para a rejeição das peças no processo produtivo são as quebras no material acabado e as variações dimensionais e de formato, quando produzido. Ambos os defeitos não afetam as propriedades intrínsecas do material, tornando-os bons substituintes dos agregados para utilização dos mesmos em concretos (MEDINA; ROJAS; FRÍAS, 2012).

Medina, Frías e Rojas (2012) analisaram o comportamento de corpos de prova em 28 dias aos testes de compressão e tração, com substituição de 15, 20 e 25% de brita pela louça sanitária e os compararam com o corpo de prova de referência (sem substituição). Os resultados encontrados mostraram que quanto mais se substituíu o agregado tradicional pelo resíduo sólido, melhor resistia à compressão (o com substituição de 25% atingiu um resultado 12% maior que o concreto de referência) e os valores de tração foram bem similares ao concreto tradicional. Em relação à microestrutura, constatou-se que quanto maior a substituição do agregado, maior era a porosidade no concreto, pelo fato da brita ter uma melhor ancoragem na zona de transição agregado – pasta de cimento.

Medina, Rojas e Frías (2012) fizeram novamente a substituição de brita por rejeitos de louça sanitária na proporção de 15, 20 e 25%, comparando-os com um concreto de referência. Os testes de compressão foram realizados com 7, 28 e 90 dias e em todos os períodos, os corpos de prova com substituintes demonstraram um melhor resultado, fato que também ocorreu para o teste de tração (mas esse realizado apenas para o tempo de cura de 28 dias). Notou-se também que a zona transicional do agregado – pasta de cimento era mais estreita, mais compacta e menos porosa, isso pode explicar o melhor comportamento mecânico do concreto com a louça sanitária como agregado graúdo.

No estudo de Halicka, Ogrodnik e Zegardlo (2013), o agregado graúdo foi substituído em sua totalidade pelos rejeitos de louça sanitária e ensaios de resistência mecânica a temperatura ambiente e alta temperatura (1000°C) foram realizados. À temperatura ambiente, notou-se que um alto desempenho do concreto com o resíduo sólido é obtido (na compressão e na tração), além de ter uma alta resistência também à abrasão. Após o aquecimento a 1000°C, a louça sanitária preservou sua forma, mas teve uma diminuição da resistência a compressão e a

tração (46% e 54%, respectivamente), algo que também acontece em diversos outros tipos de concretos.

#### 4.4 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS

##### 4.4.1 Composição Granulométrica

A distribuição dos grãos presentes nos agregados, que é geralmente expressa em termos de porcentagens individuais e acumulada, é definida como composição granulométrica. Há também dois parâmetros que são utilizados para caracterizar e referenciar um lote a ser amostrado: a dimensão máxima característica (DMC) e o módulo de finura (MF) (ISAIA, 2005).

Segundo a NBR 7211 (1983), o DMC é a grandeza que relaciona a abertura nominal da malha da peneira - em milímetro - da série normal ou intermediária, com a porcentagem retida acumulada do agregado (igual ou menor que 5% em massa). E o MF corresponde à somatória das porcentagens retidas acumuladas – em massa – nas peneiras da série normal, dividido por 100.

Referentes às zonas de uso do agregado miúdo, estas podem ser de dois tipos: zona ótima e zona utilizável. Como o próprio nome diz, a primeira é uma faixa de tamanho em que apresentam um melhor rendimento quando este usado para produção de outro material. Já o segundo, é o limite de utilização relativo as aberturas das peneiras, sendo que, fora dele o material já não apresenta a mesma performance.

A Tabela 4 apresenta os limites recomendados para o conhecimento da composição granulométrica do agregado miúdo (ensaio de peneiramento).

Tabela 4 – Limites de distribuição granulométrica do agregado miúdo

Peneiras com aberturas nominais [mm]	Porcentagens, em massa, retida acumulada	
	Zona Ótima	Zona Utilizável
9,5	-	-
4,8	3 - 5	0 - 3
2,4	29 - 43	13 - 29
1,18	49 - 64	23 - 49
0,6	68 - 83	42 - 68
0,3	83 - 94	73 - 83
0,15	93 - 98	88 - 93

Fonte: Adaptado de FUSCO (2012, p. 22)

As areias, de acordo com seu MF, podem ser classificadas como grossa ( $MF > 3,9$ ), média ( $2,4 < MF < 3,9$ ) e fina ( $MF < 2,4$ ). Esse dado é importante porque em geral as areias consideradas muito grossas produzem misturas de concreto ásperas e com uma baixa trabalhabilidade. Já as areias muito finas, aumentam consideravelmente o consumo de água e, por consequência o consumo de cimento, (pela relação  $a/c$ ), sendo economicamente desfavorável.

A relação  $a/c$ , ou relação água – cimento, é a quantidade de água acrescida a uma certa massa de cimento para a produção de concreto. Esse parâmetro é muito importante porque a resistência mecânica do concreto é diretamente ligada à hidratação do cimento, uma vez que, esse valor tem relação íntima com as propriedades da pasta endurecida e, esta por sua vez, é função do quanto de água e de cimento eram misturadas.

Também se pode analisar a composição granulométrica dos agregados graúdos, conforme Tabela 5 (FUSCO, 2012; ISAIA, 2005).

Tabela 5 – Limites de distribuição granulométrica do agregado graúdo

Peneira com aberturas nominais [mm]	Porcentagem, em massa, retida acumulada				
	Zona Granulométrica (d/D)				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
75	-	-	-	-	0 - 5
63	-	-	-	-	5 - 30
50	-	-	-	0 - 5	75 - 100
37,5	-	-	-	5 - 30	90 - 100
31,5	-	-	0 - 5	75 - 100	95 - 100
25	-	0 - 5	5 - 25	87 - 100	-
19	-	2 - 15	65 - 95	95 - 100	-
12,5	0 - 5	40 - 65	92 - 100	-	-
9,5	2 - 15	80 - 100	95 - 100	-	-
6,3	40 - 65	92 - 100	-	-	-
4,75	80 - 100	95 - 100	-	-	-
2,36	95 - 100	-	-	-	-

Fonte: Adaptado de ISAIA (2005, p. 334)

A razão  $d/D$  define a zona granulométrica, que relaciona diretamente a menor ( $d$ ) e a maior dimensão do agregado.

Uma distribuição granulométrica correta e equilibrada trará muitos benefícios para o concreto produzido, dentre eles um concreto bem trabalhável, adensável e com um custo economicamente vantajoso. Além disso, essa boa distribuição dos grãos produzirá uma estrutura mais fechada, com um volume de vazios menor, diminuindo assim a penetração de agentes agressivos – líquidos ou gasosos – que poderiam atacar o interior do concreto (ISAIA, 2005).

#### 4.4.2 Ensaios no Concreto no Estado Fresco

O concreto em seu estado fresco é aquele que possui as características de plasticidade e de bom manuseio e assentamento e se encontra na forma de uma massa sem segregação, uma vez que, as matérias-primas que dão origem a esse material estão totalmente misturadas. O estágio plástico do concreto fresco permite

o transporte, o lançamento na obra, o preenchimento dos espaços desejados, compactação, finalização de superfície e todas essas ações têm ligação com o conceito de trabalhabilidade (LI, 2011).

A trabalhabilidade no concreto pode ser definida como a propriedade que mede o esforço necessário para manipular certa quantidade do concreto, em seu estado fresco, com a menor perda possível de homogeneidade e uniformidade. Tal propriedade consiste em dois aspectos: a consistência e a coesão. A consistência, também chamada de fluidez, descreve o quão fácil o concreto flui em determinado lançamento; já a coesão, diz respeito à habilidade do concreto no estado fresco manter seus ingredientes uniformemente unidos ou, em outras palavras, descrever a capacidade de retenção de água e dos agregados graúdos (LI, 2011).

Os principais fatores que influenciam a trabalhabilidade do concreto são o consumo de água, consumo de cimento, características específicas dos agregados e o uso ou não de aditivos na formulação do concreto. Em se tratando das primeiras idades, as propriedades avaliadas são o abatimento do concreto, a sua segregação e exsudação e seu tempo de pega (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

#### 4.4.2.1 Teste de Abatimento de Tronco de Cone – Slump Test

O ensaio e análise da consistência do concreto, característica inerente do material e que está relacionada com a sua mobilidade, pode ser obtido por meio do teste de abatimento de tronco de cone, chamado também de *slump test*. Este ensaio é largamente usado por ser de rápida execução e possuir um equipamento extremamente simples (NEVILLE; BROOKS, 2010).

O ensaio se faz, basicamente, preenchendo completamente um tronco de cone - normalmente com dimensão de 300 mm de altura, 200 mm o diâmetro inferior e 100 mm o diâmetro superior - com a massa de concreto fresco. Deve-se levar em conta que para que o preenchimento seja feito da melhor maneira possível, três camadas devem ser posicionadas, aplicando-se 25 golpes com uma haste de aço, para que o concreto fique bem adensado dentro do molde e preencha todo espaço disponível. Caso fique um excesso de concreto acima do molde, o mesmo deve ser retirado para que não haja interferência nos resultados (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

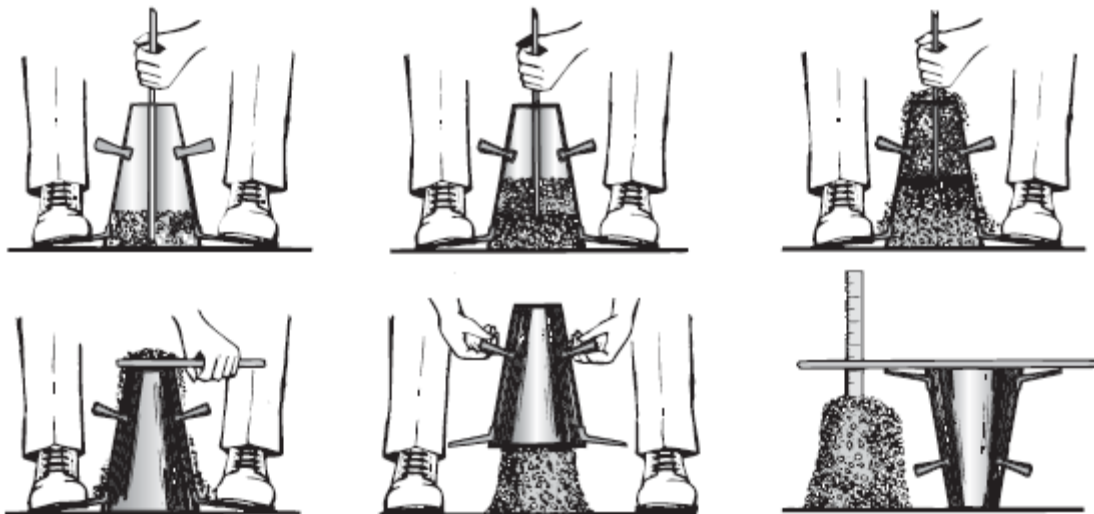
Com o concreto devidamente adensado no interior do molde, ele é lentamente levantado verticalmente, em um único movimento. A massa de concreto,

agora sem sustentação lateral, começa a diminuir de altura e se espalhar (movimento chamado de *slump*) pela ação da gravidade em seu peso. A distância entre a altura total do molde e a massa de concreto após assentamento total é a medida de interesse e demonstra, quantitativamente, a consistência e fluidez do material (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

A consistência do concreto para se ter um melhor trabalho é relativa, uma vez que, esse material pode ser utilizado de várias formas diferentes. Um exemplo poderia ser que um concreto com boa trabalhabilidade para assentamento de pisos ocasionaria uma ruptura drástica se aplicado a um elemento estrutural (laje, viga ou pilar). Portanto, não se pode criar um padrão generalista para a consistência do concreto e sim, adaptar a formulação do mesmo de acordo com seu uso.

A Figura 6 demonstra, esquematicamente, a sequência de ações que ocorrem na execução de um teste de abatimento do concreto.

Figura 6 - Procedimento do *Slump Test*



Fonte: Adaptado de MEHTA (2006, p. 335)

A partir da medida obtida na realização do *slump test*, ou seja, o seu abatimento, o concreto pode ser classificado de acordo com sua consistência, conforme é demonstrado na Tabela 6.



Tabela 6 – Classe de consistência do concreto

<i>Slump Test</i>	
Consistência	Abatimento [cm]
Seca	0 - 2
Firme	2 - 5
Média	5 - 12
Mole	12 - 18
Fluida	18 - 25

Fonte: CRUZ (2017, p. 35)

#### 4.4.2.2 Segregação e Exsudação

A segregação pode ser definida como a separação dos componentes da mistura de concreto fresco, e por este motivo, a massa desse composto não é mais homogênea e uniformemente distribuída. Existem dois tipos de segregação que podem acarretar problemas na formulação e confecção do concreto. O primeiro tipo tem relação com a separação total ou parcial da argamassa do corpo do concreto e esta característica é típica de misturas muito secas, ou seja, sem a quantidade adequada de água adicionada (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Segundo Mehta e Monteiro (2006), para massas muito úmidas, ou seja, com utilização de excesso de água na sua formulação, a mistura de concreto pode apresentar o segundo tipo de segregação, denominada exsudação. Tal fenômeno é constatado pela presença de água na superfície do concreto fresco logo após o mesmo ser conformado em uma superfície. Além disso, a exsudação pode ser explicada pelo fato de a água ser o componente mais leve da mistura e os sólidos em suspensão tenderem a se mover para área mais abaixo da mistura, pela ação da força da gravidade.

Não há testes normalizados para a medição da segregação em concretos e por este motivo, faz-se uso de observação visual quanto ao escorrimento de água nas bordas da massa fresca e sua inspeção para avaliar a presença ou não de água excessiva ou faltante no concreto. Os principais fatores do aparecimento de segregação e exsudação no concreto são a excessiva quantidade de partículas grandes de agregado graúdo, a consistência imprópria para confecção do produto, a

ausência de quantidade adequada de agregados miúdos e o inadequado método de lançamento e conformação da massa de cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

#### 4.4.3 Ensaio no Concreto no Estado Endurecido

##### 4.4.3.1 Ensaio Mecânico de Compressão

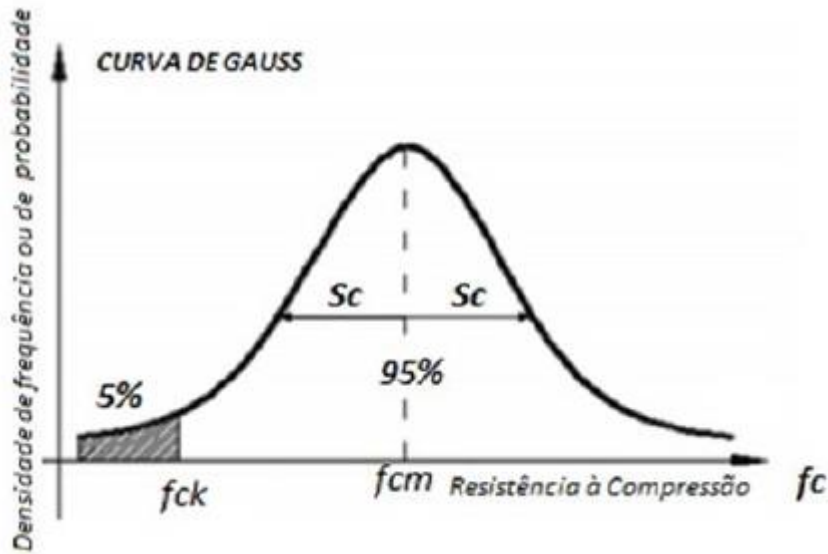
A resistência de um material pode ser definida como a habilidade em suportar tensões em sua estrutura sem ser levada a falha. Fazendo-se um estudo com investigações microestruturais, pode-se afirmar que o concreto apresenta diversas micro trincas, antes mesmo de sofrer uma aplicação de força externa. Desse modo, especificamente para este composto, a resistência é relacionada a máxima carga de tensão que esse composto pode suportar sem sofrer ruptura (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Uma das mais importantes e utilizáveis propriedades do concreto, sem dúvida, é sua resistência a compressão, já que, seus empregos em aplicações estruturais têm como importância primária suportar as tensões de esmagamento e cisalhante. O teste de resistência a compressão é geralmente feito em laboratório em equipamento que aplica uma carga axial em um corpo-de-prova cilíndrico ou em forma de paralelepípedo até seu rompimento (SHETTY, 2005).

Devido a vários fatores e variáveis externos que afetam o valor obtido em um ensaio de compressão, tal resistência ( $f_c$ ) apresenta uma discrepância de valores. Por esse motivo, é feito um cálculo de média simples para se obter a resistência média do concreto à compressão ( $f_{cm}$ ). É de se destacar que quanto mais rigoroso for o ensaio realizado, maior precisão será obtida no cálculo de  $f_{cm}$  (ISAIA, 2005).

O valor de resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ) – valor de referência utilizado como base de cálculo para o desenvolvimento de um projeto civil estrutural – representa a parcela de uma distribuição normal em que os corpos-de-prova ensaiados possuem  $f_c \geq f_{cm}$  em 95% dos casos, conforme é demonstrado na Figura 7 (FUSCO, 2012; HELENE, 1981).

Figura 7 - Distribuição da Resistência à Compressão no Concreto



Fonte: HELENE (1981, p. 108)

O valor de  $f_{ck}$  está associado a um nível de confiança do valor obtido para a resistência à compressão de 95%. Tal resultado é obtido através da aplicação de um coeficiente de minoração conforme Equação 1

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,65S_c \quad (1)$$

A constante numérica 1,65, presente na Equação 1, está relacionado à área na distribuição normal em que os valores correspondem a 5% em que  $f_c < f_{cm}$  e a variável  $S_c$  é o desvio-padrão obtidos dos ensaios com os corpos-de-prova (FUSCO, 2012).

Segundo NBR 12655 (2006), a produção do concreto sendo realizado com os mesmos materiais, equipamentos e processo de produção, o valor de  $S_c$  pode ser determinada com uma sequência de 20 resultados consecutivos em um período de 30 dias. Entretanto, quando não se conhece o desvio-padrão específico para o traço de produção, este é estipulado por norma, conforme é demonstrado na Tabela 7.

Tabela 7– Valores de  $S_c$  de Acordo com a Condição de Produção do Concreto

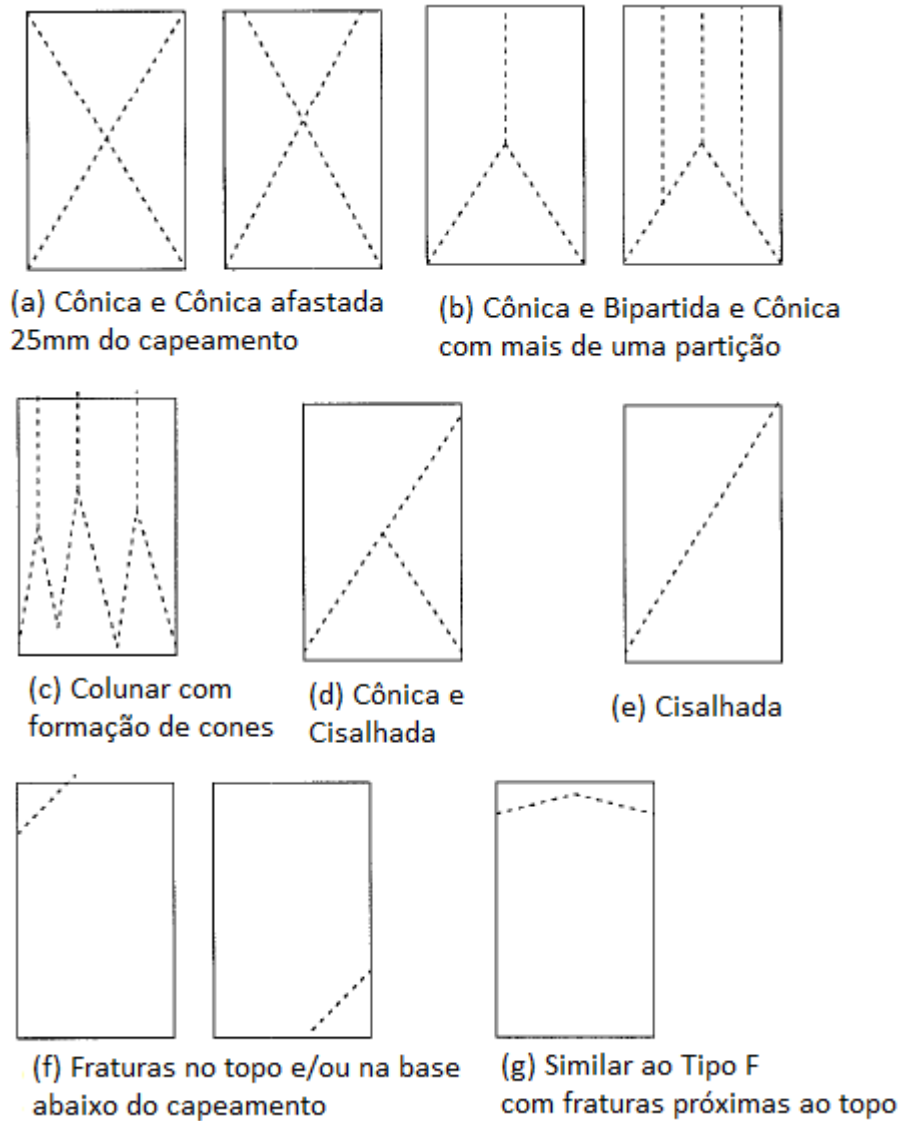
Condição de Preparo do Concreto	Desvio-Padrão
	[MPa]
A	4,0
B	5,5
C	7,0

Fonte: NBR ABNT 12655 (2006, p. 19)

Ainda segundo a NBR 12655 (2006), a Condição A diz respeito a todas as classes de resistência do concreto, em que os agregados, o cimento e a água são quantificados em massa (a água também pode ser medida em volume). As Condições B e C quantificam os agregados e a água em volume e o cimento em massa. A diferença entre ambos é que o primeiro abrange a classe de resistência entre 10 e 20MPa e o segundo, no limite de classe de 10 a 15MPa.

Segundo a NBR 5739 (2007), pode haver sete tipos diferentes de ruptura em ensaios de compressão realizados em laboratório. Conforme pode ser visualizado pelas retas tracejadas na Figura 8, o caminho percorrido pelas trincas advindas das tensões compressivas cria um tipo de rompimento característico. Além disso, os corpos-de-prova que sofreram fraturas próximas ao topo e à base (Figura 8f e 8g) devem ter seus valores obtidos descartados, uma vez que, tais valores de compressão não medem o comportamento do material como um todo e de forma uniformemente distribuída. Todos os outros tipos de rompimentos apresentados, mesmo que com distinções entre si, apresentam valores satisfatórios no que diz respeito ao seu ensaio.

Figura 8 - Tipos de Ruptura de Corpos-de-prova



Fonte: ABNT NBR 5739 (2007, p. 11)

#### 4.4.4 Porosidade Aparente e Absorção de Água

Em função da hidratação da pasta de cimento, ocorrem vazios na estrutura do concreto porque o cimento quando em contato com a água, no progresso dessa reação exotérmica é capaz de manter uma grande quantidade de água no seu interior. Há uma contínua perda de água em ambientes com uma menor umidade e esse efeito pode interferir diretamente características importantes da estrutura do concreto.

As características desejáveis de concretos em seu estado endurecido, então, não é somente influenciadas pelas proporções e formulações das quantidades de matérias-primas na confecção do concreto, mas também das propriedades da pasta de cimento e esta é diretamente dependente das nuances e relações desses constituintes microestruturais do próprio concreto (METHA; MONTERO, 2006).

Segundo a NBR 9778 (1987), é possível fazer um cálculo para determinação da porosidade aparente do concreto através da relação existente entre o volume dos poros permeáveis e o volume total do corpo-de-prova. Essa variável tem relação direta com a absorção de água pelo material e seus índices de vários na estrutura. A Equação 2 demonstra numericamente a expressão para o cálculo da porosidade:

$$PA(\%) = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \times 100 \quad (2)$$

Com relação à equação para determinação da porosidade aparente (PA),  $M_s$  diz respeito a massa do corpo-de-prova seca (em estufa);  $M_i$  refere-se à massa do corpo-de-prova imersa em água (e pesada com o mesmo dentro do próprio líquido) e,  $M_{sat}$  é a massa do corpo-de-prova saturado ou, em outras palavras, pesado após a submersão, mas retirado de dentro d'água.

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios para caracterização das matérias-primas, mais especificamente os rejeitos de louça sanitária e a brita 0, foram realizados no Laboratório de Ciência das Engenharias (britagem, análise granulométrica e porosidade aparente) e no Laboratório Multiusuário III (microscopia óptica), da Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL – MG) *campus* Poços de Caldas – MG, bem como no Laboratório de Materiais da Universidade Estadual de São Paulo (USP), *campus* de Lorena – SP (microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de raios-X por dispersão de energia (EDS)).

Para a confecção dos corpos-de-prova de concreto e o ensaio de estado fresco do mesmo, fez-se utilização do Laboratório de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica (PUC – MG), *campus* Poços de Caldas – MG. Os ensaios de compressão foram conduzidos na Construtora Etapa, situada na cidade de Poços de Caldas – MG e no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Estado de Minas Gerais, *campus* Passos - MG. Finalmente, fez-se uso novamente das instalações dos Laboratórios de Ciência das Engenharias e Multiusuário III da UNIFAL – Poços de Caldas, bem como do Laboratório de Materiais da USP – Lorena para caracterização dos corpos-de-prova rompidos.

### 5.1 MATERIAIS

São apresentadas as matérias-primas utilizadas nessa pesquisa para a fabricação dos concretos a serem analisados e estudados. Para seleção dos materiais critérios de produção de um concreto padrão foram seguidos, ou seja, o mais comumente utilizado no setor de construção civil:

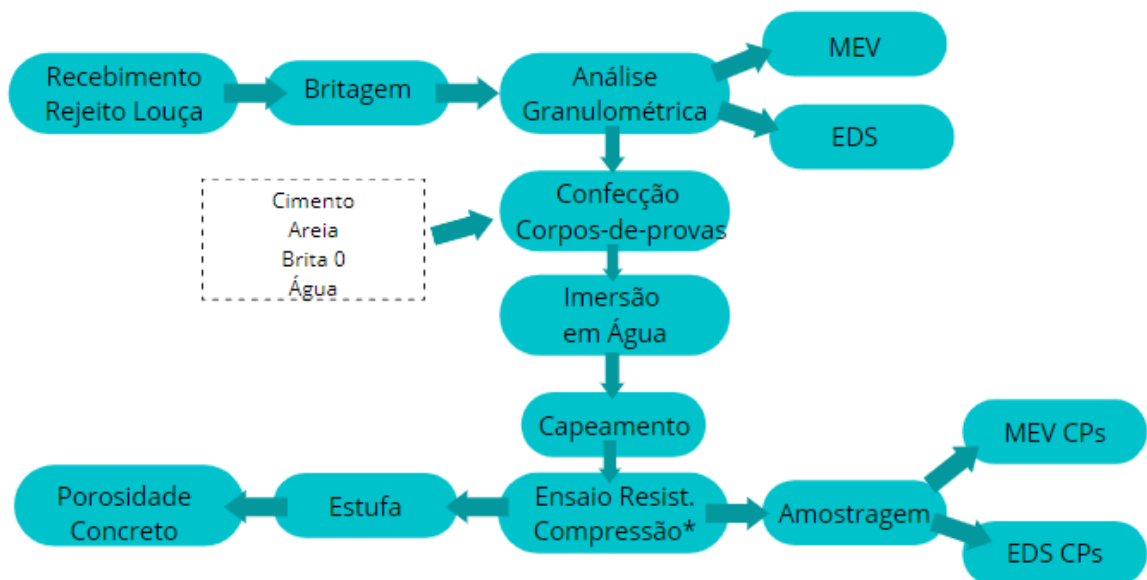
- Cimento *Portland* tipo CP II – E – 32 do fabricante Holcim, embalagem de 50kg;
- Areia grossa comercial, como agregado miúdo, da empresa Gato Neves Materiais para Construção, situada em Poços de Caldas - MG, retirada da região do rio Piracicaba;

- Brita 0 comercial ou pedrisco (dimensão característico entre 4,8mm e 9,5mm), como agregado graúdo, da empresa Gato Neves Materiais para Construção, situada em Poços de Caldas - MG;
- Água da rede pública municipal, obtida no Laboratório de Engenharia Civil da PUC – MG;
- Resíduo de louça sanitária reprovadas nos processos de controle de qualidade e doadas para estudo de viabilidade em concretos pela empresa Togni S/A Materiais Refratários, situada em Poços de Caldas – MG. Este resíduo é denominado *scrap cerâmico* pela própria empresa.

## 5.2 MÉTODOS

A metodologia utilizada foi simplificada, para se ter uma visão global de todo o processo e transformada em um fluxograma, conforme pode ser visto na Figura 9. Todos os processos de análise em que tanto as matérias-primas quanto o concreto em sua forma endurecida, estão discriminados de forma visual no fluxograma.

Figura 9 - Fluxograma dos Métodos de Análise Utilizados



Fonte: Do Autor, 2021



## 5.2.1 Caracterização das Matérias-Primas

### 5.2.1.1 Recebimento e Britagem

A louça sanitária, matéria-prima utilizada como substituinte à brita no concreto, foi doada em cinco pacotes de aproximadamente 30 kg. O material foi disposto em uma lona para primeira análise visual do mesmo, conforme é ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Recebimento do rejeito de louça sanitária



Fonte: Do Autor, 2021

(a) Bags com os resíduos devidamente lacrados

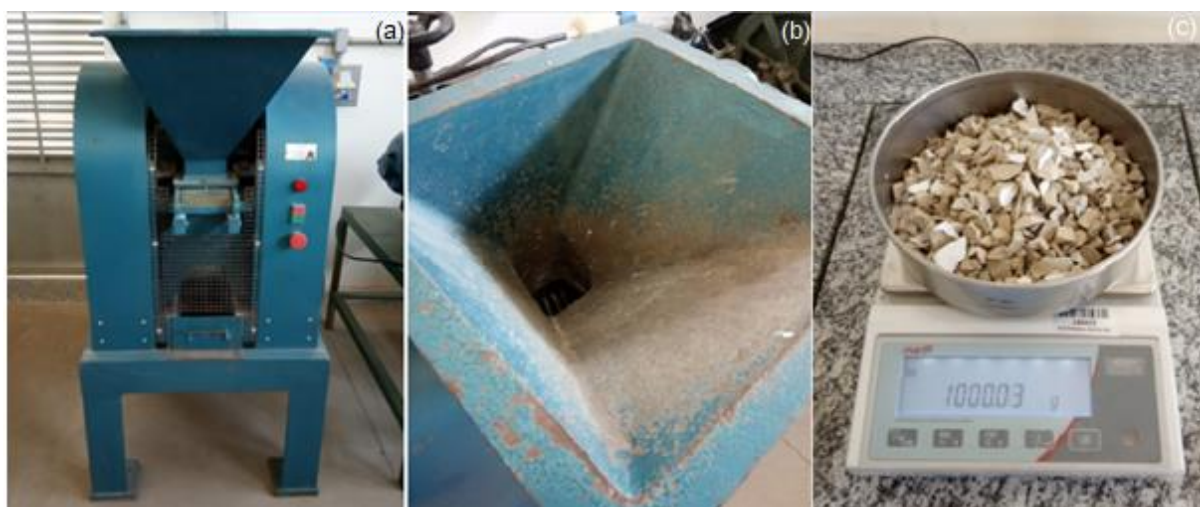
(b) Louça sanitária com dimensões e formatos diversos

É notória a aleatoriedade de dimensões do resíduo em questão, pelo fato do mesmo ser advindo diretamente do descarte da indústria, com peças de vários tipos de formatos, desde os mais compridos até alguns pontiagudos. Por esse motivo, a louça sanitária passou por uma operação unitária para sua cominuição. O processo em questão foi a britagem das peças e esta foi realizada no Laboratório de Ciência das Engenharias da UNIFAL - MG, *campus* Poços de Caldas – MG, até uma dimensão próxima à da brita 0 (tamanho médio entre 9,5mm e 4,8mm – DMC 9,5mm) em britador de mandíbulas Pavitest, modelo I4198, do fabricante Contenco Indústria e Comércio LTDA. O britador de mandíbulas possui um bocal com tamanho reduzido e, por esse motivo, algumas peças dos resíduos tiveram que serem

quebradas manualmente com o auxílio de picaretas e machados para daí ser conduzida ao equipamento.

Pode ser visto na Figura 11 o equipamento utilizado para se chegar à dimensão de interesse bem como a louça sanitária em seu tamanho satisfatório para a fabricação do concreto, ou seja, em torno de 8mm.

Figura 11 - Britagem do rejeito de louça sanitária



Fonte: Do Autor, 2021

- (a) Britador de mandíbulas Pavitest
- (b) Bocal de alimentação do britador
- (c) Dimensão média da louça sanitária britada

### 5.2.1.2 Análise Granulométrica

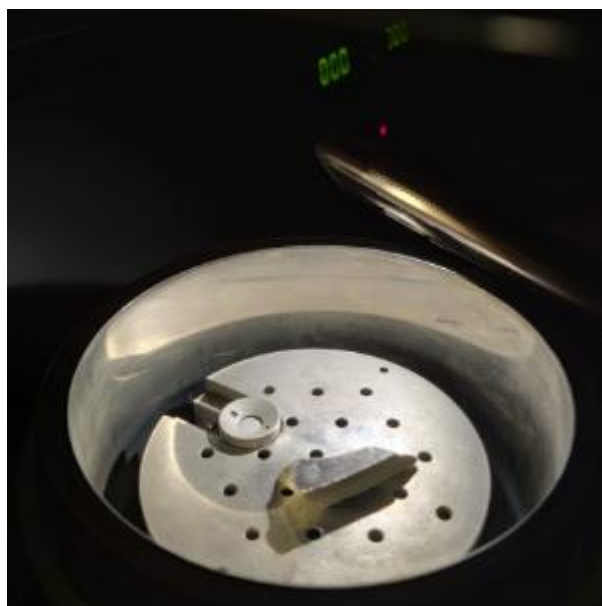
Para se ter mais informações em relação às matérias-primas, foram realizadas as análises granulométricas por peneiramento tanto para a louça sanitária britada quanto da brita 0, fazendo-se uso tanto das peneiras de abertura de 12,5mm à 0,15mm (série normal e intermediária). O ensaio foi realizado no Laboratório de Ciência das Engenharias da UNIFAL – MG, por três vezes com aproximadamente 1 kg de material recolhidos sem separação pré-determinada, a fim de se ter uma amostragem mais precisa e a curva granulométrica característica foi traçada de acordo com a norma ABNT NBR 248:2011 “Agregados: determinação da composição granulométrica”.

### 5.2.1.3 Microscopia Eletrônica de Varredura e Análise de EDS

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) bem como a espectroscopia por dispersão de energia (EDS) foram realizadas no microscópio HITACHI modelo TM 3000 com EDS acoplado, pertencente ao Departamento de Materiais da USP, em Lorena - SP. As micrografias foram obtidas tanto na região do vidro quanto na área interna da louça sanitária pelo modo de detecção de elétrons retroespalhados.

Para a realização da análise, foi feita a metalização da superfície da amostra na Metalizadora “Sputter Coater” da marca EMITECH, referência K550x, de pulverização catódica, com o intuito de formar uma camada fina nanométrica de prata que auxiliasse na condução de elétrons (recobrimento da superfície) e evitar o carregamento no MEV, uma vez que, o resíduo de louça sanitária analisado é uma cerâmica com baixa condução elétrica (Figura 12)

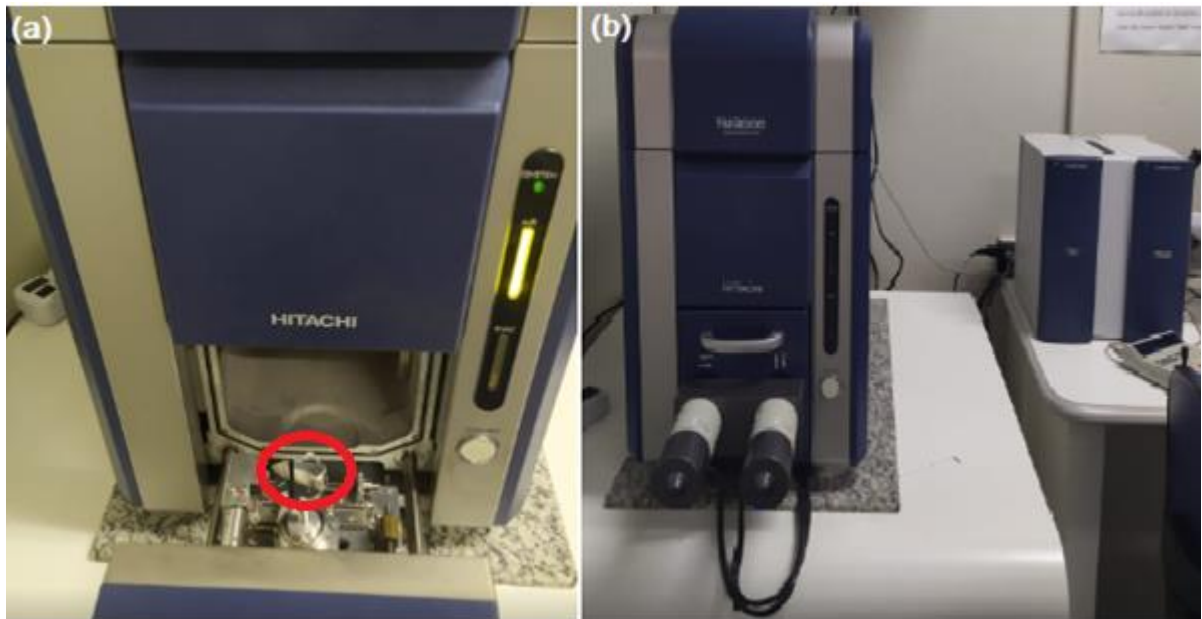
Figura 12 - Metalização da Superfície do Vidrado de Rejeito



Fonte: Do Autor, 2021

Além da metalização de superfície, não houve a necessidade de nenhum corte ou preparação da amostra do rejeito de louça sanitária antes que o mesmo fosse levado ao microscópio eletrônico de varredura, ou seja, ele foi posicionado da mesma forma desde quando ocorreu sua cominuição, conforme é demonstrado na Figura 13(a).

Figura 13 - Ensaio de MEV e EDS



Fonte: Do Autor, 2021

(a) Rejeito de Louça Sanitária Metalizada Posicionada no MEV

(b) MEV HITACHI com EDS Acoplado

## 5.2.2 Caracterização dos Concretos

### 5.2.2.1 Formulação dos Concretos Produzidos

Foram produzidas cinco diferentes formulações de concreto: uma denominada concreto de referência (CR), que possui em sua constituição a brita 0, para fins de comparação, uma vez que esta é a composição tradicional do concreto. Todas as outras formulações envolvem a substituição de rejeitos de louça sanitária cominuída, já em tamanho adequado, à brita 0, nas proporções substituinte de 25, 50, 75 e 100%, em massa, conforme descrito na Tabela 8. Foram produzidos 75 corpos de provas, sendo que para cada idade - 3, 7 e 28 dias desde sua confecção - foram produzidos cinco de cada formulação.

Tabela 8 – Identificação das Formulações de Concreto

Nomenclatura	Formulação
CR	Concreto de Referência (100% de brita 0)
C25	Concreto com 25% de substituição de louça sanitária
C50	Concreto com 50% de substituição de louça sanitária
C75	Concreto com 75% de substituição de louça sanitária
C100	Concreto com 100% de substituição de louça sanitária

Fonte: Do Autor, 2021

### 5.2.2.2 Confeção dos Corpos-de-prova em Laboratório

O traço teórico, termo técnico utilizado comumente no setor de construção civil, utilizado para a produção de concreto com todas as características específicas e necessárias, foi desenvolvido de acordo com padrão utilizado para confecção de concreto em trabalhos anteriores e seguindo uma lógica de acompanhamento no programa (ALMEIDA, 2019).

A formulação padrão (traço), seguida na engenharia civil, faz uso de uma sequência que relaciona a quantidade de cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água. Para este trabalho, o traço foi de 1,0:1,5:1,22:0,42, ou seja, para cada 1 kg de cimento utilizado na confecção do concreto, utilizou-se 1,5kg de agregado miúdo – no caso a areia média – 1,22 kg de agregado graúdo, este variando de acordo com a substituição de brita pelo rejeito de louça sanitária e, finalmente, 0,42kg de água (este valor é advindo da relação a/c), como visto na Tabela 9.

O concreto foi formulado de acordo com o desenvolvimento do padrão utilizado na construção civil, seguindo desde o de referência (CR) até com total substituição por rejeito de louça sanitária (C100) (ALMEIDA, 2017; GRILLO, 2014).

Tabela 9 – Quantidade, em massa, dos componentes do concreto

Quantitativo, em massa [kg]					
Componentes	CR	C25	C50	C75	C100
Cimento	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Areia	24,47	24,47	24,47	24,47	24,47
Brita	30,04	22,53	15,02	7,51	0,00
Louça Sanitária	0,00	7,51	15,02	22,53	30,04
Água	8,34	8,34	8,34	8,34	8,34

Fonte: Do Autor, 2021

Todo o trabalho de produção de corpos-de-prova foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil da PUC - MG, *campus* Poços de Caldas. A massa do concreto foi fabricada de forma convencional, segundo procedimento especificado na ABNT NBR 12655:2006 “Concreto de Cimento *Portland*: preparo, controle e recebimento - Procedimento”, colocando as matérias-primas a uma betoneira 400 litros CSM 110/220V, tomando-se o cuidado de primeiramente adicionar o cimento e o agregado graúdo e posteriormente, o agregado miúdo, pelo fato da areia grossa possuir nesse estado uma porcentagem de água incorporada, o que poderia causar problemas na fabricação do concreto.

Com todos os elementos sólidos já posicionados dentro da betoneira, fez-se uma homogeneização deles por aproximadamente 1 minuto, a fim de que toda massa sólida apresente uma mistura satisfatória. Passado esse tempo inicial, com a betoneira ligada, aos poucos deve ser acrescentada a água para a formação da massa de concreto homogênea e, finalizado esse processo, aguardar mais 3 minutos para que o produto formado tenha uma mistura bem acabada e homogênea (Figura 14).

Figura 14 - Confeção do concreto em betoneira



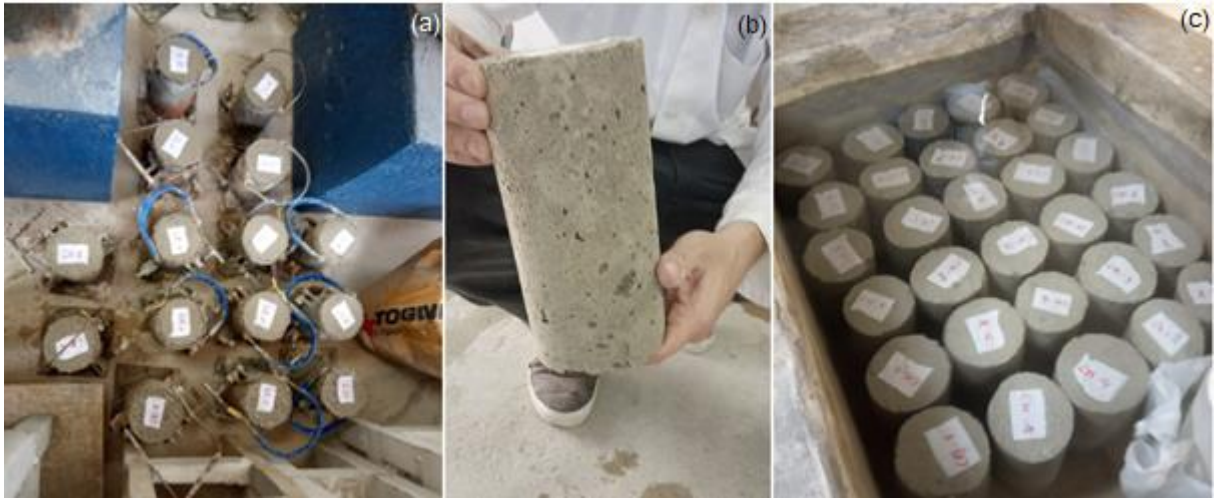
Fonte: Do Autor, 2021

(a) Materiais sólidos acrescentados na betoneira

(b) Massa de concreto recém fabricado

Após a homogeneização, a massa foi colocada em um molde padrão para confecção de corpos-de-prova (dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura), conforme especificado na norma ABNT NBR 5738: 2015 “Concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos de prova”, tomando-se o cuidado de fazer seu adensamento para que o mesmo não fique segregado em nenhuma região. Finalizada a moldagem de todos os corpos-de-prova, os mesmos foram posicionados em um espaço reservado e deixados intactos – dentro do molde – por 24 horas para início do processo de cura e, após esse período, foram desenformados e submersos em um tanque contendo água à temperatura ambiente para cura úmida (Figura 15).

Figura 15 - Corpos-de-prova Confeccionados



Fonte: Do Autor, 2021

- (a) Moldados e identificados
- (b) Exemplar finalizado
- (c) Imersos em água

### 5.2.2.3 Slump Test

Simultaneamente à moldagem dos corpos-de-prova, foi realizado o teste que é relacionado ao concreto em seu estado fresco para análise quanto à sua trabalhabilidade bem como segregação entre os componentes da massa acabada. O *slump test*, também chamado de abatimento do tronco de cone, foi realizado seguindo-se a regulamentação da ABNT NBR NM 67: 1998 “Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone”. Além disso, após realização do ensaio anterior, foi possível avaliar visualmente se houve segregação entre a massa de concreto e os agregados, bem como se houve exsudação, ou seja, se a massa apresentou escorrimento de água em suas bordas.

Para se realizar o ensaio, posicionou-se uma chapa de ferro e em cima da mesma, colocou-se o tronco de cone do teste. Feito isso, pisou-se no suporte em ambos os lados do tronco de cone, a fim de se garantir a fixação desse elemento junto à chapa de ferro e nenhuma quantidade de concreto vazasse por baixo. A massa de concreto fresco foi então adicionada e a cada um terço preenchido do tronco, vinte e cinco golpes circulares foram proferidos ao concreto por meio de um



bastão cilíndrico de ferro. Esse processo foi realizado até o preenchimento total do elemento cônico e o excesso da massa na superfície foi retirado.

Feito isso, com o elemento todo preenchido com a massa de concreto fresco, primeiramente, retirou-se os pés do suporte e então o tronco de cone foi retirado verticalmente. Por gravidade, o concreto sofre seu abatimento, sendo este medido com uma régua em comparação do nível da chapa de metal até o topo do tronco de cone invertido, conforme é demonstrado na Figura 16, no teste realizado para a formulação com 100% de substituinte (C100).

Figura 16 - *Slump Test* realizado



Fonte: Do Autor, 2021

(a) Concreto C50

(b) Concreto C100

#### 5.2.2.4 Retífica e Ensaio de Resistência à Compressão

Ao se passar cada período de interesse de imersão em água para cura (3, 7 e 28 dias), os lotes de corpos de provas eram levados para as instalações da Construtora Etapa no período para realização dos ensaios de resistência à compressão. Entretanto, há uma etapa anterior muito importante que é a retífica dos corpos de prova, que também ocorreu na construtora. Para isso, os corpos de prova foram colocados na Retificadora Automática Horizontal para Corpos de Prova Full,

marca Setor, motor 3HP (Figura 17) a fim de se produzir uma seção transversal uniforme em ambas as bases deles.

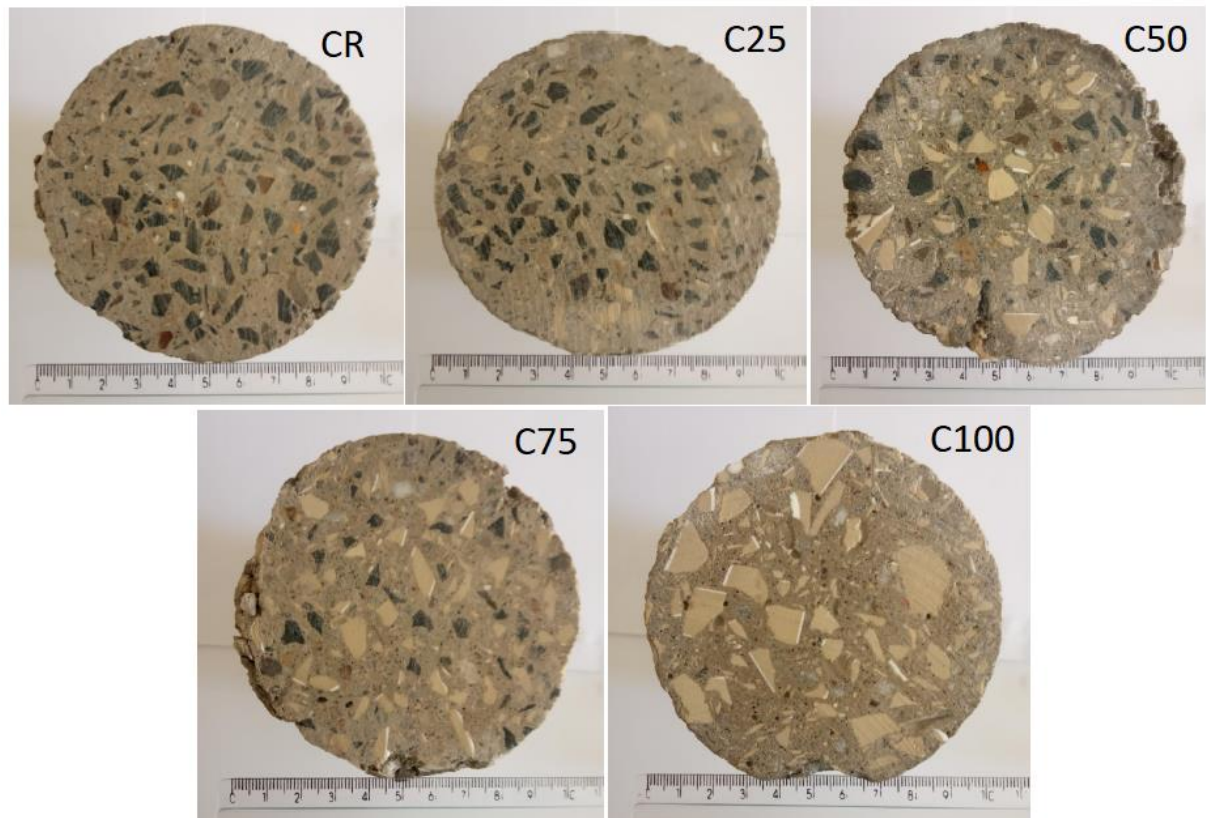
Figura 17 - Corpo-de-prova sendo retificado



Fonte: Do Autor, 2021

Esta ação é indispensável para que os resultados expressos na máquina de ensaios mecânicos sejam precisos, uma vez que, as forças de compressão exercida em ambos os lados do corpo de prova têm que ser iguais. A Figura 18 indica as seções transversais de todos os exemplares de concreto produzidos – de referência, C25, C50, C75 e C100 - e suas características na estrutura interna do concreto.

Figura 18 - Seções transversais das formulações de concreto



Fonte: Do Autor, 2021

Finalmente, foram posicionados os corpos-de-prova na Prensa Hidráulica Manual Zeloso com Manômetro, suportando carga de 1000 toneladas força (tf) e subdivisões de 200kgf, conforme é demonstrado na Figura 19 e, por meio de uma alavanca, transmitindo as forças de compressão aos corpos-de-prova até seu rompimento. A resistência à compressão ( $f_c$ ) de cada um dos corpos de prova foi determinada pela razão entre a força de compressão máxima resistida pelo corpo de prova ( $F_c$ ) e a área da seção transversal do corpo de prova de compressão (A), demonstrada na Equação 2.

$$f_c = \frac{F_c}{A} \quad (3)$$

Figura 19 - Rompimento de corpo-de-prova por compressão em Prensa Hidráulica Manual



Fonte: Do Autor, 2021

Os corpos-de-prova de cada período de análise (3, 7 e 28 dias) e formulações produzidas foram ensaiados seguindo-se a norma ABNT NBR 5739: 2007 “Concreto: ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos”.

#### 5.2.2.5 Análise do Caminho Crítico de Ruptura

Mesmo com os valores de resistência mecânica já obtidos pelo ensaio de compressão, os corpos-de-prova tiveram uma ruptura interna. Por esse motivo, três exemplares de cada formulação do período de 28 dias – todos os outros períodos teriam já atingido a cura total na mesma data - foram transportados ao Laboratório de Engenharia Civil da UEMG, em Passos – MG, para que fossem ensaiados na máquina de compressão Forney, modelo FT-40-DR, tipo eletro-hidráulica, com capacidade 100.000kgf com faixas nominais de 2.000 a 100.000kgf (Figura 20).

Figura 20 - Rompimento dos Corpos-de-prova



Fonte: Do Autor, 2021

(a) Máquina de Compressão

(b) Corpo-de-prova sendo rompido

Feito novamente o ensaio de compressão, desta vez com a máquina eletrônica, os corpos-de-prova tiveram a ruptura total e assim, foi revelado o caminho percorrido pelos esforços de compressão criados pelo ensaio. Deve-se destacar que essa foi uma etapa de extrema importância, uma vez que, todo entendimento da formação da trinca passa pelo estudo do interior dos exemplares em todos os traços do concreto confeccionado.

#### 5.2.2.6 Porosidade Aparente dos Corpos de Prova

Com os corpos-de-prova rompidos de uma forma completa, ou seja, com as trincas dividindo-os em dois e evidenciando sua porção interna, foi possível então fazer o ensaio de absorção de água pelo concreto nas instalações do Laboratório de

Ciências das Engenharia da UNIFAL – MG, no *campus* de Poços de Caldas, e com isso, analisar as porosidades de cada formulação.

O teste foi feito primeiramente, posicionando esses corpos-de-prova pós-ruptura no interior da estufa com circulação e renovação de ar SL102/221 a temperatura de 100°C, por um período de 24 horas, conforme é mostrado na Figura 21, com o intuito de retirar toda água residual que poderia estar presente no interior desse material.

Figura 21 - Corpos-de-prova Rompidos Posicionados no Interior da Estufa



Fonte: Do Autor, 2021

Após esse período, tomou-se a medida de sua massa por meio de balança digital comercial, marca B-MAX, modelo BM-A08 e precisão de 5g. Como esse equipamento possui como característica a medição do peso alçando o material de interesse, foi necessário amarrar uma linha de barbante ao redor do corpo-de-prova.

Tomado os valores da massa seca dos corpos-de-prova, os mesmos foram imersos em água à temperatura ambiente, também por um período de 24 horas. Se passado esse tempo, no dia posterior, foi primeiramente medida sua massa imersa em água, como pode ser visto na Figura 22(a). Finalmente, sua massa saturada (úmido, mas fora do contato com a água) foi medida com o auxílio da balança digital B-MAX, conforme Figura 22(b).

Figura 22 - Ensaio de Porosidade Aparente



Fonte: Do Autor, 2021

(a) Pesagem do Corpo-de-prova Submerso em Água;

(b) Pesagem do Corpo-de-prova Saturado

### 5.2.2. Microscopia nos Corpos de Prova

A fim de se ter uma imagem mais aproximada para analisar a ancoragem dos agregados graúdos na matriz de cimento foi feito um estudo microscópico nas amostras das formulações do concreto. Anteriormente a isso, foi necessário serrar os corpos-de-prova em amostras de tamanho médio de 4cm de comprimento por 1dm de largura (e espessura de 1,5cm).

Com as amostras em um tamanho adequado, foi feita a análise de microscopia óptica, no Laboratório Multiusuário III, da UNIFAL, *campus* Poços de Caldas – MG, posicionando-a no Microscópio Óptico Binocular Carl Zeiss, Axio Scope Scan 5 (Figura 23) e tomando as imagens por meio de software instalado em computador.

Figura 23 - Amostra de Concreto Posicionado no Microscópio Óptico



Fonte: Do Autor, 2021

Para uma análise ainda mais assertiva, da mesma forma que realizado com o rejeito de louça sanitária, fez-se a microscopia eletrônica de varredura (MEV) e a espectroscopia por dispersão de energia (EDS), no Laboratório de Materiais no Departamento de Materiais da USP, em Lorena – SP.

Uma vez que as amostras de concreto são compósitos cerâmicos, foi necessário que fizesse uma metalização em sua superfície pelo Metalizadora “Sputter Coater” da marca EMITECH, referência K550x, de pulverização catódica, a fim de não sobrecarregar o aparelho de microscopia eletrônica (Figura 24). Essa



sobrecarga é aliviada pelo fato dessa metalização produzir uma fina camada em que os elétrons tenham condução.

Figura 24 - Metalização das Amostras de Concreto



Fonte: Do Autor, 2021

Já com as amostras todas metalizadas e em tamanho correto para análise, foram colocadas uma a uma no microscópio HITACHI modelo TM 3000 com EDS acoplado para se conseguir as imagens e os resultados desse equipamento, conforme é mostrado na Figura 25.

Figura 25 - Amostra de Concreto Posicionada para Análise no Microscópio Eletrônico de Varredura



Fonte: Do Autor, 2021

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

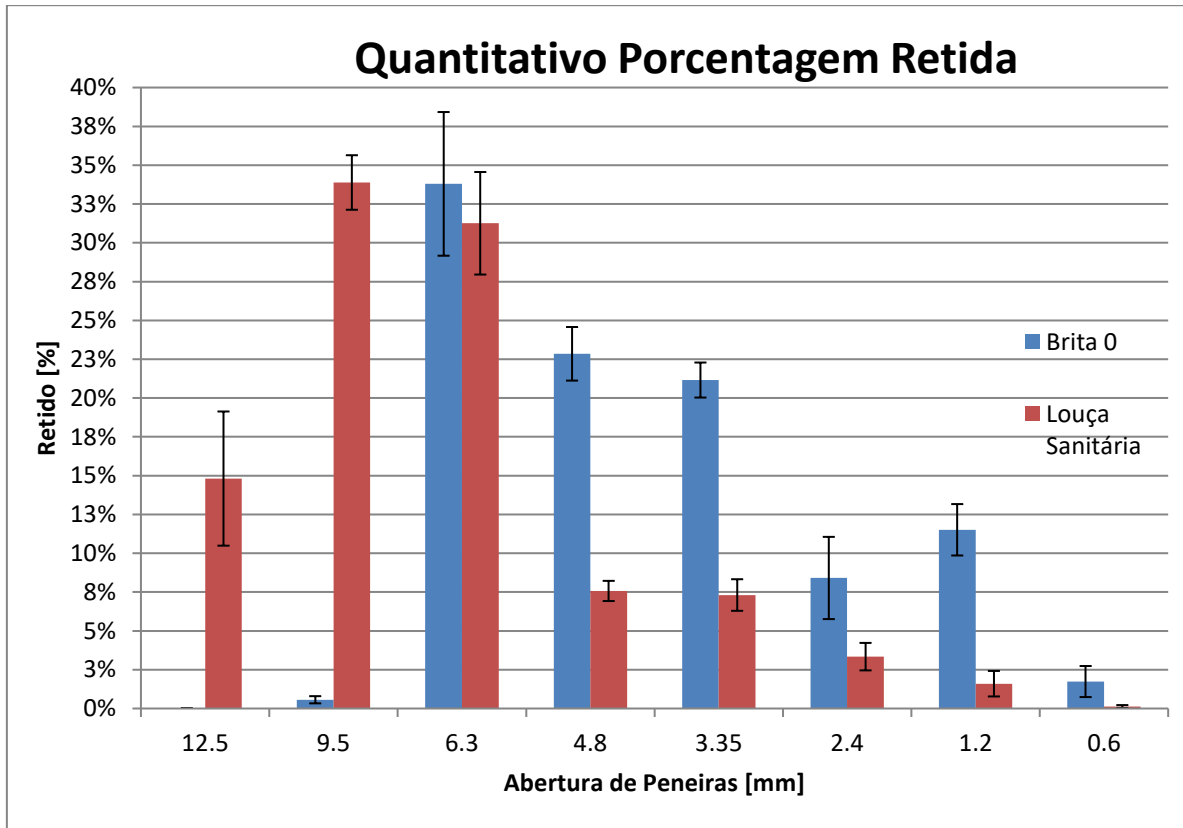
### 6.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DAS MATÉRIAS-PRIMAS

Com o intuito de ter um entendimento em relação a distribuição de tamanhos das matérias-primas utilizadas como agregado graúdo no concreto produzido, fez-se o peneiramento manual tanto da brita 0 como da louça sanitária.

Analisando-se a Figura 26 e, fazendo-se uma comparação entre o agregado comum utilizado em concretos – no caso a brita 0 – e a louça sanitária cominuída, é possível extrair que a composição dimensional que possui a relação mais estreita entre esses dois agregados é a peneira de 6,3 mm. Entretanto, é notório que a louça sanitária possui uma maior granulometria, em comparação com a brita, uma vez que, é na peneira de abertura 9,5 mm que se apresenta sua maior quantidade de material retido na análise.

Outro ponto a ser destacado é que a brita 0 possui uma quantidade considerável de material retido tanto na peneira de abertura 4,8 mm quanto na de 3,35 mm, enquanto a louça sanitária já possui menos de 10%. Finalmente, é possível analisar que os desvios-padrão para a brita 0 nas peneiras 6,3 mm e 2,4 mm e, para a louça sanitária nas peneiras 12,5 mm e 6,3 mm foram os maiores de toda a análise, demonstrando que houve uma discrepância na média das amostras superior a todos os outros intervalos, entretanto o mesmo não foi maior que 4%, que pode ser considerável satisfatório para um ensaio desse gênero.

Figura 26 - Gráfico Comparativo de Barras da Análise Granulométrica Quantitativa da Brita 0 e do Rejeito de Louça Sanitária



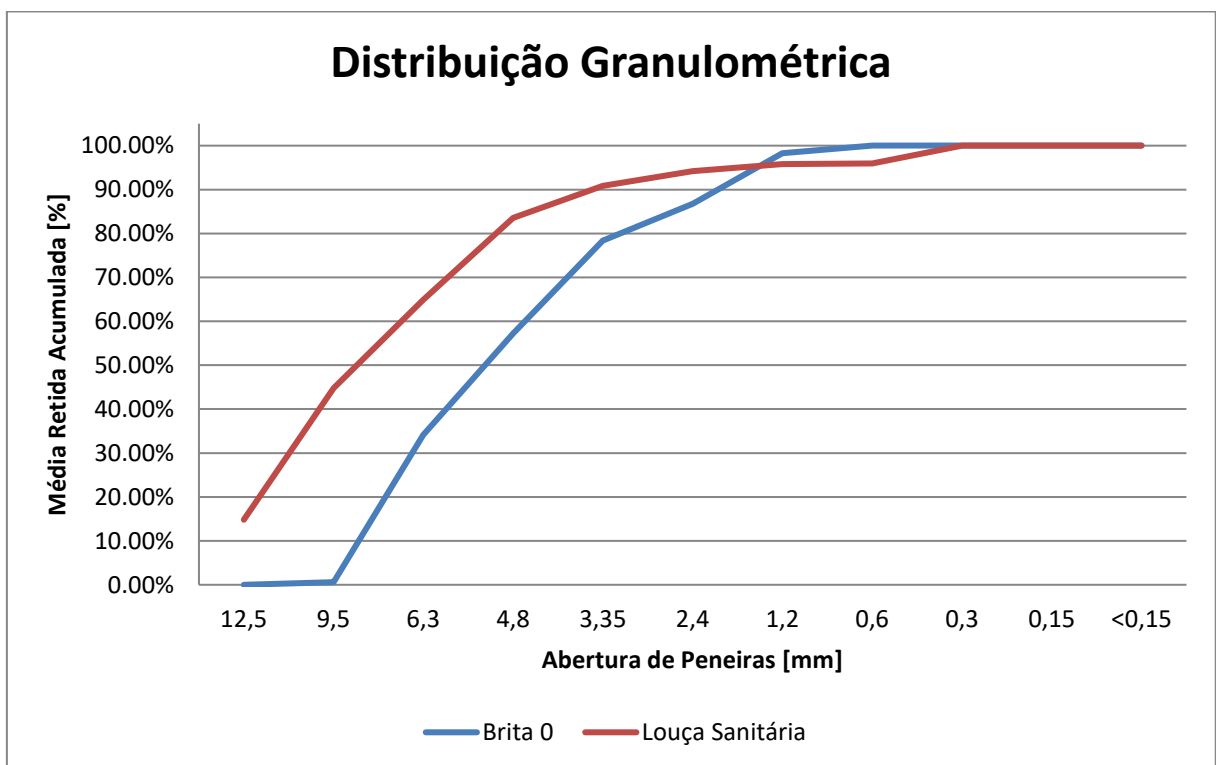
Fonte: Do Autor, 2021

A partir dos dados obtidos e a realização das médias dos ensaios, foi possível traçar uma curva de distribuição granulométrica tanto para a brita 0 quanto para seu substituinte, a louça sanitária (Figura 27). Os pontos relevantes que devem ser destacados é que a curva vermelha, relativa ao rejeito de louça sanitária, desde seu início já está acima da curva azul (brita 0), pelo fato da mesma possuir a maior dimensão característica.

Além disso, outro ponto de interesse é que a curva da brita 0 ultrapassa a curva da louça sanitária no ponto referente a peneira de abertura 1,2 mm e isso é explicado pelo fato da brita possuir muita sujeira atrelada – por ser uma brita comercial e não possuir uma armazenagem com muito rigor – e a mesma possuir vários tamanhos, enquanto a louça sanitária já cominuída, apresentou somente o pó advindo da britagem em si.

Como implicação dessa distribuição granulométrica dos dois agregados graúdos, comparando-se entre si, não houve nenhum aspecto em que a resistência mecânica ensaiada mostrou um resultado maior – especificamente pela dimensão tanto da brita 0 quanto do rejeito de louça sanitária – e esse aspecto será mais explicado no tópico relativo à resistência à compressão.

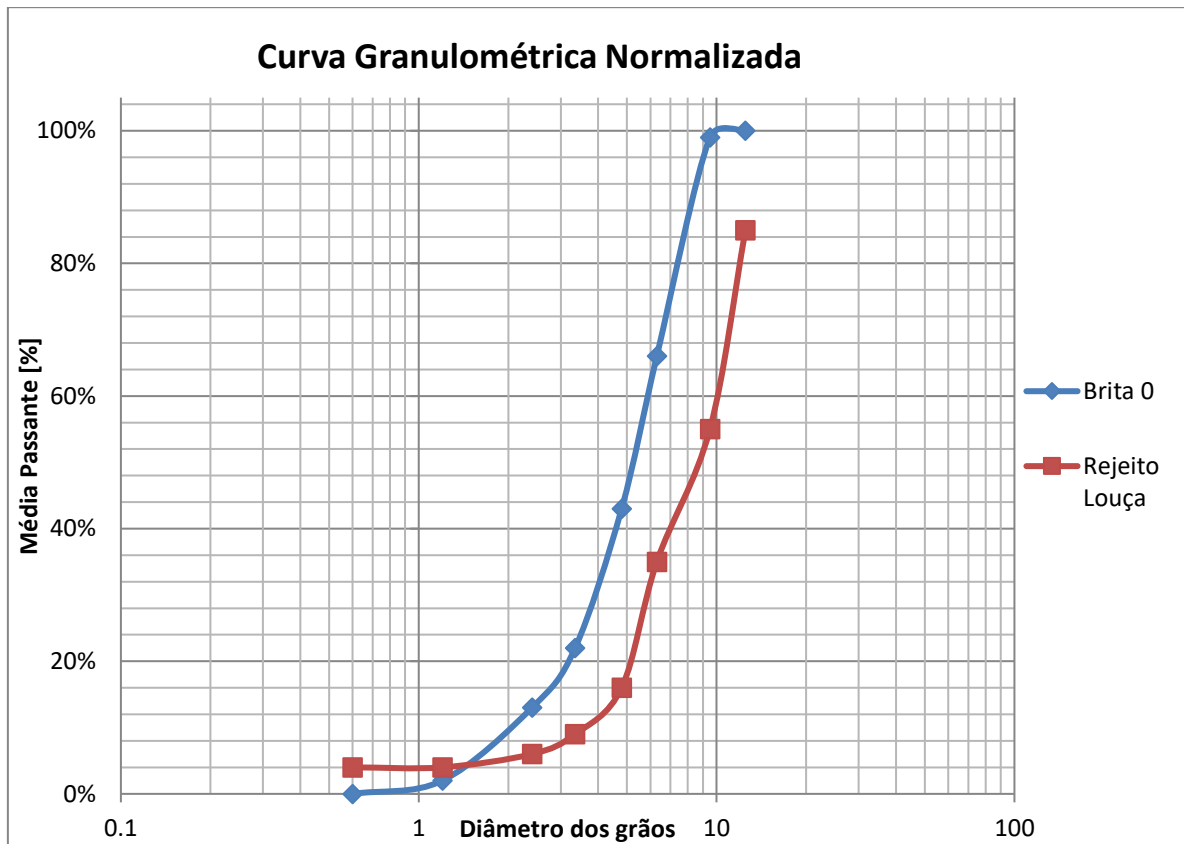
Figura 27 - Curva de Distribuição Granulométrica Comparativa da Brita 0 e do Rejeito de Louça Sanitária



Fonte: Do Autor, 2021

Partindo-se desses resultados da separação granulométrica do rejeito de louça sanitária e da brita 0, fez a sua normalização para escala logarítmica (gráfico mais usual para esse tipo de análise), conforme demonstrado na Figura 28.

Figura 28 - Curva de Distribuição Granulométrica Normalizada da Brita 0 e do Rejeito de Louça Sanitária



Fonte: Do Autor, 2021

Da mesma forma que a análise anterior, também é possível perceber que a quantidade passante de brita 0 é maior nas primeiras peneiras (de maior abertura) – por sua menor dimensão característica – e, nas últimas da série em questão, também tem mais retidos em comparação com o rejeito de louça sanitária (que em todo ensaio de granulometria se mostrou maior comparativamente).

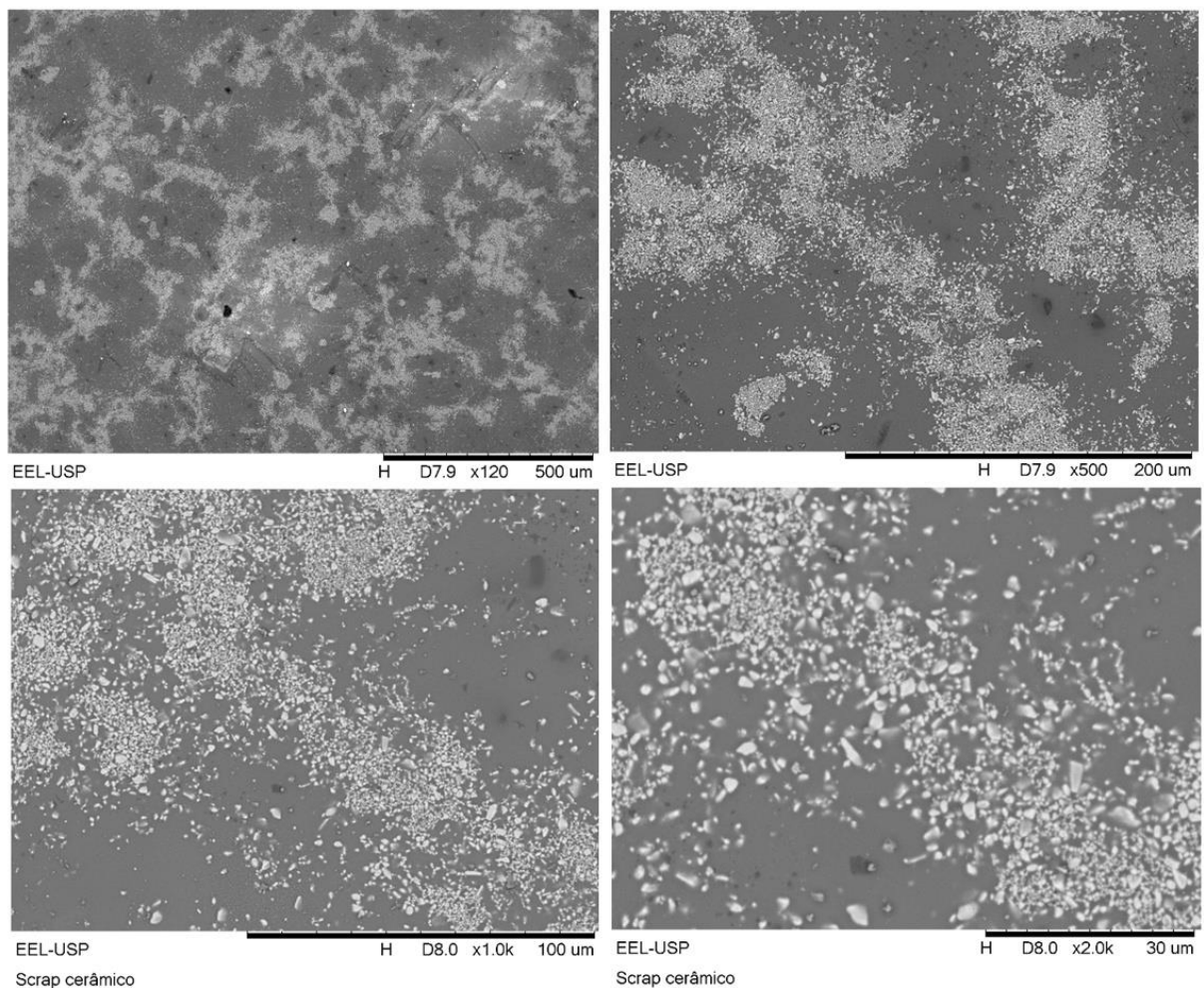
## 6.2 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA E ESPECTROSCOPIA DE RAIOS-X POR DISPERSÃO EM ENERGIA DO REJEITO DE LOUÇA SANITÁRIA

### 6.2.1 Região do Esmalte (Vidrado)

Com a microscopia eletrônica de varredura foi possível verificar a disposição de uma camada aparentemente homogênea, de coloração mais escura, como o

fundo da imagem, bem como uma grande quantidade de pequenos elementos, com uma coloração cinza claro, posicionados de forma levemente organizados e mais próximos entre si. À medida que o aumento da micrografia foi sendo feito, foi possível detectar que partículas não possuíam uma forma bem definida, sendo que alguns apresentavam aspecto pontiagudo (Figura 29).

Figura 29 - Micrografias obtidas por MEV do Vidrado. Imagens Obtidas por Elétrons Retroespalhados.

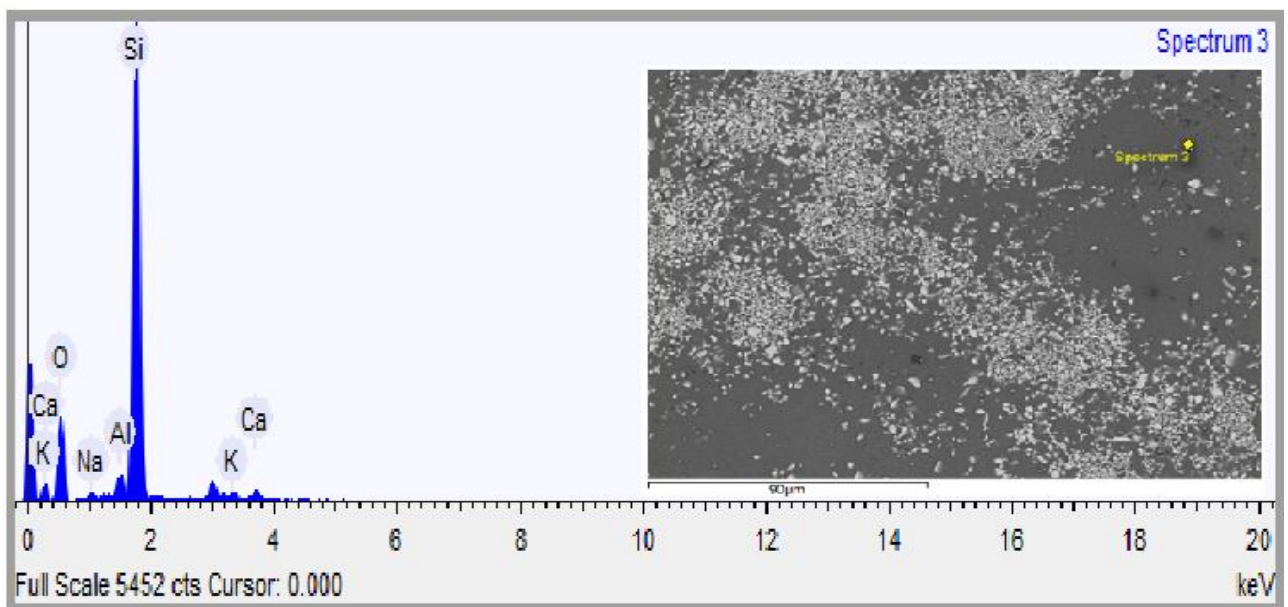


Fonte: Do Autor, 2021

- (a) Aumento de 120x
- (b) Aumento de 500x
- (c) Aumento de 1000x
- (d) Aumento de 2000x

Já com a utilização de Espectroscopia de Raios-X por Dispersão de Energia (EDS), fez-se também a análise qualitativa dos elementos presentes na área capturada pelas imagens, analisando neste caso, dois pontos da estrutura – um posicionado nos fragmentos pequenos e outro no fundo escuro. Obtiveram-se dois distintos espectros de energia (Figura 29 e 30), sendo que, cada pico encontrado representa um elemento presente em cada análise. Primeiramente, conforme relata a Figura 30, relativo aos picos de elementos para o fundo da micrografia no ponto específico de cor amarela e a Tabela 10, os quantitativos dos elementos encontrados pela análise, são apresentados.

Figura 30 - EDS Vidrado (fundo Escuro), mostrando os picos principais relativos aos elementos encontrados e a região onde a análise foi obtida.



Fonte: Do Autor, 2021.



Tabela 10 – Análise quantitativa EDS - vidro (Fundo Escuro)

Elemento	Peso [%]	$\sigma$ Peso [%]	Composto [%]	Fórmula
Sódio	0,607	0,089	0,818	$Na_2O$
Alumínio	1,513	0,094	2,858	$Al_2O_3$
Silício	43,170	0,258	92,354	$SiO_2$
Potássio	0,924	0,120	1,113	$K_2O$
Cálcio	2,042	0,129	2,857	$CaO$
Oxigênio	51,744	0,267		

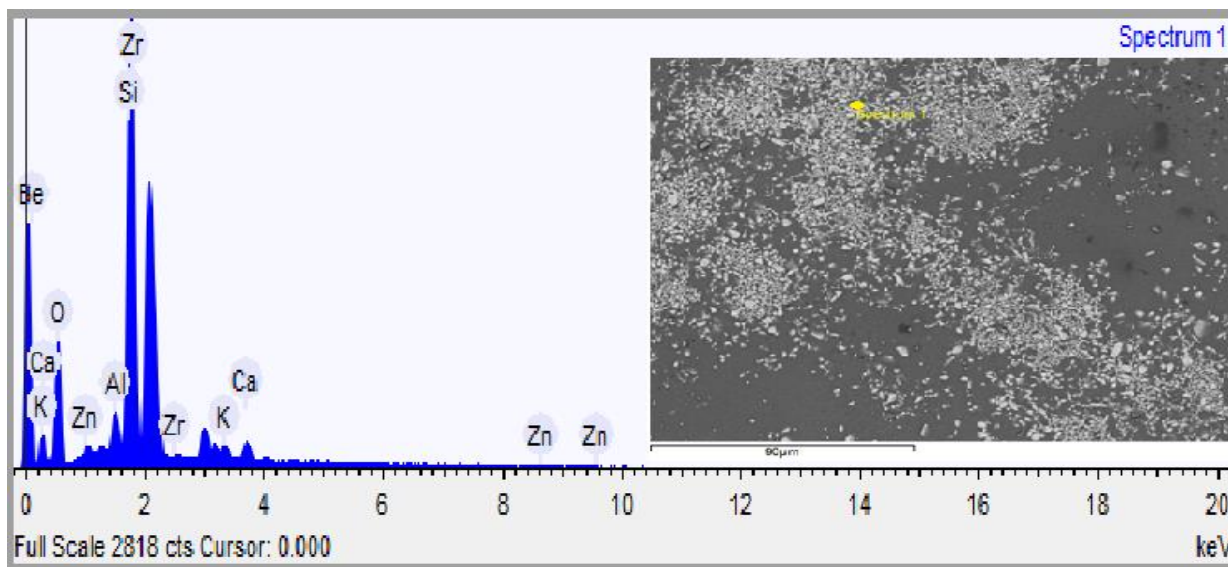
Fonte: Do Autor, 2021

É possível destacar que a região estudada, em específico, apresenta praticamente sílica, ou óxido de silício, uma vez que, de acordo com a Tabela 10, este composto apresenta mais de 92% de presença. Este é um resultado de interesse, uma vez que o silício é um indício de material pozolâmico no concreto e este, pode auxiliar nas propriedades finais do material produzido.

Todos os outros elementos, se comparados ao peso do oxigênio e do silício, podem ser considerados desprezíveis: o sódio com 0,6%, o potássio com 0,9% e o cálcio com 2%. Todos esses elementos são inerentes à composição do vidro.

A Figura 31 e a Tabela 11, também dizem respeito a região do vidro do rejeito, entretanto, o espectro foi posicionado nas partículas cinzas dispostas acima do fundo escuro analisado anteriormente.

Figura 31 - EDS do vidroado (fragmentos cinza) mostrando os picos principais relativo aos elementos encontrados e a região onde a análise foi obtida



Fonte: Do autor, 2021.

Tabela 11 - Análise Quantitativa EDS Vidrado (Partículas Cinza)

Elemento	Peso [%]	$\sigma$ Peso [%]	Composto [%]	Fórmula
Alumínio	1,487	0,095	2,809	$Al_2O_3$
Silício	18,712	0,249	40,029	$SiO_2$
Potássio	0,759	0,127	0,915	$K_2O$
Cálcio	1,808	0,131	2,529	$CaO$
Zinco	1,023	0,195	1,273	$ZnO$
Zircônio	38,825	0,497	52,444	$ZrO_2$
Oxigênio	37,386	0,437		

Fonte: Do Autor, 2021.

É evidenciada pela análise a grande quantidade de oxigênio na região – em porcentagem, o elemento com aproximadamente 37% de massa presente na mesma - fato este que é explicado pela presença dos elementos na sua forma de óxido. Outro ponto a se destacar é a grande presença de zircônio, em quantidade em massa de 39% aproximadamente, e na forma de  $ZnO_2$ , em mais de 52%, em

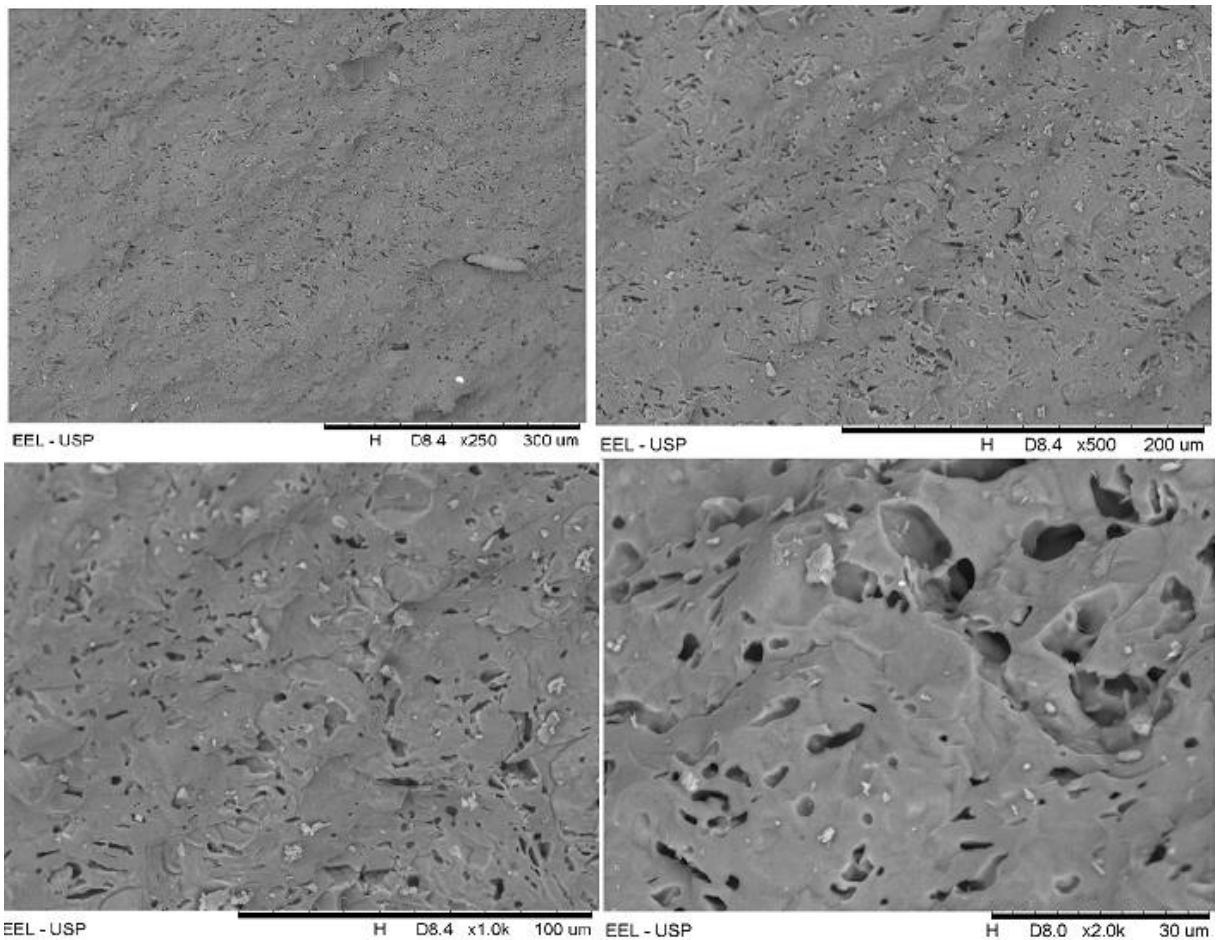
massa. Já o óxido de sílica ( $SiO_2$ ), que apresenta aproximadamente 40, tendo o silício isoladamente, um valor de quase 19%. Todos os outros elementos que foram identificados, se avaliados separadamente do oxigênio, estão em uma proporção muito baixa, não alcançando 2%.

Desses elementos com peso baixo, em relação a região, o alumínio apresenta 1,5%, o potássio 0,75%, o cálcio 1,8% e o zinco, 1%.

### **6.2.2 Região Interna**

Da mesma maneira que constatado na análise de superfície da região do vidro, as micrografias da região interna demonstram um fundo mais escuro – de coloração acinzentada – entretanto, com uma topografia irregular. À medida que ocorre aproximação, pode-se perceber que toda a estrutura é formada por poros e sua geometria é disforme e sem ordenação (Figura 32).

Figura 32 - Fotomicrografias ao MEV da região interna. Imagens obtidas por elétrons secundários.



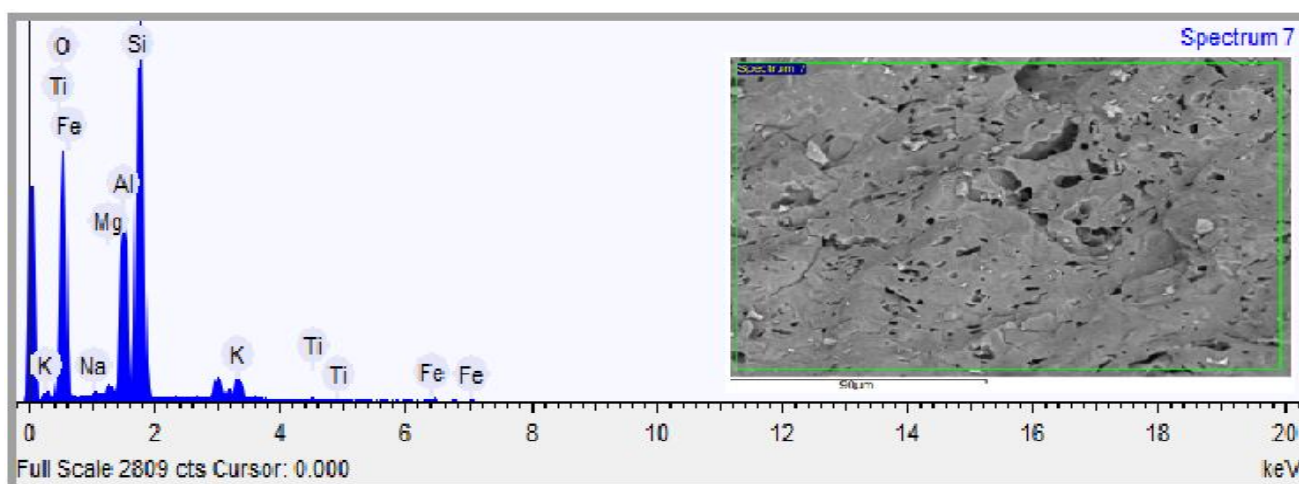
Fonte: Do Autor, 2021

- (a) aumento de 250x
- (b) aumento de 500x
- (c) aumento de 1000
- (d) aumento de 2000x.

Comparando-se as fotomicrografias obtidas ao MEV no presente estudo com as imagens presentes no trabalho de Halicka *et al.* (2013), pode-se afirmar que algumas particularidades estão presente em ambas, como a grande quantidade de micro poros no interior do resíduo sólido bem como pequenas partículas disformes depositadas na estrutura.

Partindo-se das fotomicrografias, fez-se uma análise de EDS na região total a fim de se estabelecer a presença quantitativa dos elementos, conforme relata a Figura 33 e a Tabela 12.

Figura 33 - EDS Interior (Área Total) mostrando os picos principais relativos aos elementos encontrados e a região onde a análise foi obtida.



Fonte: Do Autor, 2021.

Tabela 12 - Análise Quantitativa EDS Interior

Elemento	Peso [%]	$\sigma$ Peso [%]	Composto [%]	Fórmula
Sódio	0,387	0,109	0,521	$Na_2O$
Magnésio	0,716	0,101	1,187	$MgO$
Alumínio	11,951	0,205	22,580	$Al_2O_3$
Silício	32,673	0,310	69,897	$SiO_2$
Potássio	2,595	0,164	3,126	$K_2O$
Titânio	0,546	0,135	0,911	$TiO_2$
Ferro	1,383	0,246	1,779	$FeO$
Oxigênio	49,750	0,359		

Fonte: Do Autor, 2021.

A análise do EDS foi realizada na área total da fotomicrografia, uma vez que toda região se apresenta de forma similar.

A Tabela 12 mostra que essa região do resíduo apresenta alta concentração de dois óxidos: o óxido de alumínio (alumina) e o óxido de silício (sílica). Além disso, é de se constatar que o teor de silício é o maior apresentado (32,67%), excluindo-se o oxigênio, enquanto o alumínio apresenta 11,95%. O Oxigênio, já citado, apresenta quase metade de todo o peso percentual encontrado na região, fato este pela quase totalidade dos compostos estarem em forma de óxido ou ligados ao oxigênio.

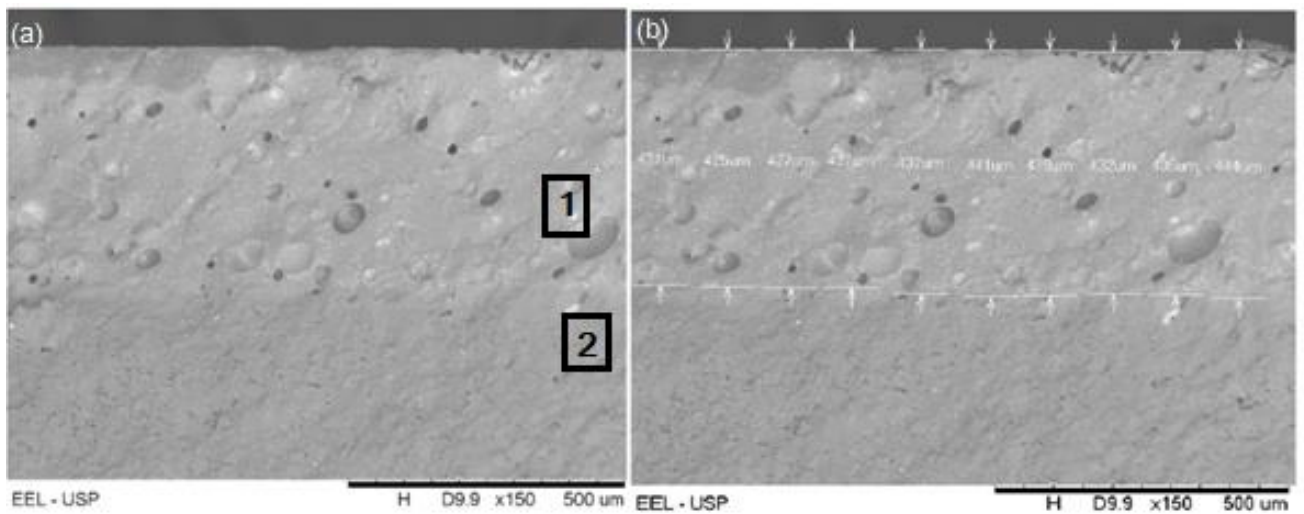
Em números absolutos dos óxidos, a sílica apresenta uma porcentagem alta de quase 69,90% e a alumina, em uma proporção de 22,58%, além das baixas proporções dos óxidos de potássio (3,1%), ferro (1,8%), magnésio (1,2%), titânio (0,9%) e, finalmente, sódio (0,5%).

O presente trabalho faz um paralelo direto com os resultados de EDS da região interna de Halicka *et al.* (2013), já que o rejeito de louça sanitária utilizado pelos mesmos apresentou uma quantidade, em massa, de sílica de 67,63% e de alumina de 24,05%, para essa área estudada. Somando-se a tais compostos, eles encontraram óxido de potássio (3%), sódio (1,25%), ferro (0,55%), molibdênio (0,37%) e magnésio (0,36%).

### **6.2.3 Interface Vidrado – Parte Interna da Louça Sanitária**

Em última análise das micrografias da matéria-prima substituinte, foi levada ao MEV a parte lateral da louça sanitária, obtendo-se imagens da vizinhança da interface existente entre a região do interior com a do esmalte, como pode ser visto na Figura 34.

Figura 34 - Fotomicrografia obtidas por MEV da interface vidrado – parte interna do rejeito de louça sanitária. Imagem obtida por elétrons retroespalhados.



Fonte: Do Autor, 2021

(a) aumento de 150x, sendo a região 1 referente ao vidrado e região 2, do interior

(b) medida da espessura da camada de esmalte

Analisando-se a micrografia da vizinhança da interface do vidrado e da parte interna, é notório afirmar que, a região indicada como 1 diz respeito ao esmalte externo do rejeito de louça sanitária, enquanto a área 2 é o interior deste resíduo (a massa cerâmica). Tal afirmação é embasada das micrografias indicadas pelas Figuras 22 e 25, que demonstram mais especificamente tais regiões.

Outro ponto a se destacar é a presença de muitas cavidades circulares em toda a extensão da topografia da área estudada, diferentemente à imagem obtida da região de esmalte superior. Tal ocorrência pode ser advinda da britagem que o material foi submetido e ela causou esse tipo de irregularidade em cada peça em separado, uma vez que, a imagem obtida do MEV é proveniente de uma região lateral de louça sanitária que sofreu vários danos superficiais em sua quebra.

A imagem (a), obtida em microscópio eletrônico de varredura demonstra perfeitamente o fim da região interna da louça sanitária e o início da região de vidrado. Também é interessante destacar que toda a região possui uma topografia irregular, uma vez que, a imagem diz respeito a área lateral do resíduo sólido e que sofreu os maiores danos das quebras provenientes das operações unitárias de moagem. A imagem (b) traz com precisão a espessura da camada de vidrado em

vários pontos sequenciais, sendo que a menor dimensão se apresenta com  $421\mu\text{m}$  e a maior com  $440\mu\text{m}$ .

No trabalho de Medina (2012), também foi realizado uma imagem com microscópio eletrônico de varredura em uma região fronteira entre a área externa e a área interna do rejeito de louça sanitária. As características apresentadas são muito similares à encontrada nesse trabalho, como elementos arredondados no vidro – que possivelmente são poros – e na parte interna vários pequenos buracos, que são característicos de microporos em regiões internas de cerâmicas para louça sanitária.

Não foi feita análise via EDS da interface do vidro com o interior, uma vez que, esta região entre ambas não é de interesse para o estudo do trabalho em questão.

## 6.5 ANÁLISES DO CONCRETO EM SEU ESTADO FRESCO

Com relação às propriedades do concreto fresco, pode-se afirmar que todas as formulações – tanto de referência quanto das com substituição por louça sanitária - se mostraram trabalháveis e, visualmente, nenhum tipo de escoamento de água na massa foi verificado. Outro ponto importante é que a massa se apresentou homogênea em todas as formulações, sem que houvesse segregação em nenhuma porção dela. Com relação ao abatimento do concreto, o mesmo pode ser analisado pelos valores demonstrados na Tabela 13.

Tabela 13 – Valores do Slump Test dos Concretos nas Várias Formulações

<i>Slump Test</i>			
Formulação	Altura [cm]	Abatimento [cm]	Consistência
CR	25,5	4,5	Firme
C25	15,0	15,0	Mole
C50	16,0	14,0	Mole
C75	18,5	11,5	Média
C100	26,0	4,0	Firme

Fonte: Do Autor, 2021



Analisando-se os valores de abatimento do concreto, foi possível classificar cada formulação de acordo com a classe de consistência característica. Com relação ao CR, ele foi classificado como firme, pelas dimensões menores da brita 0, o mesmo apresentou uma plasticidade bem interessante, em se tratando de sua textura e adensamento.

Diferentemente, a formulação C100, que também foi classificada pelo ensaio em uma consistência firme, demonstrou uma massa de concreto mais espessa e dura, com uma dificuldade para a mesma ser adensada na moldagem dos corpos-de-prova e no manuseio da mesma, produzindo inúmeras amostras de concreto com vazios e segregação na região inferior. Uma ação que poderia ser tomada para correção desse defeito seria um estudo mais detalhado da relação a/c, mas ele não está incluso no escopo deste trabalho.

As formulações com 25% e 50% de substituinte de louça sanitária, tiveram um resultado de abatimento próximos, de 15 e 14 cm, respectivamente. Eles foram classificados com uma consistência mole e, na prática, ambos se mostraram com facilidade de ser adensado tanto no manuseio quanto no preenchimento dos moldes de concreto.

Finalmente, o C75 foi classificado com uma consistência média e nessa classificação, ele tem uma trabalhabilidade boa, com uma aparência de uma massa de textura plástica e de fácil manuseio. Nos ensaios em laboratório, o concreto nessa formulação se mostrou viável para utilização do mesmo em trabalhos que se necessite uma massa que possua uma facilidade em seu adensamento.

No trabalho de Awoyera *et al.* (2018), foram apresentados resultados de *slump test* para substituição do agregado miúdo e também do agregado graúdo. Diferentemente do presente trabalho, o concreto de referência obteve um abatimento que se encaixava no padrão médio. Todas as outras formulações com rejeito de louça sanitário, com exceção da substituição total também se portaram nessa faixa de consistência, da mesma forma que o presente trabalho. Já o CCA-100 (nomenclatura dada pelos autores), tiveram o valor de 4,0 cm de abatimento, ou seja, com uma consistência firme e de igual valor ao ensaiado nesse trabalho.

## 6.6 ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO

Os dados relativos ao concreto no seu estado endurecido são demonstrados nas Tabelas 14, 15 e 16, cujos valores de resistência à compressão em idades específicas – 3, 7 e 28 dias de cura úmida – são apresentados para todas as formulações, bem como os valores médios ( $f_{cm}$ ), característico ( $f_{ck}$ ) de resistência e o desvio-padrão dos resultados obtidos.

Há de se ressaltar que o  $S_c$  utilizado foi relativo à Condição A, uma vez que, todas as matérias-primas para a confecção do concreto foram medidas em massa.

Tabela 14 - Resistência à Compressão (MPa) dos concretos com 3 dias de cura

Idade [dias]	Resist. Compressão				
	CR	C25	C50	C75	C100
3	18,46	12,73	26,74	13,11	15,28
	17,83	15,28	28,01	12,73	15,28
	15,28	12,73	28,01	14,64	15,92
	18,21	13,37	28,01	14,01	15,28
	17,83	11,46	27,37	14,01	15,92
$f_{cm}$	17,52	13,11	27,63	13,70	15,53
$f_{ck}$	10,92	6,51	21,03	7,10	8,93
DP	1,281	1,395	0,569	0,767	0,349

Fonte: Do Autor, 2021

É percebido na Tabela 14 que a formulação com substituição de 50% de brita 0 pela louça sanitária obteve um resultado excelente, se comparado ao concreto de referência e aos outros com substituintes. Destaca-se também que o desvio-padrão para todos os traços confeccionados tiveram um valor pequeno, demonstrando assim uma pequena variação entre os dados obtidos.

Tabela 15 - Resistência à Compressão (MPa) dos concretos com 7 dias de cura

Idade [dias]	Resist. Compressão				
	CR	C25	C50	C75	C100
7	26,74	20,37	35,65	25,46	26,10
	26,10	22,92	31,83	25,46	13,37*
	24,83	19,74	33,74	26,74	29,92
	24,19	21,65	34,70	26,74	24,83
	26,74	22,28	33,10	26,10	26,74
$f_{cm}$	25,72	21,39	33,80	26,10	26,90
$f_{ck}$	19,12	14,79	27,20	19,50	20,30
DP	1,156	1,320	1,466	0,637	2,167

Fonte: Do Autor, 2021

Com o rompimento dos corpos-de-prova após 7 dias de sua confecção (Tabela 15), foi possível verificar um ganho de resistência, para todos os traços. Também se nota que um dos valores do concreto C100 teve um desempenho extremamente baixo e o mesmo foi descartado para os cálculos de resistência à compressão. Isso ocorreu porque o corpo de prova, em questão, teve uma desagregação e segregação grande em todo seu comprimento e isso prejudicou seu rendimento.

Tabela 16 - Resistência à Compressão (MPa) dos concretos com 28 dias de cura

Idade [dias]	Resist. Compressão				
	CR	C25	C50	C75	C100
28	43,29	36,92	39,47	39,15	31,19*
	40,74	34,38	42,02	36,92	38,20
	40,74	33,10	40,74	44,56	47,11
	24,83*	30,56	35,65	45,20	42,02
	40,11	36,92	42,65	43,29	22,91*
$f_{cm}$	41,22	34,38	40,11	41,83	42,44
$f_{ck}$	34,62	27,78	33,51	35,23	35,84
DP	1,412	2,701	2,775	3,613	4,471

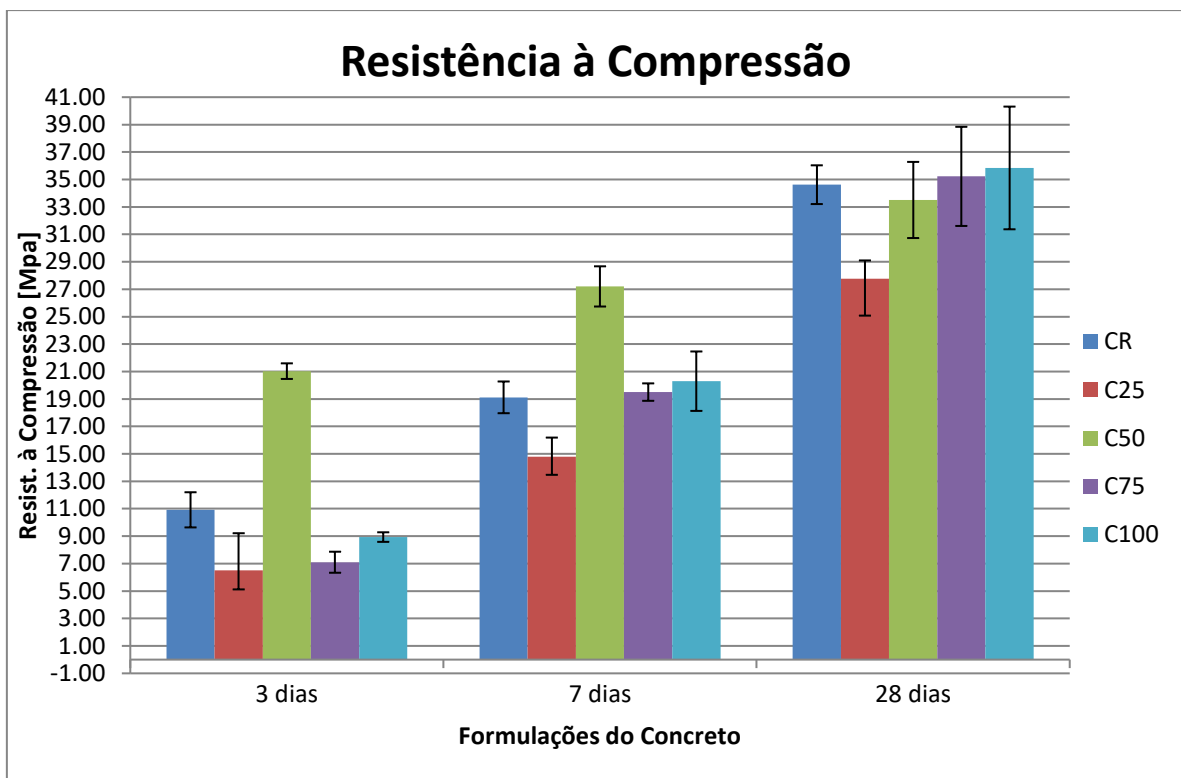
Fonte: Do Autor, 2021

A Tabela 16, com os valores de resistência há 28 dias, demonstra um acréscimo grande de resistência à compressão, se comparado com os valores

obtidos ao terceiro dia de cura (primeira análise da resistência mecânica) . Houve também corpos-de-prova que não tiveram uma boa agregação entre a massa de cimento e os agregados graúdos e, por este motivo, foram descartados seus resultados numéricos para se obter um valor mais confiável e próximo do real.

As Figuras 35 e 36 demonstram visualmente os resultados do teste de resistência à compressão do concreto em todas as formulações estudadas e nos dias chave para esse estudo (3, 7 e 28 dias).

Figura 35 - Gráfico de Barras de Resistência à Compressão em 3, 7 e 28 dias



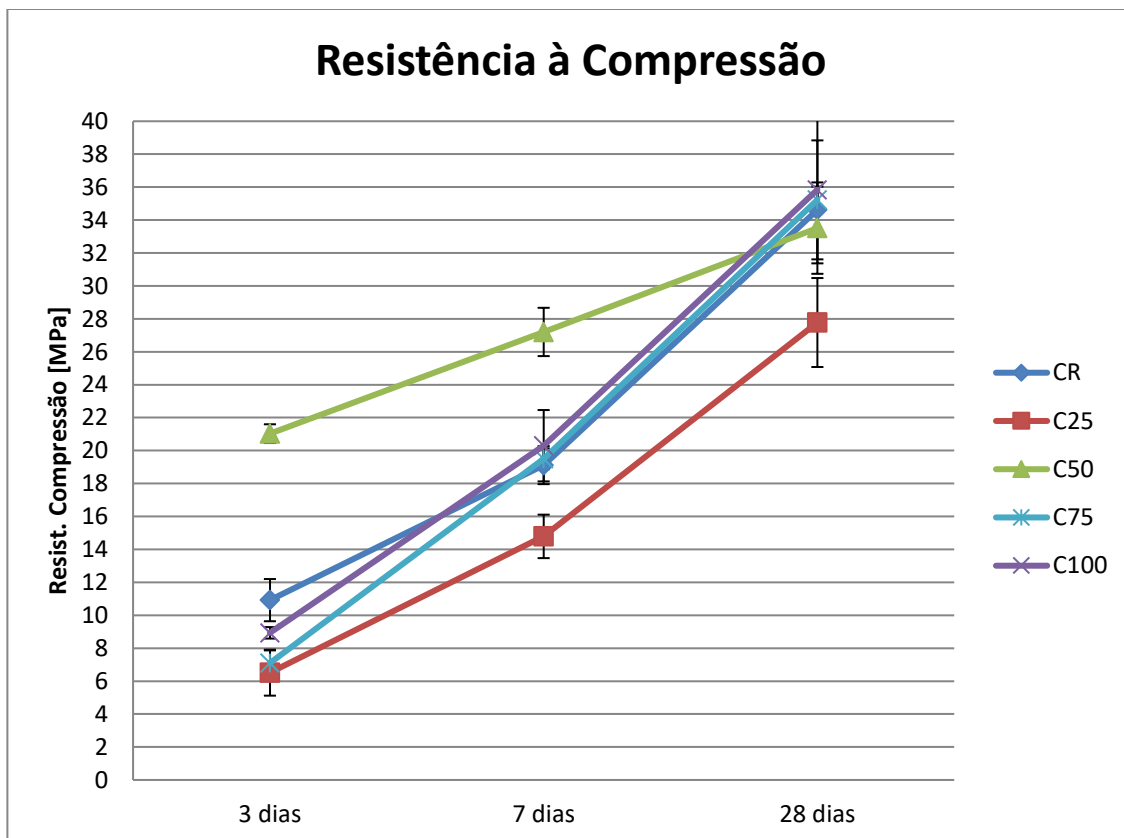
Fonte: Do Autor, 2021

Fazendo-se uma análise da Figura 35, é notório o ganho de resistência mecânica, com o aumento do tempo de cura do concreto, em todas as formulações estudadas. Com exceção da formulação com 25% de substituinte de louça sanitária (C25), todos os outros traços, aos 28 dias, atingiram um resultado satisfatório, de aproximadamente 35 MPa. É de suma importância destacar que os resultados das maiores idades são as mais relevantes, já que, é o valor considerado para cálculos estruturais na prática.

É de se destacar também o ótimo resultado da formulação com 50% de substituinte (C50) nas primeiras idades, como os de 3 e 7 dias. Entretanto, o mesmo concreto não se mantém como o mais resistente no último período, tendo seu desempenho ultrapassado pelo CR, C75 e C100.

Pela análise tanto dos resultados característicos do ensaio de compressão, bem como os desvios padrões obtidos pelos corpos-de-prova, é possível afirmar que a resistência mecânica dos concretos confeccionados com o uso da louça sanitária foi muito similar aos mesmos que utilizavam somente a brita 0 (CR). Tal constatação é de extrema importância tecnológica, em se tratando do uso desse resíduo sólido na formulação de concretos e os mesmos não apresentando uma perda de sua propriedade principal, que é a alta resistência à compressão.

Figura 36 - Gráfico de Linhas de Resistência à Compressão em 3, 7 e 28 dias



Fonte: Do Autor, 2021

A primeira e mais nítida avaliação do gráfico traçado para todas as formulações é que, excluindo-se o traço com 25% de substituinte, todos os outros tiveram um valor de tensão de ruptura à compressão muito próxima aos 28 dias, isto

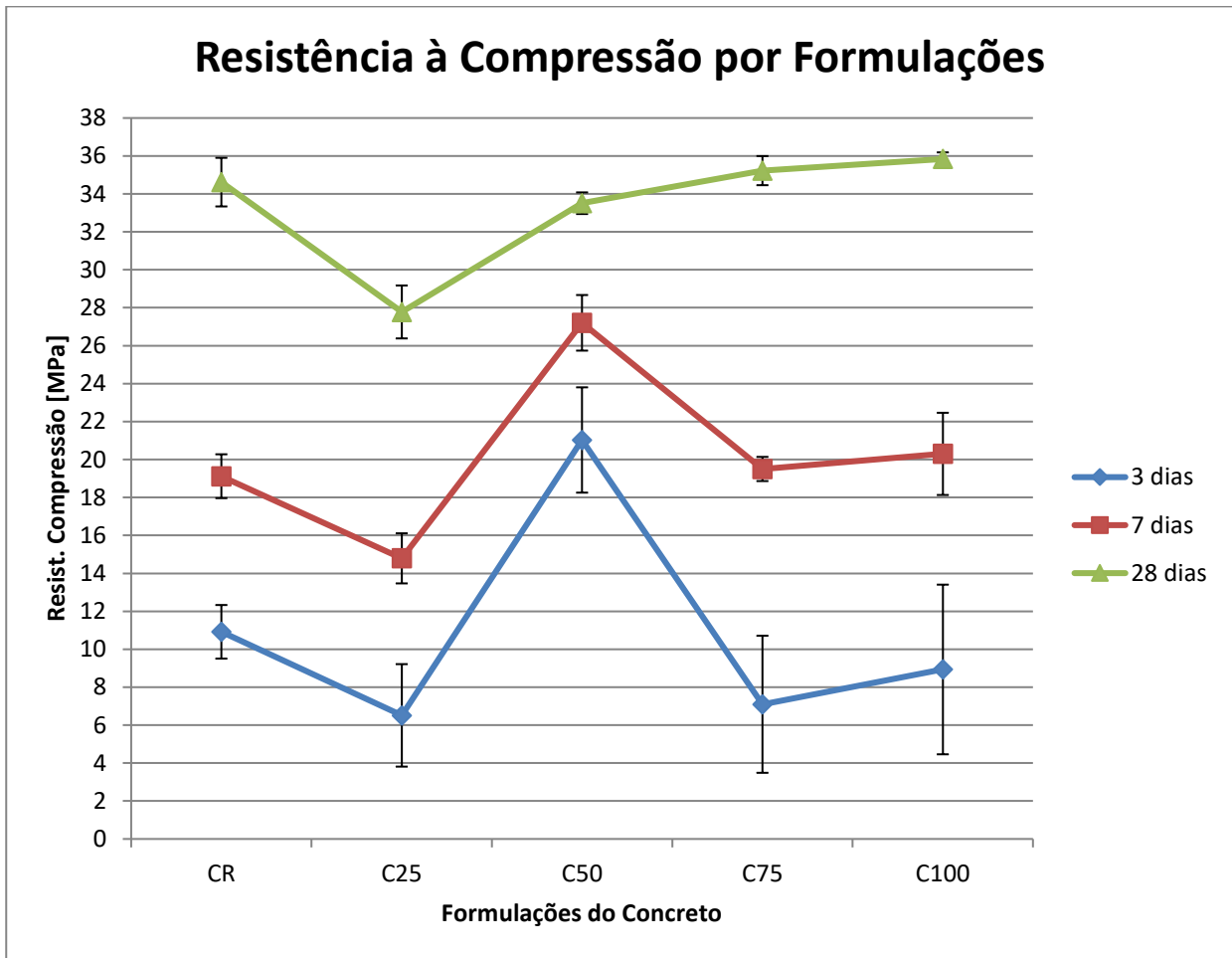
sendo demonstrado pelo gráfico com os pontos de máxima resistência. Também é interessante destacar que a formulação C50 mostrou uma tendência de crescimento de resistência, enquanto todas as outras formulações tiveram um valor relativamente baixo a ruptura de 3 dias e um ganho de resistência mais acentuado a partir dos 7 dias.

Analisando individualmente cada traço utilizado para a confecção dos concretos, nota-se que o que atingiu maior resistência mecânica é o C100, com a mesma sendo de aproximadamente 36MPa, resultado este que, assim como o C75 ( $f_{ck}$  acima da casa dos 35MPa), supera o concreto de referência, que teve um desempenho de aproximadamente 35MPa. O concreto que possui a mesma quantidade de brita 0 e louça sanitária atingiu um resultado de 33,5MPa, enquanto o C25 teve o pior rendimento entre todos, atingindo somente 28MPa.

Realizando-se a comparação das resistências mecânicas características para cada formulação de concreto produzida com a norma ABNT NBR 8953: 2015 “Concreto para fins estruturais – classificação pela massa específica, por grupo de resistência e consistência”, os concretos confeccionados estão classificados como Grupo I (resistência máxima até 50MPa). Mais especificamente, os traços CR, C50, C75 e C100 são pertencentes ao grupo C35, ou seja, possuem resistência à compressão característica de 35MPa, enquanto o traço C25 pode ser considerado como pertencente ao grupo C30, de resistência característica de 30MPa.

Observou-se o comportamento do gráfico de resistência característica com as formulações como as variáveis fixas, tal qual pode ser visto na Figura 37.

Figura 37 - Resistência Mecânica por Formulações



Fonte: Do Autor, 2021

Da mesma forma que constatado nos gráficos anteriores, em todas as formulações houve um ganho de resistência mecânica, como era de se esperar pelas características do concreto. Além disso, a curva tem um pico alto nos períodos de 3 e 7 dias, fato este explicado pela grande resistência à compressão do C50 nos primeiros dias, se destacando dos demais traços. Além disso, se observar a curva de 28 dias, nota-se que a partir do ponto de C25, a curva é crescente e mais suave, demonstrando que as formulações C75 e C100 tiveram um melhor rendimento nesse período de análise - em comparação com a o C50.

Finalmente, pode-se notar que o valor de resistência à compressão característica não segue uma tendência uniforme, uma vez que não há uma lógica ascendente ou descendente à medida que há substituição de brita 0 pela louça sanitária.

Compara-se os resultados com o trabalho de Awoyera *et al.* (2018), que também fizeram substituição da brita por rejeito de louça sanitária, os resultados são, em sua maioria, muito próximos. Com exceção do C50 - que obteve valores muito acima da média de todos os outros - e o C25 - que demonstrou um resultado muito abaixo - a resistência à compressão teve um melhor desempenho à medida que houve substituição da brita pelo rejeito.

Para as primeiras idades (3 e 7 dias), os valores de resistência à compressão do trabalho tido de comparação obteve melhores resultados: próximos a 12MPa em relação à 10MPa para os 3 dias; 22MPa em relação à 18MPa para os 7 dias. Em contrapartida, para os corpos de prova de 28 dias, este trabalho demonstrou resultados mais satisfatórios, com valor médio de 35MPa se comparando-se a 25MPa do trabalho de Awoyera *et al.* (2018).

No trabalho de Almeida *et al.* (2019), não foi realizado o cálculo do  $f_{ck}$ , entretanto, os valores obtidos de seus ensaios de resistência à compressão ( $f_{cm}$ ) foram muito satisfatórios. A 28 dias de cura o concreto referência atingiu o maior valor dentre as formulações (48,44MPa) enquanto que o com 100% de substituição apresentou 47,78MPa. É também de se ressaltar que todos valores ficaram acima ou muito próximo de 45MPa, valor este que é acima do melhor resultado desse trabalho (42,44MPa no concreto C100).

## 6.7 MODOS DE RUPTURA E ANÁLISE DO CAMINHO CRÍTICO

Com o ensaio de compressão realizado por uma máquina eletrônica, com os corpos-de-prova sendo comprimidos a uma velocidade constante até seu rompimento total, foi possível verificar os tipos de ruptura que aconteceram em cada formulação de concreto (Figura 38).



Figura 38 - Tipos de Ruptura no Ensaio de Compressão



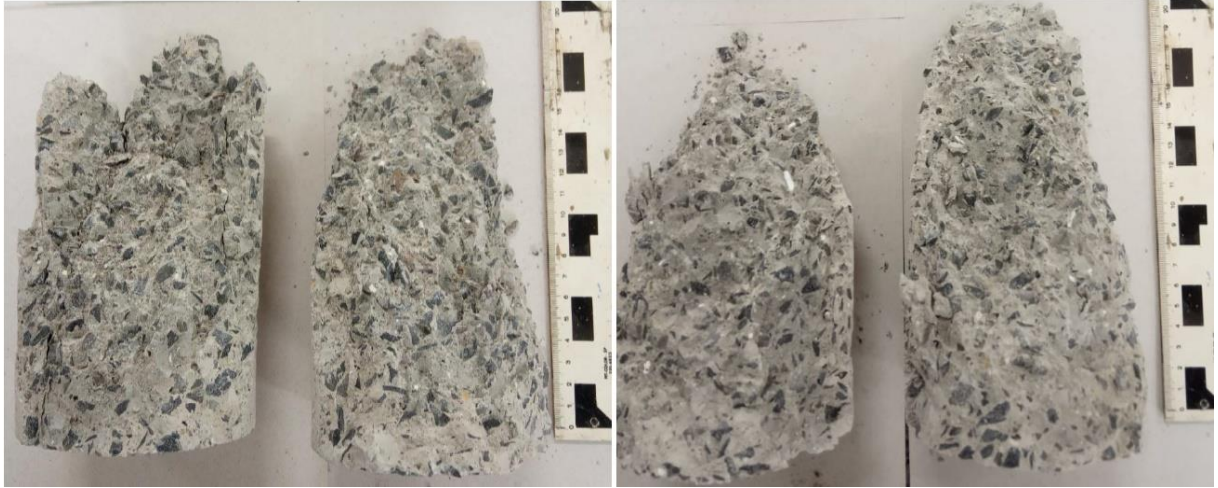
Fonte: Do Autor, 2021

(a) Cisalhada

(b) Cônica Bipartida

Em todos os rompimentos realizados, foi constatado que os corpos-de-prova romperam por cisalhamento puro (as trincas propagavam-se na diagonal) e da forma cônica bipartida (as trincas ocorriam da região superior até o alcance de sua base). A Figura 39 demonstra o interior dos exemplares do concreto somente com a brita 0 como agregado graúdo.

Figura 39: - Interior dos Corpos-de-prova CR, Após Rompimento em Máquina de Ensaio.



Fonte: Do Autor, 2021

Na formulação CR, é possível verificar que os corpos-de-prova romperam com uma propagação das trincas na diagonal, tendo assim um rompimento cisalhante (tipo e). Além disso, pode-se destacar que todo o rompimento aconteceu na região em que a pasta de cimento estava presente, seja a trinca propagando-se pela mesma ou pela interface entre a pasta e o agregado graúdo, neste caso em específico, a brita 0.

O caminho crítico no corpo-de-prova da formulação de 25% de substituinte é mostrado na Figura 40.

Figura 40 - Interior dos Corpos-de-prova C25, Após Rompimento em Máquina de Ensaio



Fonte: Do Autor, 2021

Da mesma forma que a formulação de referência, o C25 teve um rompimento em sua diagonal, ou seja, cisalhada. Os fragmentos de louça sanitária já podem ser vistos no interior do corpo-de-prova e sua distribuição, juntamente com a brita 0, se dá de forma randômica. Além disso, é possível destacar que não houve algum tipo de segregação nesses exemplares, uma vez que, visualmente tanto a louça sanitária quanto a brita estão bem ancoradas na pasta de cimento.

A Figura 41 demonstra ao interior do traço de concreto com 50% de brita e 50% de louça sanitária, ambos como agregado graúdo.

Figura 41 - Interior dos Corpos-de-prova C50, Após Rompimento em Máquina de Ensaio



Fonte: Do Autor, 2021

A presença de uma proporção igualitária entre os dois tipos de agregado graúdo utilizados na confecção do concreto C50 demonstrou que eles podem exercer as mesmas funções e que o seu rompimento se deu por meio da força de compressão em diagonal, como ocorreu nos casos do CR e do C25. Visualmente, é possível destacar que não houve uma segregação entre os constituintes do corpo-de-prova, fato este que fez com que a propagação das trincas se desse pela massa de cimento e pela interface entre a mesma e os agregados graúdos (tanto a louça sanitária quanto a brita 0).

Seguindo-se as análises visuais do modo de ruptura à compressão, a Figura 42 traz o interior do concreto com 75% de louça sanitária e 25% de brita 0, em sua composição.

Figura 42 - Interior dos Corpos-de-prova C75, Após Rompimento em Máquina de Ensaio



Fonte: Do Autor, 2021

Observando-se a Figura 41, é possível constatar que o formato dos corpos-de-prova após o rompimento possui um formato característico diferente das formulações anteriores. Isso pode ser explicado pelo caminho que as trincas produzidas percorreram, seguindo-se em uma propagação de cima para baixo, sendo assim, caracterizada por uma ruptura cônica bipartida (tipo b).

Quando observado separadamente os elementos da esquerda de cada imagem na Figura 41, nota-se que a geometria deles é em formato de um cone. Além disso, visualmente já foi possível perceber que os fragmentos de louça sanitária para essa formulação já não tinham tamanha aderência se comparada aos traços substituintes utilizados anteriores.

É notória, também, a maior utilização de espaço volumétrico dentro do concreto pela utilização da louça sanitária, uma vez que, ela possui uma granulometria maior que a brita 0, presente nos concretos confeccionados previamente. Por esse motivo, verificou-se que a propagação da trinca se deu praticamente em sua totalidade pela interface louça sanitária – pasta de cimento, uma vez que, a brita 0 estava bem agregada à pasta nessa formulação.

Finalmente, a Figura 43 retrata o interior dos corpos-de-prova fabricados utilizando somente a louça sanitária como agregado graúdo (C100).

Figura 43 - Interior dos Corpos-de-prova C100, Após Rompimento em Máquina de Ensaio



Fonte: Do Autor, 2021

Observando a Figura 43, nota-se que o modo de ruptura para os corpos-de-prova se assemelha a uma combinação entre os tipos cisalhada e bipartida cônica, tendo um dos elementos rompidos em formato cônico e o outro, demonstrando tanto um caminho de trinca no sentido vertical quanto em diagonal (tipo d).

Outra característica que se pode destacar é que a parte interna da louça sanitária (massa cerâmica) é muito mais vezes vista no caminho que a trinca percorreu se comparado a região do vidrado. Essa observação é importante para se ter parâmetros reais para se analisar a real influência do esmalte na ancoragem desse resíduo sólido como substituinte ao agregado graúdo.

Além disso, nessa formulação de substituição total da brita, o espaço volumétrico ocupado pela louça sanitária é visivelmente maior, fazendo assim com que o volume de pasta de cimento seja menor se comparado a todos os outros traços produzidos. Com a maior quantidade de ocupação do volume do corpo-de-prova pela louça sanitária, notou-se que seus fragmentos presentes no concreto se apresentam mais próximos uns dos outros e, por consequência, houve uma menor agregação entre todos os constituintes dele.

## 6.8 POROSIDADE MÉDIA DOS CONCRETOS

A Tabela 17 traz a massa obtida pela pesagem dos corpos-de-prova em todas as suas formulações e nas três diferentes situações necessárias para os cálculos da porosidade.

Tabela 17 – Valores obtidos na pesagem do ensaio de porosidade aparente

		Absorção de Água		
	Amostra	Massa Seca ( $m_s$ ) [g]	Massa Submersa ( $m_i$ ) [g]	Massa úmida ( $m_{sat}$ ) [g]
CR	1	1,475	0,87	1,605
	2	1,26	0,8	1,395
	3	0,86	0,49	0,97
C25	4	0,72	0,435	0,83
	5	1,16	0,81	1,265
C50	6	1,215	0,715	1,31
	7	0,815	0,465	0,875
C75	8	0,56	0,35	0,62
	9	0,865	0,525	0,93
C100	10	1,39	0,825	1,485

Fonte: Do Autor, 2021

Com os valores necessários para os cálculos já obtidos, os mesmos foi efetuados e seus resultados são demonstrados na Tabela 8, que representa, então, os valores de porosidade média dos corpos-de-prova de concreto, bem como os desvios padrões relativos a análise.

Tabela 18 - Porosidade dos CPs

Porosidade CPs					
Amostra	CR	C25	C50	C75	C100
01	8,81	12,79	9,05	7,82	7,51
02	10,71	15,28	7,82	7,36	6,83
$P_m$	9,76	14,035	8,435	7,59	7,17
DP	1,344	1,761	0,870	0,325	0,481

Fonte: Do Autor, 2021

Como é possível observar, a porosidade do concreto de referência em comparação ao concreto com totalidade de substituição tem um decréscimo. Entretanto, é possível perceber que a formulação C25 possui uma porosidade bem

destoante se comparada a todas as outras, fato este que pode ser a causa do menor valor de resistência à compressão mais baixa nessa quantidade substituinte.

No trabalho de Almeida *et al.* (2019), que fez substituições na proporção de 25, 50, 75 e 100% de brita 1 por rejeito de louça sanitária - a porosidade apresentou uma tendência de queda, apresentando 11,89% (aproximadamente 2% mais porosa que os resultados encontrados nesse trabalho) no concreto referência e no concreto com substituição total, uma porosidade média de 7,39% (muito aproximada na calculada neste trabalho).

De acordo com Medina *et al.* (2012), os resultados de porosidade foram encontrados menores a medida que se aumenta a substituição do agregado graúdo pelo rejeito de louça sanitária. Isso acontece porque, de acordo com o estudo dos autores, a interface pasta de cimento - agregado reciclado (rejeito de louça sanitária) apresenta menos poros, são mais compactos e mais estreitos em comparação com o agregado natural (brita 0).

## 6.9 MICROSCOPIAS E ESPECTROSCOPIAS DOS CORPOS DE PROVA

### 6.9.1 Concreto Referência (CR)

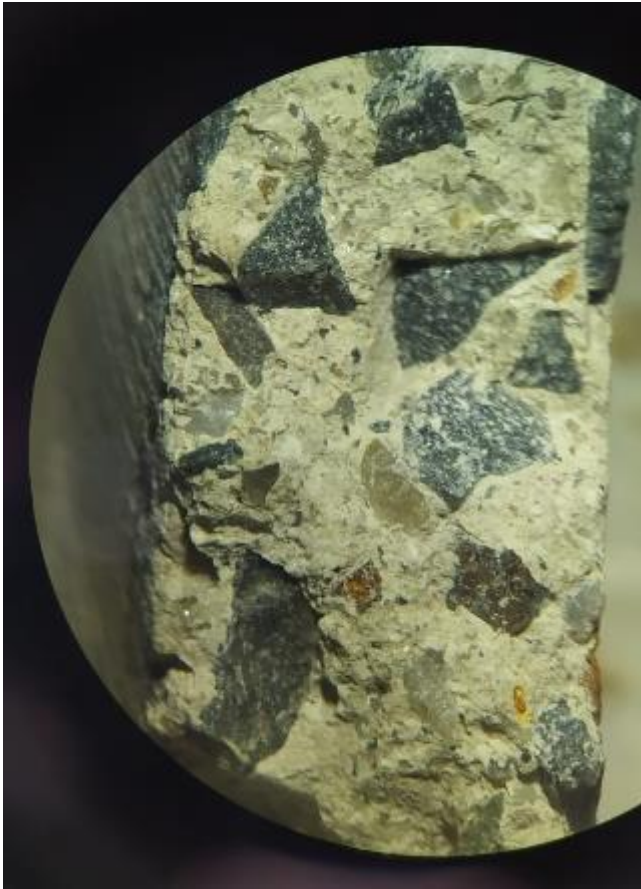
As imagens de microscopia óptica, obtidas a partir de amostra retirada de seção rompida dos corpos-de-prova, retrata bem a diferença entre a pasta de cimento – a porção acinzentada e de fundo – e da brita 0 (na coloração mais escura) que é encontrada numa estrutura de concreto. É possível observar, na Figura 43, que não existe uma disposição homogênea dos agregados graúdos em relação à pasta de cimento, ou seja, eles estão posicionados sem uma forma regular.

Isso é explicado, pelo modo de confecção do próprio concreto, que ocorre dentro de uma betoneira em que os elementos constituintes vão se misturando de maneira desordenada e, após a adição da água (ocorrendo à hidratação do cimento), esses ficam em suspensão dentro da massa plástica do cimento.

Outro ponto a ser destacado é que existem também, na estrutura, alguns agregados de cores diferentes – transparentes e marrons – e isso se deve pela brita 0 ser adquirida comercialmente (sem um restrito controle de separação e qualidade).



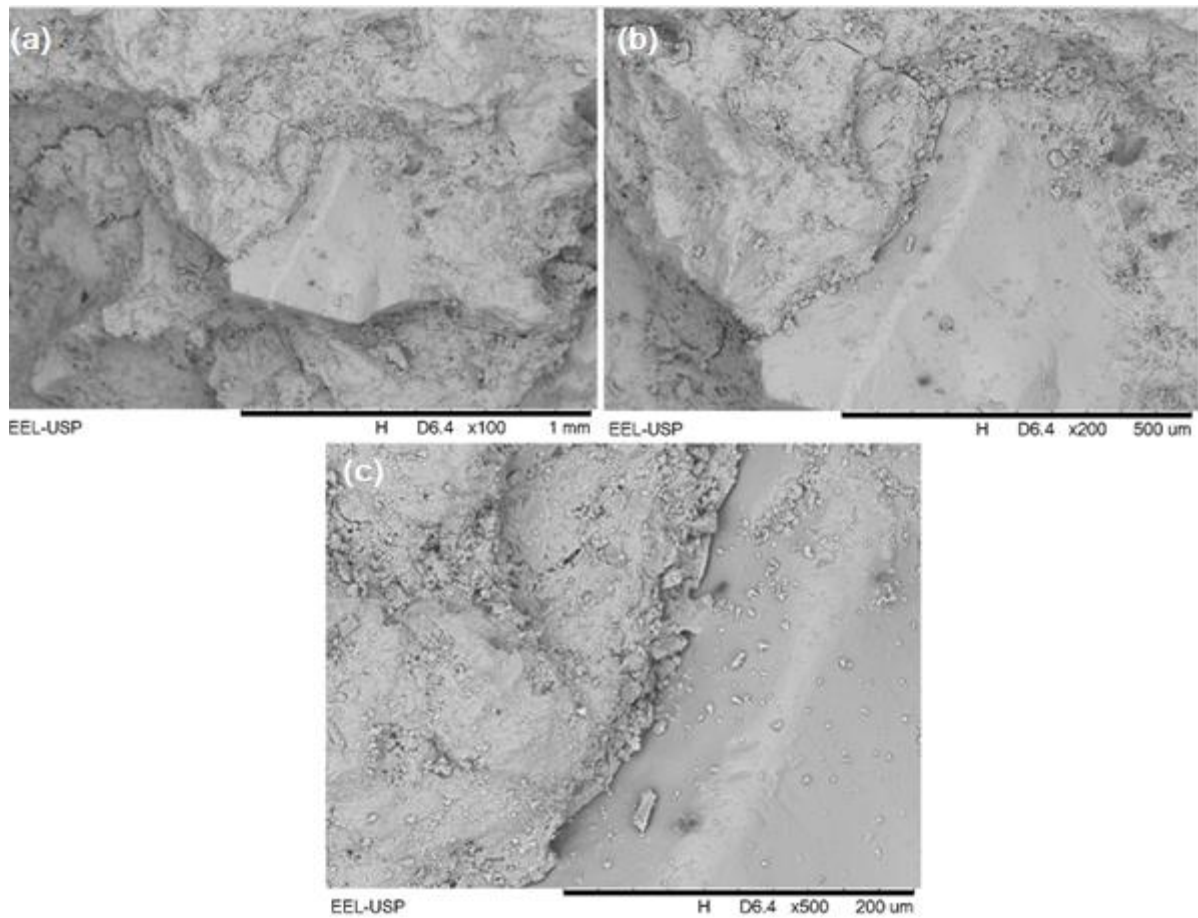
Figura 44 - Imagem de Microscopia Óptica - CR



Fonte: Do Autor, 2021

Já com a microscopia eletrônica de varredura, foi possível verificar na região analisada, a presença de uma partícula do agregado graúdo (brita 0) disposto na pasta de cimento, conforme visto na Figura 45.

Figura 45 - Fotomicrografias ao MEV do Concreto Referência. Imagens Obtidas por Elétrons Secundários.



Fonte: Do Autor, 2021

(a) Aumento de 100x

(b) Aumento de 200x

(c) Aumento de 500x;

Com aumento de 100 vezes (Figura 45a), é possível perceber que a pasta de cimento tem uma conformação topográfica menos regular em sua superfície (mais disforme), diferentemente do agregado que apresenta uma topografia mais lisa.

Nos aumentos de 200 e 500x, analisando as Figuras 45b e 45c, pode-se destacar com mais precisão - pela maior aproximação - uma apropriada ancoragem do agregado gráudo na pasta de cimento. A importância dessa ancoragem adequada se dá pela melhor interação da interface agregado - pasta, uma vez que

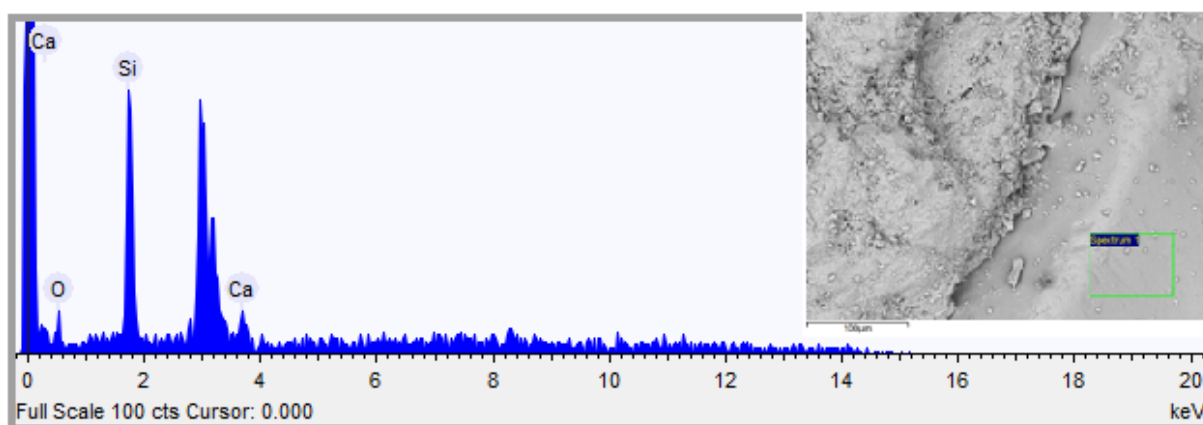
esse região é a mais frágil do material. Por essa interface com maior tendência que ocorra um crescimento de trincas e posterior rompimento, a disposição em que se encontram os elementos constituintes é diretamente relacionado à resistência mecânica (à compressão) do concreto.

Visualmente é possível perceber que a brita 0 está com uma excelente disposição em relação a área observada pela micrografia, uma vez que, ela se mostra de uma forma fixa e bem encaixada na estrutura, mesmo que isso não tenha resultado em um valor maior de resistência mecânica à compressão.

Já a micrografia apresentada em Medina *et al.* (2012), mesmo a interface pasta de cimento – agregado graúdo tenha um aspecto de ser de uma forma mais firme e mais envolva, os autores afirmam que nessas condições o agregado natural apresenta mais poros e uma menor proximidade dos elementos presentes nessa região.

Partindo-se das micrografias de microscópio eletrônico de varredura, fez-se o EDS e assim, foi também possível analisar a região do agregado graúdo, a área esquerda – nesse caso, a brita 0 – como é visto na Figura 46, com os espectros de elementos presentes, e na Tabela 19 (de forma quantitativa).

Figura 46 - EDS Concreto Referência – Região Direita, Mostrando os Picos Principais Relativos aos Elementos Encontrados e a Região onde a Análise foi Obtida.



Fonte: Do Autor, 2021

Tabela 19 - Análise Quantitativa EDS Concreto Referência – Região Direita

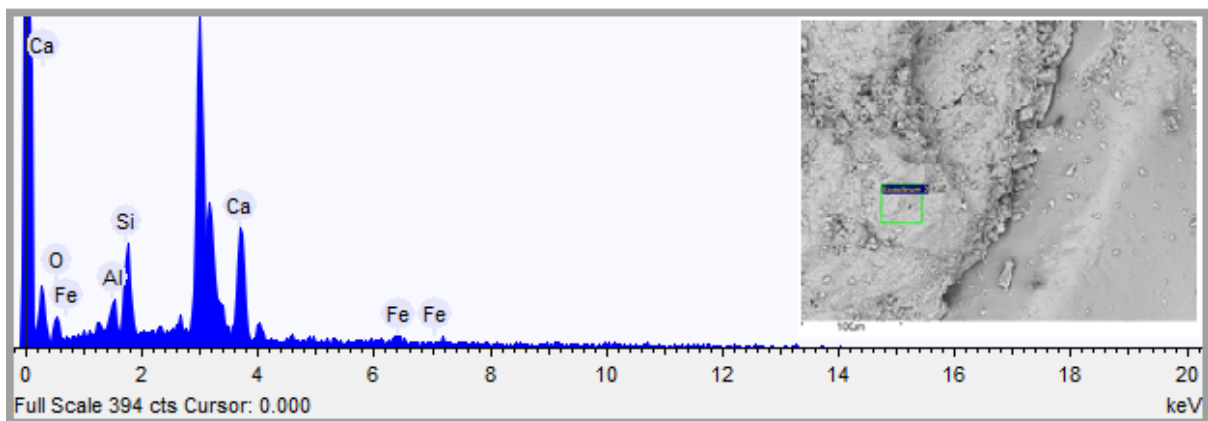
Elemento	Peso [%]	$\sigma$ Peso [%]	Composto [%]
Oxigênio	33,305	6,562	48,269
Silício	53,215	5,578	43,933
Cálcio	13,479	3,029	7,798

Fonte: Do Autor, 2021

Na quantidade de elementos presentes na análise de EDS, o silício e o oxigênio são os que estão mais presentes e, em menor quantidade também se encontrou cálcio. Esses elementos estão presentes na estrutura pelo fato das britas (materiais basálticos) tem em sua constituição óxidos de silício e de cálcio.

Partindo-se da mesma micrografia, dessa vez analisando por EDS a área direita, onde se encontra os compostos da pasta de cimento, foi possível obter os espectros de elementos (Figura 47) e os valores quantitativos, de acordo com a Tabela 20.

Figura 47: - EDS Concreto Referência – Região Esquerda, Mostrando os Picos Principais Relativos aos Elementos Encontrados e a Região onde a Análise foi Obtida.



Fonte: Do Autor, 2021

Tabela 20 - Análise Quantitativa EDS Concreto Referência – Região Esquerda

Elemento	Peso [%]	$\sigma$ Peso [%]	Composto [%]
Oxigênio	34,108	3,842	54,091
Alumínio	4,715	0,813	4,434
Silício	15,615	1,343	14,107
Cálcio	37,311	2,536	23,620
Ferro	8,251	2,154	3,748

Fonte: Do Autor, 2021

Como é possível observar na Tabela 20, os elementos mais presentes são o oxigênio (34,1% de presença) e o cálcio, com proporção de 37,3%. Este resultado era esperado porque a pasta de cimento possui uma maior quantidade de cimento em relação às outras matérias-primas e, com a adição da água e a sua hidratação, formou-se os compostos hidratados. É notória também a presença de silício (em 15,6% da amostra) e do ferro (8,2%) que são advindos da areia – agregado miúdo da mistura - que se encontra também na pasta.

Mais especificamente, analisando-se os números dos elementos com os constituintes do cimento, é possível afirmar que, como foram feitas análises após um certo período de tempo desde sua confecção, os compostos hidratados encontrados na estrutura foram o hidróxido de cálcio, silicato hidratado de cálcio e até mesmo o sulfoaluminato de cálcio.

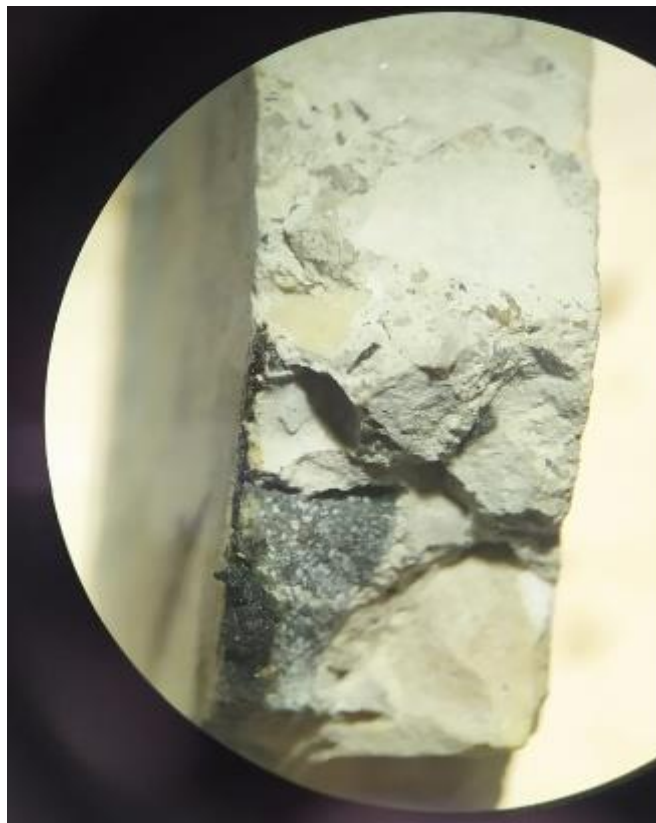
### 6.9.2 Concreto com 25% de Rejeito e 75% de Brita 0 (C25)

O concreto C25, diferentemente do CR, mostrou-se, em sua seção transversal, mais proximidade entre os agregados graúdos utilizados para sua confecção (rejeito da louça sanitária e a brita 0). Como é possível visualizar na Figura 48, há uma porção em que ambos – agregado tradicional e substituinte – estão em contato em vários pontos de suas superfícies, apresentando menor quantidade da interface agregado – pasta de cimento.

Conforme pode ser analisado tanto na questão da resistência mecânica e da porosidade, a micrografia óptica também demonstra um elemento (menor interface

entre os agregados e a pasta) que pode corroborar o mais baixo valor da análise de resistência à compressão em comparação com todas as outras formulações desenvolvidas nesse trabalho.

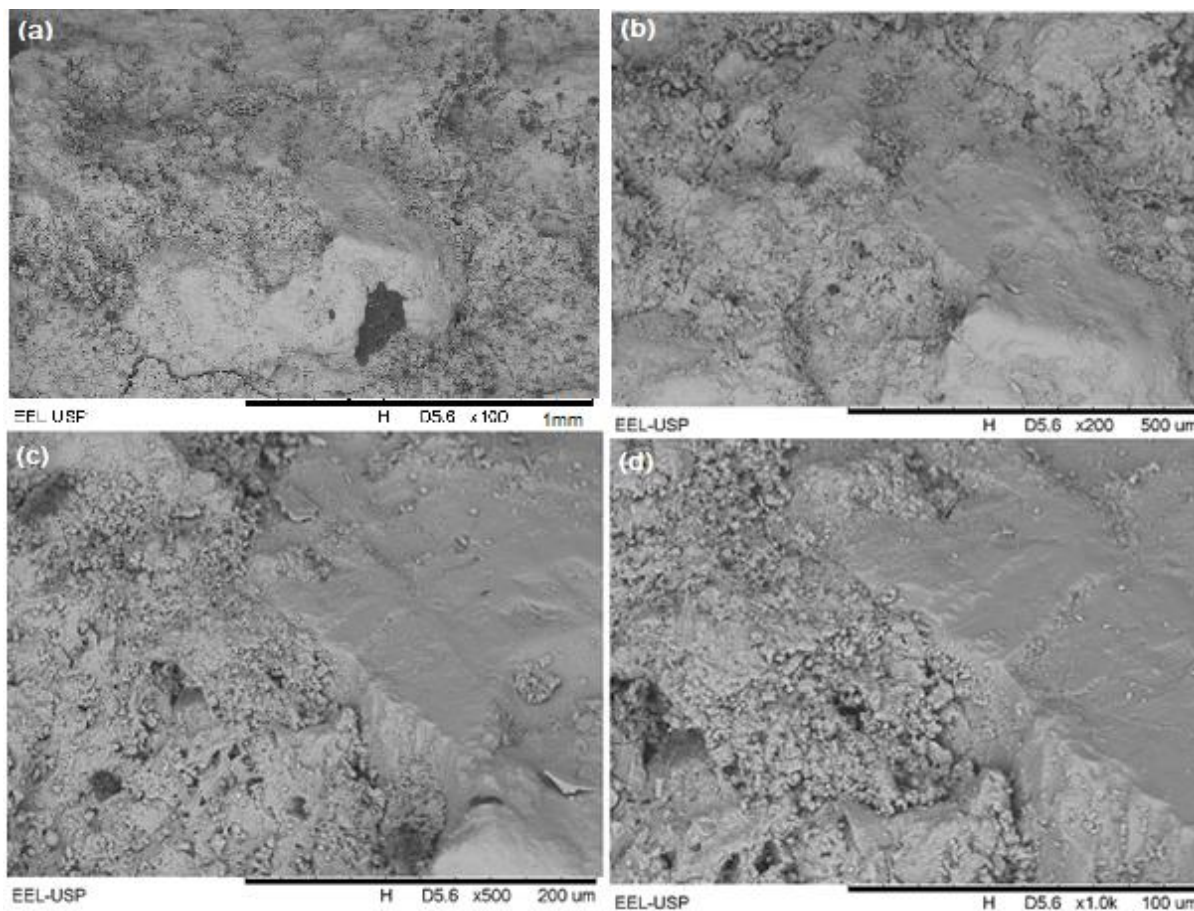
Figura 48 - Imagem de Microscopia Óptica - C25



Fonte: Do Autor, 2021

Analisando, as imagens obtidas pelo MEV, observou-se que em todos os aumentos - 200x, 500x, 1000x e 2000x - a região capturada e apresentada diz respeito somente a pasta de cimento (Figura 49).

Figura 49: - Fotomicrografias ao MEV do C25. Imagens Obtidas por Elétrons Secundários.



Fonte: Do Autor, 2021

- (a) Aumento de 100x
- (b) Aumento de 200x
- (c) Aumento de 500x
- (d) Aumento de 1000x.

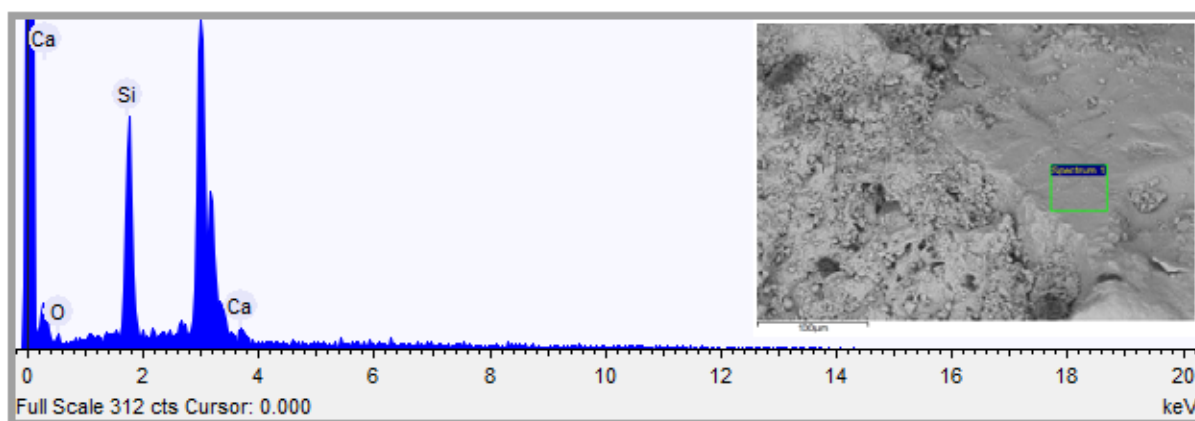
Não foi possível então, por esse motivo, analisar com assertividade a interface entre os agregados constituintes da formulação e a pasta de cimento.

Entretanto, outro ponto a se destacar, é que mesmo sendo somente retratada a pasta de cimento, é possível observar que a mesma se apresenta de duas formas bem distintas. Se analisar a Figura 48d, é notório uma região mais lisa e homogênea à direita, enquanto que à esquerda é visto contornos mais disformes e em menores porções. É possível também observar que compostos hidratados distintos estão presentes em cada uma dessas regiões.

Acima da região relatada anteriormente, também foi possível perceber uma região que possuía somente a pasta de cimento, sem que houvesse interação entre o agregado e a pasta, fato este que pode ter afetado indiretamente a resistência mecânica do material, já que, isso pode ter sido ocasionado por uma mistura menos eficiente das matérias-primas na confecção do concreto.

Partindo-se para a análise de EDS, a Figura 50 demonstra os espectros de elementos encontrados na região estudada – na área mais à direita da amostra – e a Tabela 21 traz a quantidade de cada elemento presente.

Figura 50 - EDS C25 – Região Direita, Mostrando os Picos Principais Relativos aos Elementos Encontrados e a Região onde a Análise foi Obtida.



Fonte: Do Autor, 2021

Tabela 21 - Análise Quantitativa EDS C25 – Região Direita

Elemento	Peso [%]	$\sigma$ Peso [%]	Composto [%]
Oxigênio	22,644	5,683	34,804
Silício	67,681	5,248	59,259
Cálcio	9,676	2,240	5,937

Fonte: Do Autor, 2021

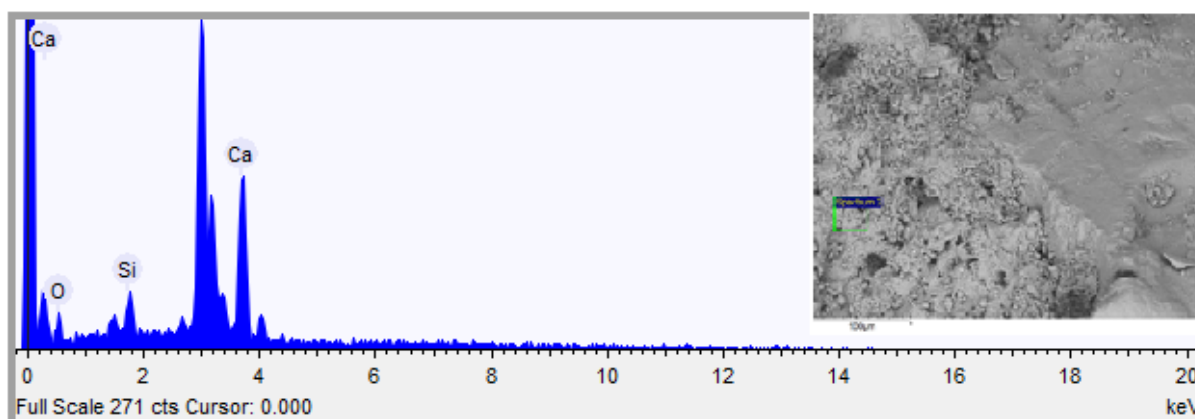
Como pode-se observar, o silício apresenta-se em uma proporção muito maior que qualquer outro elemento encontrado (67,7%). Por se tratar de compostos óxidos hidratados, também é notória a presença de oxigênio (22,6%) e em menor proporção, há cálcio também na área estudada (9,7%).



De acordo com a imagem capturada da área específica onde o estudo foi desenvolvido, é possível perceber que ela diz respeito apenas à pasta de cimento, e, mais especificamente, de uma região lisa, com características mais homogêneas do que a encontrada mais à esquerda. Estes valores podem ser explicados pela menor presença de hidróxido de cálcio na região, bem como maior quantidade de C-S-H e areia nessa porção do material.

Analogamente, dessa vez se tratando da região esquerda da amostra selecionada, foi obtido os resultados qualitativos advindos do EDS (Figura 51) bem como os mesmos, quantitativamente (Tabela 22).

Figura 51 - EDS C25 – Região Esquerda, Mostrando os Picos Principais Relativos aos Elementos Encontrados e a Região onde a Análise foi Obtida.



Fonte: Do Autor, 2021

Tabela 22 - Análise Quantitativa EDS C25 – Região Esquerda

Elemento	Peso [%]	$\sigma$ Peso [%]	Composto [%]
Oxigênio	44,032	4,144	65,197
Silício	6,823	0,994	5,755
Cálcio	49,145	3,716	29,047

Fonte: Do Autor, 2021

A região de interesse, se comparada à análise anterior, mostra-se muito mais heterogênea, apresentando uma topografia mais irregular e menos compacta. De acordo com a quantidade de elementos, o cálcio se apresenta com quase

metade de toda a presença em peso da área estudada (49, 1%), sendo este seguido pelo oxigênio (44%) e pouca quantidade proporcional de silício (6,8%).

Por se mostrar uma região com os compostos com menor relação entre si, por se mostrarem mais distantes um do outro, é possível afirmar que a maior quantidade desses elementos hidratados é de hidróxido de cálcio (formato hexagonal), seguido pela presença do silicato hidratado de cálcio (formato de esferas de gel lamelar).

### **6.9.3 Concreto com 50% de Rejeito e 50% de Brita 0 (C50)**

Observando a imagem obtida do microscópio óptico para a formulação do concreto com quantidades iguais de brita 0 e rejeito de louça sanitária, é possível perceber que, em relação a formulação anterior (C25), ambos agregados ficaram melhor distribuídos na estrutura, como por ser visto na Figura 52.

Além disso, é importante destacar que, nessa região analisada, a dimensão granulométrica do rejeito de louça sanitária e da brita 0 estão bem similares, podendo ter impactado positivamente quanto a resistência à compressão desse material. Como esperado, não há um padrão de distribuição entre os diferentes agregados no concreto e isso pode ser explicado pelo modo de preparo do mesmo, em que essas duas matérias-primas (rejeito e brita 0) foram adicionadas a betoneira no mesmo momento.

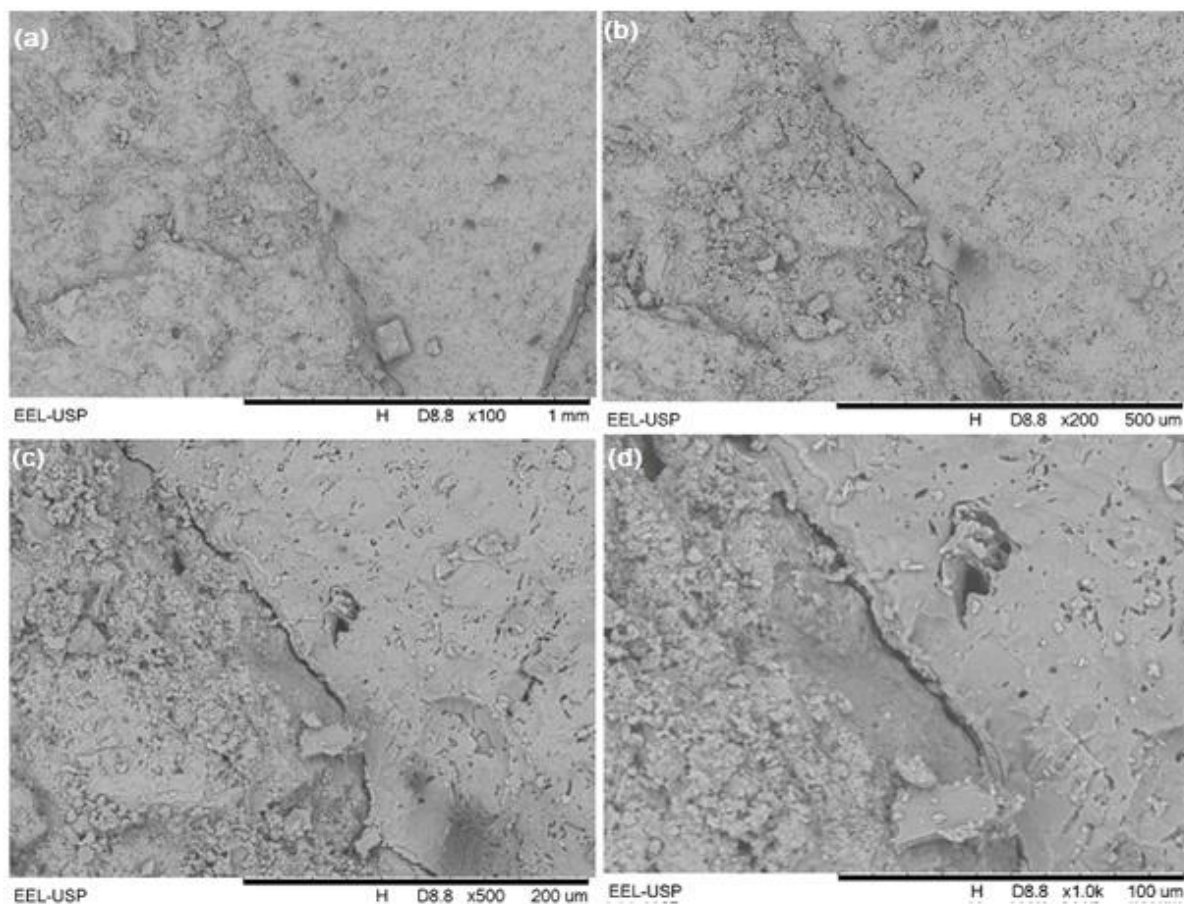
Figura 52 - Imagem de Microscopia Óptica – C50



Fonte: Do Autor, 2021

Com relação às micrografias obtidas pelo MEV é possível distinguir dois componentes do concreto (principalmente a partir do aumento de 200x). Nessa região capturada mostram-se presentes a pasta de cimento e o rejeito de louça sanitária, conforme pode ser visto na Figura 53.

Figura 53: - Fotomicrografias ao MEV do C50. Imagens Obtidas por Elétrons Secundários



Fonte: Do Autor, 2021

- (a) Aumento de 100x
- (b) Aumento de 200x
- (c) Aumento de 500x
- (d) Aumento de 1000x

As regiões são bem distintas e, a partir da Figura 53b, já tem uma diferenciação visual entre ambas. Já nas Figuras 53c e 53d, por estarem mais aproximadas, já consegue-se perceber a superfície específica tanto da pasta de cimento (à esquerda) quanto do rejeito de louça sanitária (à direita).

Um ponto a se destacar é que, se comparado as micrografias obtidas (com rejeito de louça sanitária) com as micrografias da Figura 45 (com brita 0), é possível perceber visivelmente que o ancoragem não é tão firme. Observando as Figuras 53c e 53d, nota-se um caminho de trinca bem evidente exatamente na interface pasta de

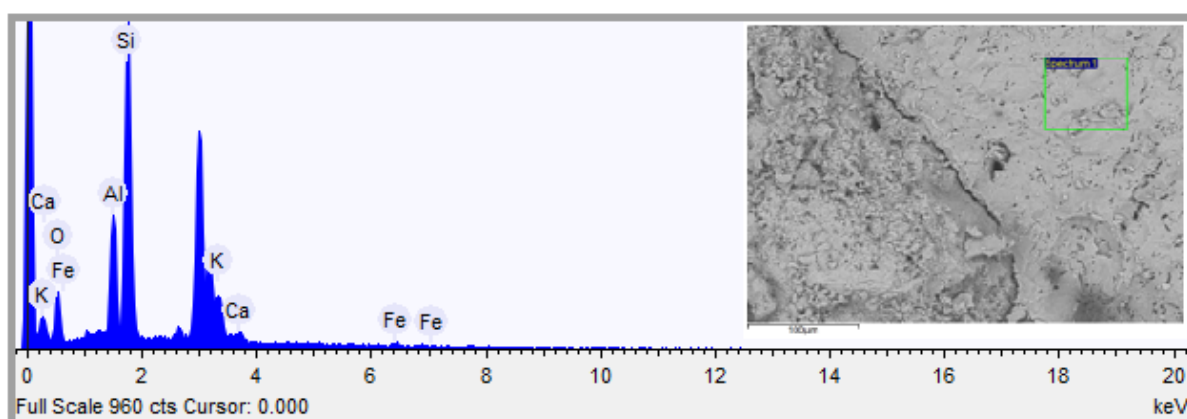
cimento – agregado, o que pode ser prejudicial a resistência mecânica, como um todo, no concreto com esse material.

De acordo com o trabalho de Li *et al.*(2012) tanto pode ser visto na Figura 53c e 53d uma região intermediária entre os lados esquerdo e direito, região esta que recebeu o nome de zona densa, por apresentar uma menor fração de volume de poros e de hidróxido de cálcio (CH). A zona densa, no estudo chinês, foi algo pré-definido, uma vez que os autores fizeram a adição à betoneira primeiramente do cimento, dos agregados graúdos e da água.

Isso foi feito a fim de se formar uma pasta de cimento que envolveria totalmente o agregado graúdo e, somente após uns instantes dessa mistura, seria adicionado a areia (agregado miúdo), que iria dar como resultado a chamada nova zona de interface agregado - pasta de cimento. Tal constatação também diz relação à porosidade, que houve uma diminuição, e a resistência a compressão, que teve um pequeno aumento, com a utilização do rejeito de louça sanitária na formulação do concreto.

Já a Figura 54e a Tabela 23 diz respeito à análise de EDS na formulação do concreto com 50% de rejeito de louça sanitária e de brita 0, sendo o primeiro relacionado à dados qualitativos e o segundo, qualitativo.

Figura 54 - EDS C50 – Região Direita, Mostrando os Picos Principais Relativos aos Elementos Encontrados e a Região onde a Análise foi Obtida.



Fonte: Do Autor, 2021

Tabela 23- Análise Quantitativa EDS C50 – Região Direita

Elemento	Peso [%]	$\sigma$ Peso [%]	Composto [%]
Oxigênio	33,176	1,402	47,607
Alumínio	13,519	0,536	11,504
Silício	44,082	1,137	36,034
Potássio	4,059	0,710	2,383
Cálcio	2,159	0,463	1,236
Ferro	3,005	0,803	1,235

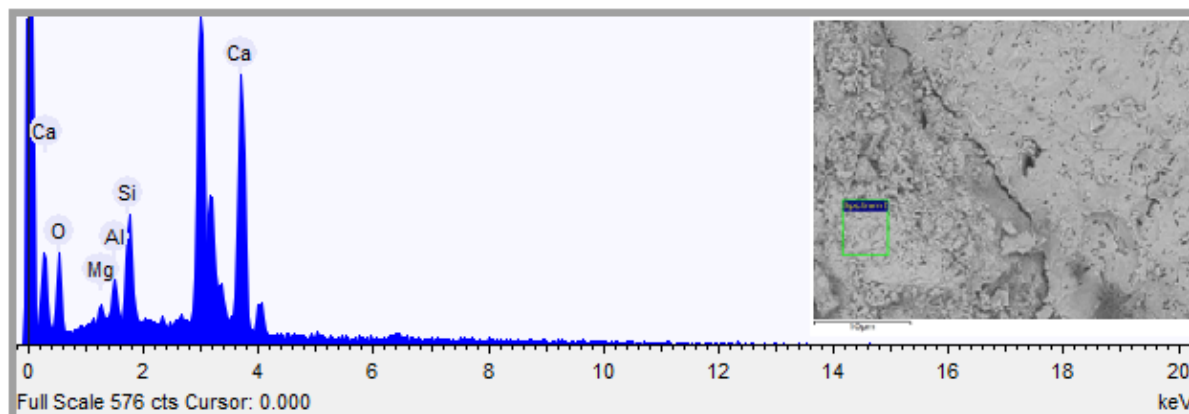
Fonte: Do Autor, 2021

A região estudada diz respeito ao rejeito de louça sanitária e é possível perceber, em peso, que o silício é o elemento mais presente (44%) bem como o oxigênio (33%). Também está presente o alumínio (13,5%) e outros elementos como o potássio, ferro e cálcio em menor quantidade.

Conforme comparado ao EDS do rejeito de louça sanitária, quando esta foi analisada individualmente (Tabela 12), é possível afirmar que a região analisada diz respeito à área interna dessa cerâmica e que os elementos presentes são os esperados para essa análise específica.

Relativo ao lado esquerdo da região capturada pela análise do EDS foi confeccionado o gráfico com os espectros de elementos, conforme a Figura 55 e, da quantidade de elementos na Tabela 24.

Figura 55: - EDS C50 – Região Esquerda, Mostrando os Picos Principais Relativos aos Elementos Encontrados e a Região onde a Análise foi Obtida.



Fonte: Do Autor, 2021

Tabela 24 - Análise Quantitativa EDS C50 – Região Esquerda

Elemento	Peso [%]	$\sigma$ Peso [%]	Composto [%]
Oxigênio	47,928	1,653	67,291
Magnésio	1,599	0,351	1,478
Alumínio	2,859	0,354	2,380
Silício	9,053	0,506	7,240
Cálcio	38,560	1,305	21,611

Fonte: Do Autor, 2021

A região em que foram obtidos os resultados de EDS, que diz respeito ao lado esquerdo da amostra, é referente à pasta de cimento. Mais especificamente, observando-se as quantidades em peso dos elementos presentes, é possível perceber um alto teor de oxigênio (48%) e de cálcio (38,5%). Também se observa o silício em uma quantidade média considerável (9%) e, em uma proporção mínima, o alumínio e o magnésio.

Em função dos compostos serem advindos de óxidos e estes serem hidratados, o oxigênio está em uma grande proporção. Mais ainda, analisando esse recorte da região, pode-se considerar que há a presença de CH e C-S-H na composição da pasta de cimento. Em menor proporção, como é um composto dos

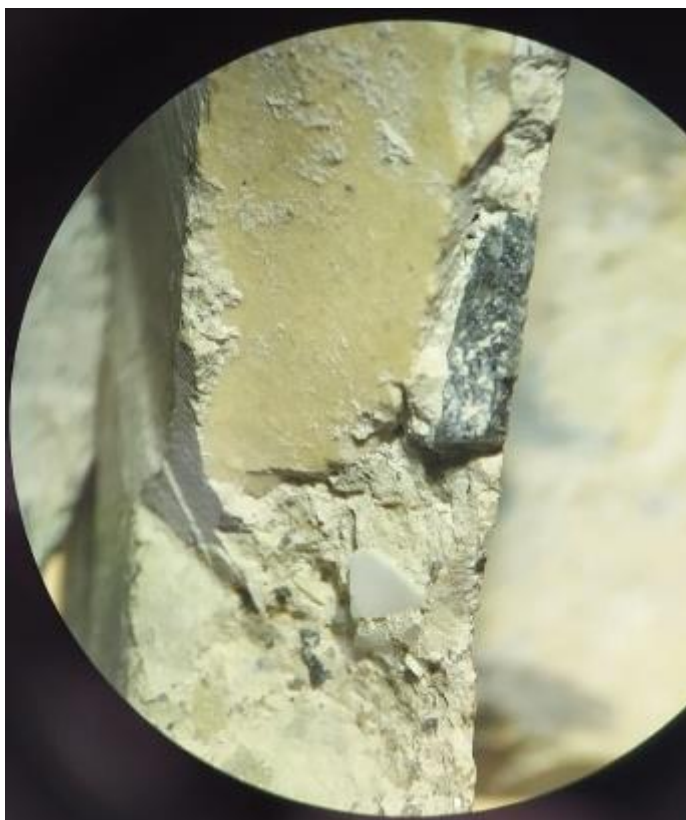
primeiros períodos da hidratação (mas podendo ter um residual deste na estrutura acabada), também foi possível afirmar que há sulfoaluminato de cálcio no concreto.

#### 6.9.4 Concreto com 75% de Rejeito e 25% de Brita 0 (C75)

Com a formulação C75, como esperado, a seção em que foi obtida a imagem de microscópio óptico possui mais quantidade de rejeito de louça sanitária em comparação a brita 0. Também notou-se que a dimensão do rejeito tem um maior tamanho que o outro agregado, mesmo que tenha se utilizado para as formulações as granulometrias mais próximas (Figura 56).

Na Figura 55 também é possível perceber que nessa porção estudada há uma interface pasta de cimento – agregado em que faz divisa por um lado com o rejeito de louça e no outro, com a brita 0. Outro fator que pode ser percebido é que, em todas as formulações que possuía o rejeito de louça sanitária, a ruptura se desenvolveu pela parte interna e não pelo vidrado (esmalte e parte externa).

Figura 56 - Imagem de Microscopia Óptica - C75

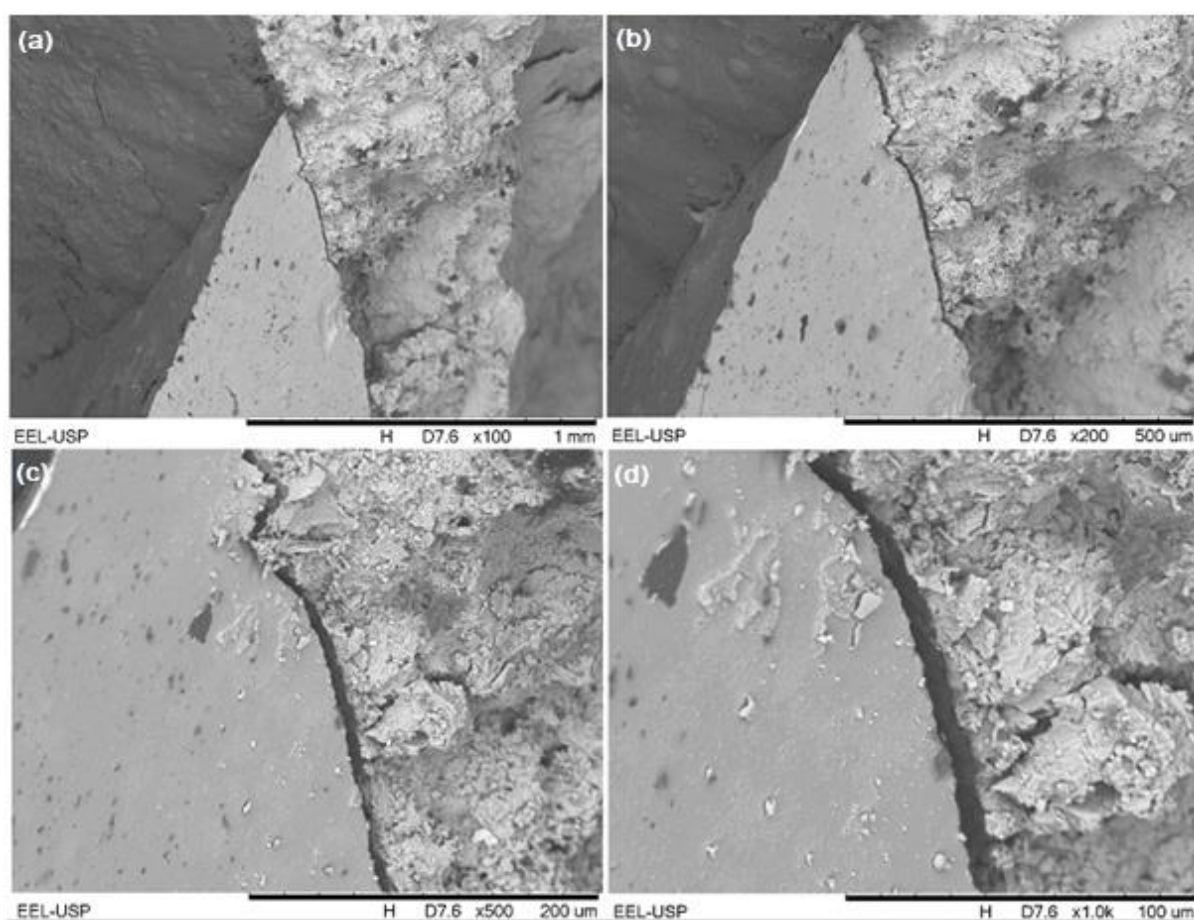


Fonte: Do Autor, 2021



Já em relação à microscopia eletrônica de varredura, ilustrada pela Figura 55, foi possível ver a presença dos dois agregados (rejeito de louça sanitária e a brita 0) e a pasta de cimento. As Figuras 57a e 57b apresentam em uma colocação mais escura e à esquerda, o rejeito de louça sanitária, por poder observar elementos arredondados que se assemelham as observadas nas Figuras 32a e 32b.

Figura 57 - Fotomicrografias ao MEV do C75. Imagens Obtidas por Elétrons Secundários



Fonte: Do Autor, 2021

(a) Aumento de 100x

(b) Aumento de 200x

(c) Aumento de 500x

(d) Aumento de 1000x

Seguindo-se essa análise, mais ao centro da imagem é possível ver a brita 0 em um formato mais pontiagudo, por sua superfície mais homogênea e lisa. Já à direita encontra-se a pasta de cimento, por ser um material que se apresenta em um formato mais complexo e disforme (é uma mistura de matérias-primas heterogênea).

Já as Figuras 57c e 57d, com elas sendo mais aproximadas (500x e 1000x), demonstrou que a brita 0 e a pasta de cimento, mesmo que a ancoragem bem feita, apresentou um caminho de ruptura entre esses dois elementos. Outro ponto a se destacar é a diferença de topografia entre os agregados – que são mais lisos – e o cimento, que por sua característica complexa, tem vários níveis de altura topográfica.

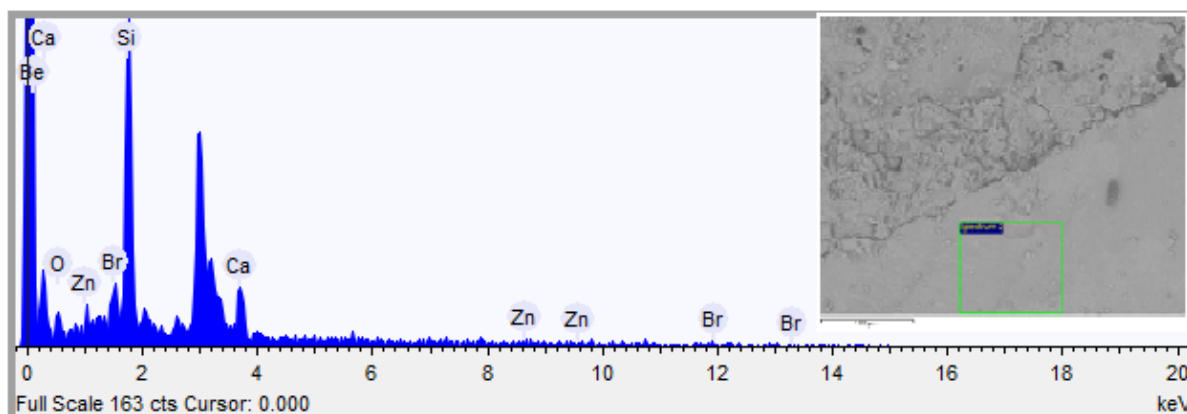
Assim como visto no trabalho de Medina *et al.* (2012), nas micrografias da Figura 57, é mostrado elementos do concreto em sua região direita. Nessa região, em específico, é possível ver elementos em formato de bastão em uma coloração mais esbranquiçada (Figura 57a na região superior), que é caracterizada como etringita. Já na região mais abaixo da mesma imagem, podem-se observar elementos mais disformes e outros arredondados, que é o silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

Novamente, como foi pontuado em Li *et al.* (2012), tanto na Figura 57c quanto na Figura 57d é possível verificar uma região mais escura mais ao centro da micrografia, que foi chamado no trabalho de zona densa, local este que apresenta menor quantidade de CH e poros.

Fazendo-se um paralelo com o trabalho de Thomas *et al.* (2013), é de se avaliar que um concreto confeccionado com o agregado natural (brita 0), apresenta uma maior compactação na interface pasta – agregado e menor quantidade de poros, o que nesse trabalho se mostrou com propriedades isolantes.

Em relação aos elementos presentes na região de interesse, também foi feito um EDS para detectá-los e, na Figura 58 (qualitativamente) e a Tabela 25 (quantitativamente), estes estão discriminados.

Figura 58 - EDS C75 – Região Abaixo, Mostrando os Picos Principais Relativos aos Elementos Encontrados e a Região onde a Análise foi Obtida.



Fonte: Do Autor, 2021

Tabela 25 - Análise Quantitativa EDS C75 – Região Abaixo

Elemento	Peso [%]	$\sigma$ Peso [%]	Composto [%]
Oxigênio	21,371	4,616	37,084
Silício	47,288	3,395	46,742
Cálcio	13,622	1,683	9,435
Zinco	7,546	2,067	3,205
Bromo	10,173	2,117	3,534

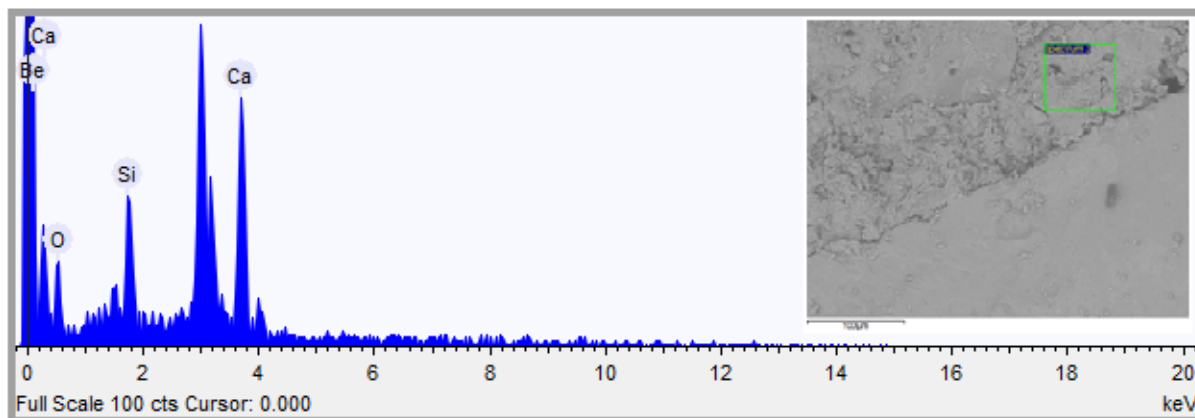
Fonte: Do Autor, 2021

Conforme pode ser observado, a área de análise está em um ponto inferior da Figura 56, que visivelmente é possível afirmar que diz respeito ao interior do rejeito de louça sanitária. O silício, com mais de 47% em peso, é o elemento predominante nessa região e, em sequência, o oxigênio, com 21,3% em peso. É importante também destacar encontraram-se quantidades relevantes de cálcio (13,6%), bromo (10,2%) e zinco (7,5%).

Como era esperado a amostra mostrou-se maior quantidade de silício e oxigênio na sua constituição da parte interna da louça sanitária. Todos os outros elementos, que estão em menor quantidade, são advindos de compostos adicionados para a produção da louça em indústria.

Já na Figura 59 é demonstrada uma região superior da área de interesse e esta é relacionada à pasta de cimento e os valores, encontradas pela análise de EDS, são discriminados na Tabela 26.

Figura 59 - EDS C75 – Região Acima, Mostrando os Picos Principais Relativos aos Elementos Encontrados e a Região onde a Análise foi Obtida.



Fonte: Do Autor, 2021

Tabela 26 - Análise Quantitativa EDS C75 – Região Acima

Elemento	Peso [%]	$\sigma$ Peso [%]	Composto [%]
Oxigênio	51,225	3,928	70,600
Silício	10,919	1,374	8,573
Cálcio	37,856	3,210	20,827

Fonte: Do Autor, 2021

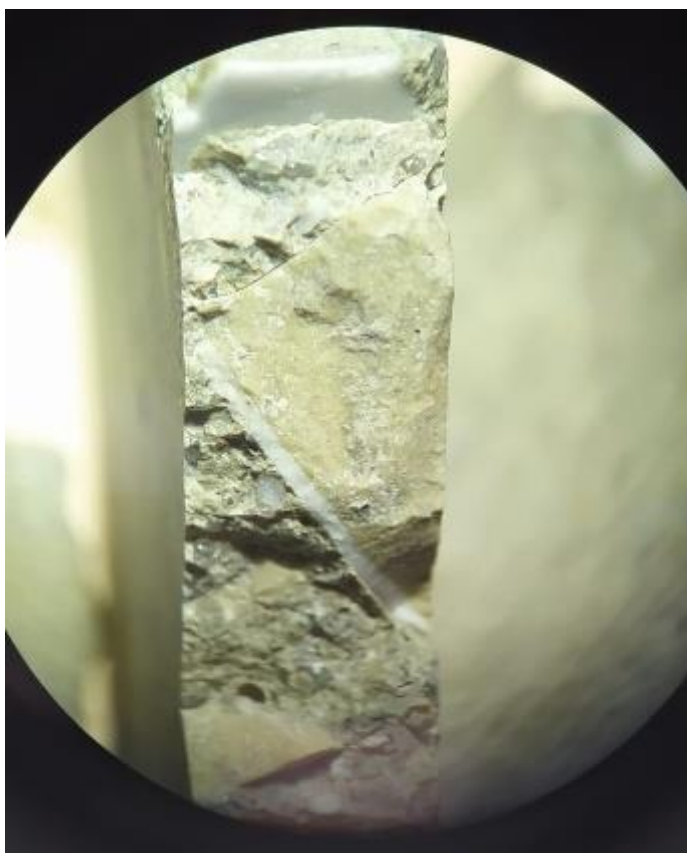
É notória a presença de oxigênio com 51,2% em peso na região analisada, bem como o cálcio com aproximadamente 38%. Pode-se, então, afirmar que possui vários compostos relacionados do cimento hidratado, mais especificamente o hidróxido de cálcio e o silicato hidratado de cálcio (já que foi detectado na análise de EDS uma quantidade de 11% de silício).

### 6.9.5 Concreto com 100% de Substituição – 100% de Rejeito (C100)

A Figura 60 mostra a micrografia óptica de um concreto com 100% de rejeito de louça sanitária em sua constituição e nesta seção, somente um agregado graúdo fazendo vizinhança com a pasta de cimento. Comparativamente com todas as outras imagens obtidas do microscópio óptico, esta imagem apresenta a maior dimensão do rejeito de louça sanitária.

Outro ponto a se destacar que é vista na imagem é separação entre a parte interna e externa do rejeito de louça sanitária (vidrado). A camada do vidrado é muito estreita em relação a toda a área externa dessa cerâmica sendo somente uma superfície, enquanto que toda área interna é o restante de todo o agregado graúdo. Além disso, nota-se que o agregado, nesta imagem faz vizinhança com a pasta de cimento por seus dois constituintes, o vidrado e a parte interna do rejeito.

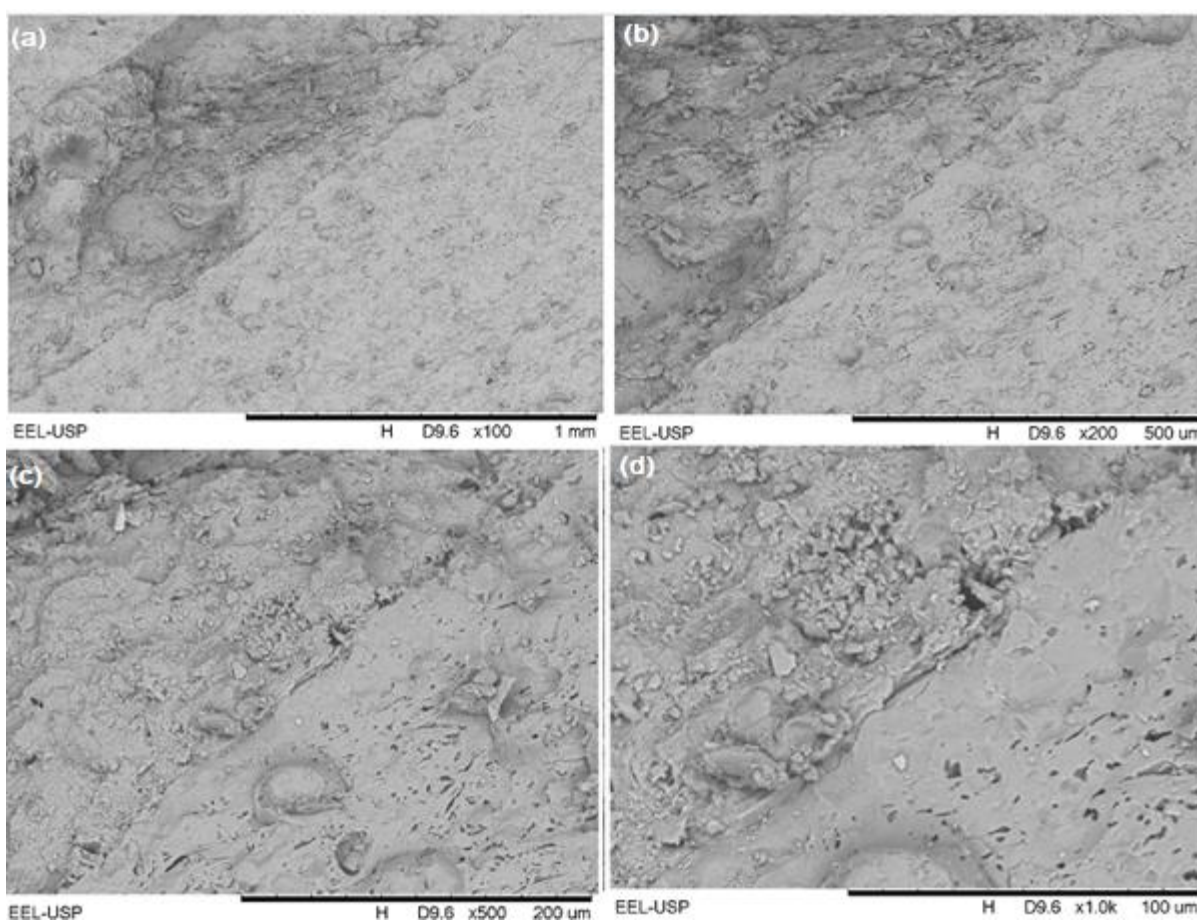
Figura 60 - Imagem de Microscopia Óptica - C100



Fonte: Do Autor, 2021

Já nas micrografias advindas do MEV é possível analisar que a região destacada diz respeito a uma interface entre o agregado graúdo (sua parte interna) e a matriz de cimento. A parte interna do rejeito de louça sanitária é apresentado, na imagem, no lado esquerdo, enquanto a pasta de cimento está posicionada no lado direito (Figura 61).

Figura 61 - Fotomicrografias ao MEV do C100. Imagens Obtidas por Elétrons Secundários



Fonte: Do Autor, 2021

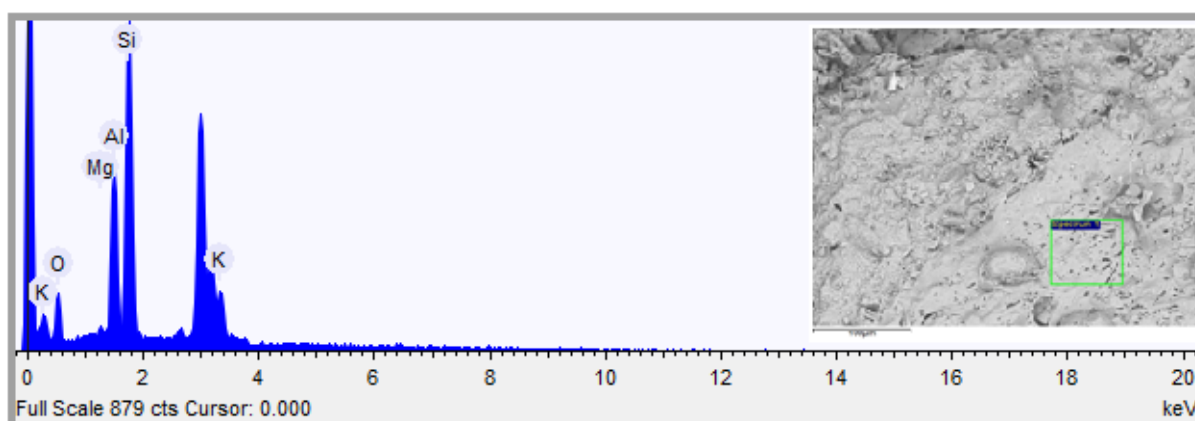
- (a) Aumento de 100x
- (b) Aumento de 200x
- (c) Aumento de 500x
- (d) Aumento de 1000x

Mais especificamente, nas Figuras 61c e 61d, mesmo que esses elementos estejam lado a lado, não é perceptível uma ancoragem firme, como é normalmente observada com a brita como agregado graúdo na constituição do concreto.

Analisando a conformação desse compósito, é como se eles estivessem lado a lado, um constituinte com o outro, mas sem uma inter-relação forte e compacta.

Partindo-se para uma análise mais específica das imagens de MEV, foi confeccionada a Figura 61, referente aos espectros de elementos presentes na amostra e, na Tabela 27, sua constituição quantitativa.

Figura 62 - EDS C100 – Região Abaixo e a Esquerda, Mostrando os Picos Principais Relativos aos Elementos Encontrados e a Região onde a Análise foi Obtida.



Fonte: Do Autor, 2021

Tabela 27 - Análise Quantitativa EDS C100 – Região Abaixo e a Esquerda

Elemento	Peso [%]	$\sigma$ Peso [%]	Composto [%]
Oxigênio	32.796	1.393	46.293
Magnésio	0.963	0.296	0.894
Alumínio	17.245	0.605	14.434
Silício	44.501	1.101	35.782
Potássio	4.496	0.753	2.597

Fonte: Do Autor, 2021

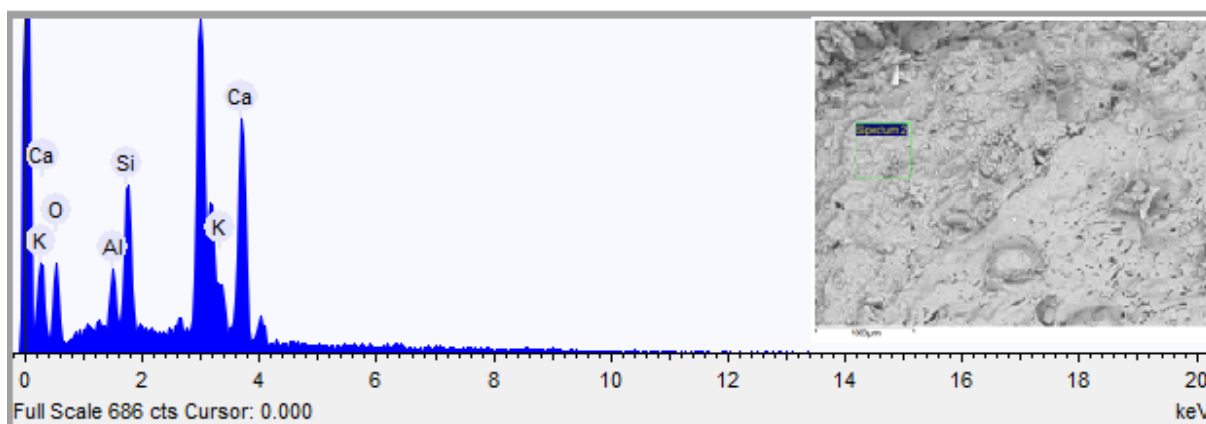
É notório que a região analisada diz respeito ao interior do rejeito de louça sanitária, pela presença principalmente de silício (44,5%) e de oxigênio (32,7%), que são elementos típicos desse tipo de material. Outro elemento também encontrado nessa amostra é o alumínio, que corresponde a 17,2% do peso na região. Em menor

quantidade também foi encontrado potássio (4,5%) e em uma quantidade quase que insignificante o magnésio, com menos de 1%.

Comparando-se a Tabela 12, que é análise de EDS específica para essa região interior do rejeito da louça sanitária, foi possível destacar a similaridade dos elementos encontrados em ambos.

De acordo com a região superior e à direita da área amostrada foi possível a construção da Figura 63, demonstrando o espectro de elementos e Tabela 28, com sua constituição quantitativa.

Figura 63 - EDS C100 – Região Acima e a Direita, Mostrando os Picos Principais Relativos aos Elementos Encontrados e a Região onde a Análise foi Obtida.



Fonte: Do Autor, 2021

Tabela 28 - Análise Quantitativa EDS C100 – Região Acima e a Direita

Elemento	Peso [%]	$\sigma$ Peso[%]	Composto [%]
Oxigênio	47,846	1,543	66,738
Alumínio	4,373	0,357	3,617
Silício	12,706	0,564	10096
Potássio	1,476	0,553	0,842
Cálcio	33,600	1,102	18,708

Fonte: Do Autor, 2021



Como é possível perceber, é notória a grande quantidade de oxigênio, com quase a metade de todo o peso percentual encontrado nessa porção de amostra, em sequência é encontrado, em grande quantidade, o cálcio (33,6%). Em menor número é encontrado o silício com 12,7%, o alumínio com 4,3% e finalmente, o potássio (1,5% que é uma porcentagem quase irrisória).

Com a análise da quantidade desses elementos é possível afirmar que na região encontra-se os compostos hidratados do cimento, como o hidróxido de cálcio, o silicato hidratado de cálcio em maior quantidade, e o sulfoaluminato de cálcio, sendo este em menor quantidade.

## 7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Diante dos resultados obtidos nesse trabalho, algumas sugestões de trabalhos futuros são elencadas abaixo:

Realizar um estudo mais específico com relação ao fator a/c para ensaios de trabalhabilidade do concreto, a fim de que todas as formulações tenham um valor de abatimento próximo e com isso, avaliar também sua resistência mecânica.

Realizar estudos do caminho de ruptura do concreto, desenvolver estudos relacionados à mecânica da fratura dos corpos de prova, para ter um entendimento de forma a entender melhor as tensões compressivas atuantes nos corpos de prova.

Realizar estudos de substituição tanto do agregado graúdo (como neste trabalho) como do agregado miúdo – por diferentes formas de cominuição - fazendo-se uso do rejeito de louça sanitária e avaliando-se a resistência mecânica dos concretos produzidos.

Realizar outros estudos de características de resistência do concreto, como tração, flexão e abrasão.

Realizar as substituições da brita 0 por rejeito de louça sanitária, nas mesmas condições e obter micrografias no mesmo período da realização dos ensaios de resistência a compressão, a fim de se investigar as similaridades e diferenças do concreto no que diz respeito a seus compostos constituintes e sua hidratação.

Para utilização do concreto para fins estruturais, é necessário considerar as recomendações da norma ABNT NBR 6118:2014.

## 8 CONCLUSÃO

Em relação à matéria-prima substituinte, foi detectada a presença de diferentes elementos em sua constituição, podendo-se destacar principalmente oxigênio, zircônia e sílica na região do vidrado (esmalte) e oxigênio, sílica e alumínio na região interna do rejeito de louça sanitária e essa constatação foi possível pelas análises realizadas tanto de EDS quanto o MEV.

De acordo com os resultados apresentados, é possível concluir que o agregado graúdo mais comumente usado na construção civil pode ser substituído pelo rejeito de louça sanitária cominuída em concretos, sem que haja um decréscimo de resistência mecânica à compressão. Os valores obtidos para tal se mostraram satisfatórios para o uso do concreto para fins estruturais, já que todos que não tiveram problemas em sua confecção (como o C25) se mostraram suportar tensões compressivas acima da casa dos 40MPa, podendo destacar o resultado do C100 – tendo o maior valor dentre todas as resistências mecânicas (42,44MPa).

Destaca-se que todas as formulações não apresentaram exsudação nem escorrimento na produção do concreto. Mais especificamente, o concreto CR e C100 apresentaram menor trabalhabilidade, enquanto que os traços intermediários se mostraram maior plasticidade e facilidade de manuseio. Entretanto, foi possível constatar que tal característica poderia ser otimizada fazendo-se uso de uma nova relação água/cimento (a/c) – com a utilização de mais água a fim de se deixar a massa fresca de concreto mais fluida – ou com a adição de aditivos plastificantes.

No que tange a relação das resistências mecânicas e a porosidade, o concreto C25 demonstrou uma maior absorção de água, fato este que pode ter interferido diretamente no seu desempenho (que foi abaixo da média de todos os outros) e isso pode ter sido causado pelo modo de confecção dessa formulação. Já considerando todos os outros tipos de concreto, observou-se que a medida que ia se substituindo a brita 0 pelo rejeito de louça sanitária, a porosidade média do material diminuía.

Na análise do caminho crítico de fratura dos corpos-de-prova, foi possível destacar três tipos de ruptura: cisalhada, bipartida cônica e uma mistura de ambas. Os concretos CR, C25 e C50 se apresentaram com o primeiro tipo de ruptura, em que o caminho das trincas propagou-se na diagonal; o concreto C75 teve a ruptura

de cima para baixo, caracterizando uma ruptura bipartida cônica e, finalmente, o C100 se rompeu tanto na diagonal quanto de cima para baixo, demonstrando assim uma fratura combinada.

Considerando-se a ancoragem dos agregados graúdos na matriz cimentícia, visualmente e em primeira análise a olho nu, não houve uma tendência a trinca se propagar mais pelo rejeito de louça sanitária se comparada à brita, tornando-se a utilização desse resíduo sólido um bom substituinte. Com as imagens advindas do microscópio óptico, também não se confirmou um padrão de ruptura – se comparado os agregados graúdos do concreto – e, foi possível detectar o caminho preferencial de ruptura passando pela parte interna do rejeito de louça sanitária.

Foi possível, pela análise de EDS, verificar os compostos da hidratação do cimento em várias análises, relativo à região onde foram focalizados os raios-X de dispersão de energia, tais como o sulfoaluminato de cálcio, hidróxido de cálcio e o silicato de cálcio hidratado. Já em relação às regiões da parte interna do rejeito de louça sanitária e da brita 0, foi observado elementos presentes em sua constituição que, para o primeiro também foram encontrados na análise isoladas dele e, para o segundo, que são encontrados na literatura.

Finalmente, analisando as micrografias obtidas pelo microscópio eletrônico de varredura, pôde se destacar que a brita 0, em comparação ao rejeito de louça sanitária, se fixou de uma forma mais firme na matriz cimentícia, demonstrando assim, uma melhor ancoragem e possivelmente, uma interface agregado – pasta de cimento mais compacta, entretanto isso não mostrou resultados diretos nos valores encontrados nas resistências mecânicas ensaiadas.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, D. H.; GRILLO, R. H. F.; MAESTRELLI, S. C., ROVERI, C. D. Properties of concrete with use ceramic sanitary ware waste as aggregate. **Revista Matéria**. v. 24, n. 2, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**. Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**. Concreto: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**. Agregado para concreto. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**. Concretos para fins estruturais: classificação para massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9887**. Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**. Concretos de Cimento Portland: Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 65**. Cimento portland – Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**. Concreto: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**. Agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2011.

AWOYERA, P. O.; NDAMBUKI, M. J.; AKINMUSURU, J. O.; OMOLE, D. O. Characterization of ceramic waste aggregate concrete. **HBRC Journal**, v. 14, n. 3, p. 282–287, 2016

DEL BOSQUE, I. F. S., ZHU, W.; HOWIND, T.; ROJAS, M. I. S.; MEDINA, C. Properties of interfacial transition zones (ITZs) in concrete containing recycled mixed aggregate. **Cement and Concrete Composites**, v. 81, p. 25–34, 2017.

CALLISTER JR, W. D.; RETHWISH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

- CRUZ, C. M. **Efeito da adição de sianito nas propriedades de concretos: estudos das equações de empacotamento e propriedades tecnológicas.** 2017. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2017.
- FRAZÃO, E. B. **Tecnologia de rochas na construção civil.** 1. ed. São Paulo: ABGE, 2002.
- FUSCO, P. B. **Tecnologia do concreto estrutural: tópicos aplicados.** 2. Ed. São Paulo: Pini, 2012.
- GALVÃO, J. C. A. **Estudo das propriedades dos concretos confeccionados com cimento CP V – ARI e CP II – F 32, sob diferentes temperaturas de mistura e métodos de cura.** 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e Processos) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.
- GRILLO, R. H. F. **Estudos da influência de aditivos redutores de água em concretos da construção civil.** 2014. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2014.
- GONÇALVES, P. **A reciclagem integradora dos aspectos ambientais, sociais e econômicos.** 1. ed. Rio de Janeiro: DP & A: Fase, 2003.
- HALICKA, A.; OGRODNIK, P.; ZEGARDLO, B. Using ceramic ware waste as concrete aggregate. **Construction and Building Materials.** v.48, p. 295-305, 2013.
- HELENE, P. **Controle de Qualidade do Concreto.** São Paulo: Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, 1981.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. **Lixo municipal. Manual de gerenciamento integrado.** 2. ed. São Paulo: IPT/CEMPRE, 2000.
- ISAIA, G. C. **Concreto: ciência e tecnologia.** 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011.
- ISAIA, G. C. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações.** 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2005.
- JARDIM, A.; YOSHIDA, C.; MACHADO FILHO, J. V. **Política nacional, gestão e gerenciamento de resíduos sólidos.** 1. ed. Barueri: Manole, 2012.
- KIRCHHERR, J; REIKE, D; HEKKERT, M. **Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions.** v. 127, 221-232, 2017.
- KURDOWSKI, W. **Cement and concrete chemistry.** Kraków: Springer, 2014.
- LI, Z. **Advanced concrete technology.** 1 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.
- LI, W.; et al. **Interfacial transition zones in recycled aggregate concrete with different mixing approaches.** v. 35, p. 1045-1055, 2012.

LUCAS, J.; BRITO, J.; VEIGA, R.; FARINHA, C. The effect of using sanitary ware as aggregates on rendering mortar's performance. **Materials and Design**. v. 91, p. 155-164, 2016.

MEDINA, C.; FRÍAS, M.; ROJAS, M. I. S. Leaching in concrete containing recycled ceramic aggregate from sanitary ware industry. **Journal of Cleaner Production**. v. 66, p. 85-91, 2014.

MEDINA, C.; FRÍAS, M.; ROJAS, M. I. S. Microstructure and properties of recycled concretes using ceramic sanitary ware industry waste as coarse aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 31, p. 112–118, 2012.

MEDINA, C.; ROJAS, M. I. S.; FRÍAS, M. Reuse of sanitary ceramic wastes as coarse aggregate in eco-efficient concretes. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 1, p. 48–54, 2012.

MEDINA, C.; ZHU, W.; HOWIND, T.; ROJAS, M. I. S.; FRÍAS, M. Influence of mixed recycled aggregate on physical – mechanical properties of recycled concrete. **Journal of Cleaner Production**. v. 68, p.216-225, 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties and materials**. 3 ed., New York: McGraw-Hill, 2006.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2 ed. São Paulo: Pini, 1997.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Concrete technology**. 3 ed. Edinburgh: Pearson, 2010.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**. 13 ed. São Paulo: Editora Globo, 1998.

REED, J. S. **Principles of ceramics processing**. 2 ed., New York: John Wiley & Sons, Inc, 1995.

RITZSEN, S.; SANDSTROM, G. O. **Barriers to the Circular Economy – integration of perspective and domain**. v. 27, p 7-12, 2017.

SENTHAMARAI, R. M.; DEVADAS MANOHARAN, P. Concrete with ceramic waste aggregate. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 9–10, p. 910–913, 2005.

SHACKELFORD, J. E. **Ciência dos materiais**. 6 ed. São Paulo: Pearson, 2008.

SHETTY, M. S. **Concrete technology, theory and practice**. 17 ed. New Delhi: Chand & Company Ltd., 2005.

SILVA, I. J. **Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho: propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura**. 2000. Tese (Doutorado

em Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2000.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 2 ed., London: Thomas Telford Services Ltd, 1997.

THOMAS, C.; SETIÉN, J.; POLANCO, J. A.; ALAEJOS, P.; DE JUAN, M. S. Durability of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 40, p.1054-1065, 2013.

VAN VLACK, L. H. **Princípios de ciência e tecnologia dos materiais**. Rio de Janeiro: Edgard Blucher, 2000.



## APÊNDICES

### APÊNDICE A – Tabelas Referentes à Análise Granulométrica da Brita 0 e Rejeito de Louça Sanitária

Tabela 29 – Resultados da Análise Granulométrica da Amostra 1 de Brita 0

Amostra 1		Análise Granulométrica - Brita 0 1001,37g		
Peneira [mm]	Massa [g]	Massa Acumulada	Retida [%]	Retida Acumulada [%]
12,5	0	0	0%	0%
9,5	5,53	5,53	1%	1%
6,3	282,15	287,68	29%	29%
4,8	243,21	530,89	25%	54%
3,35	220,63	751,52	22%	76%
2,4	100,94	852,46	10%	86%
1,2	103,8	956,26	11%	97%
0,6	29,82	986,08	3%	100%
0,3	1,37	987,45	0%	100%
0,15	0,02	987,46	0%	100%
<0,15	0,01	987,48	0%	100%
Total	987,48	987,48	100%	100%

Fonte: Do Autor, 2021

Tabela 30 – Resultados da Análise Granulométrica da Amostra 2 de Brita 0

Amostra 2		Análise Granulométrica - Brita 0 1001,12		
Peneira [mm]	Massa [g]	Massa Acumulada	Retida [%]	Retida Acumulada [%]
12,5	0	0	0%	0%
9,5	3,3	3,3	0%	0%
6,3	367,77	371,07	37%	37%
4,8	210,25	581,32	21%	59%
3,35	199,46	780,78	20%	79%
2,4	95,6	876,38	10%	89%
1,2	105,22	981,6	11%	99%
0,6	10,31	991,91	1%	100%
0,3	0,6	992,51	0%	100%
0,15	0,01	992,52	0%	100%
<0,15	0	992,52	0%	100%
Total	992,52	992,52	100%	100%

Fonte: Do Autor, 2021

Tabela 31 – Resultados da Análise Granulométrica da Amostra 3 de Brita 0

Análise Granulométrica - Brita 0				
Amostra 3		1001,39		
Peneira [mm]	Massa [g]	Massa Acumulada	Retida [%]	Retida Acumulada [%]
12,5	0	0	0%	0%
9,5	7,92	7,92	1%	1%
6,3	352,15	360,07	35%	36%
4,8	226	586,07	23%	59%
3,35	209,1	795,17	21%	80%
2,4	53,37	848,54	5%	85%
1,2	133,45	981,99	13%	99%
0,6	11,45	993,44	1%	100%
0,3	0,64	994,08	0%	100%
0,15	0,01	994,08	0%	100%
<0,15	0	994,09	0%	100%
Total	994,09	994,09	100%	100%

Fonte: Do Autor, 2021

Tabela 32 - Resultados da Análise Granulométrica da Amostra 1 de Rejeito de Louça Sanitária

Análise Granulométrica – Rejeito de Louça Sanitária				
Amostra 1		1002,21g		
Peneira [mm]	Massa [g]	Massa Acumulada	Retida [%]	Retida Acumulada [%]
12,5	127,94	127,94	13%	13%
9,5	322,84	450,78	32%	45%
6,3	310,61	761,39	31%	76%
4,8	83,16	844,55	8%	85%
3,35	84,1	928,65	8%	93%
2,4	42,98	971,63	4%	97%
1,2	24,21	995,84	2%	100%
0,6	2,04	997,88	0%	100%
0,3	0,25	998,13	0%	100%
0,15	0,13	999,23	0%	100%
<0,15	1,1	999,36	0%	100%
Total	999,36	999,36	100%	100%

Fonte: Do Autor, 2021

Tabela 33 – Resultados da Análise Granulométrica da Amostra 2 de Rejeito de Louça Sanitária

Análise Granulométrica – Rejeito de Louça Sanitária				
Amostra 2		1001,93g		
Peneira [mm]	Massa [g]	Massa Acumulada	Retida [%]	Retida Acumulada [%]
12,5	118,72	118,72	12%	12%
9,5	358,13	476,85	36%	36%
6,3	346,79	823,64	35%	37%
4,8	71,7	895,34	7%	78%
3,35	71,1	966,44	7%	85%
2,4	25,61	992,05	3%	87%
1,2	7,8	999,85	1%	88%
0,6	0,21	1000,06	0%	88%
0,3	0,37	1000,43	0%	100%
0,15	0,1	1000,53	0%	100%
<0,15	0,49	1001,02	0%	100%
Total	1001,02	1001,02	100%	100%

Fonte: Do Autor, 2021

Tabela 34 – Resultados da Análise Granulométrica da Amostra 3 de Rejeito de Louça Sanitária

Análise Granulométrica – Rejeito de Louça Sanitária				
Amostra 3		1002,21g		
Peneira [mm]	Massa [g]	Massa Acumulada	Retida [%]	Retida Acumulada [%]
12,5	197,9	197,9	20%	20%
9,5	336,02	533,92	34%	53%
6,3	280,71	814,63	28%	81%
4,8	72,41	887,04	7%	89%
3,35	64,18	951,22	6%	95%
2,4	31,62	982,84	3%	98%
1,2	15,94	998,78	2%	100%
0,6	1,51	664,27	0%	100%
0,3	0,16	1000,45	0%	100%
0,15	0,01	1000,89	0%	100%
<0,15	0,44	1000,9	0%	100%
Total	1000,9	1000,9	100%	100%

Fonte: Do Autor, 2021